

BÜYÜK KÜTLELİ BİR ÇELİK PARÇANIN DÖKÜMÜNDE KLASİK VE BİLGİSAYAR DESTEKLİ MÜHENDİSLİK YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Ramazan KAYIKCI

Metal Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Esentepe Kampüsü, Sakarya
rkayikci@sakarya.edu.tr

(Geliş/Received: 20.04.2007; Kabul/Accepted:03.12.2007)

ÖZET

Bu çalışmada klasik mühendislik yöntemi ile tasarlanarak kuma dökülen yaklaşık brüt 5 ton ağırlığında bir çelik dökümün bilgisayar destekli mühendislik teknikleri ile yeniden tasarlanması, dökülmesi ve katılaştırılma süreçleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Çalışmaya konu olan döküm parça ilk kez endüstriyel ortamda klasik mühendislik tasarımları ile dökülmüştür. Ultrason test tekniği ile muayene edilen bu dökümün iç bölgelerinde çekme boşluğu tespit edilmiştir. Daha sonra aynı parçanın döküm modeli bir CAD programında üç boyutlu olarak tasarlanmış ve simülasyon ortamında katılma modellemeleri yapılmıştır. Katılma modellemesi sonuçlarına göre üç boyutlu kalıplama tasarımı optimize edildikten sonra parça tekrar dökülmüştür. Dökülen parça tekrar boşluk ve gözeneklilik testlerinden geçirilerek elde edilen veriler bilgisayar modellemelerinden alınan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar klasik mühendislik teknikleri ile dökülen parçanın kalıplama tasarımından kaynaklanan hatalara bağlı olarak iç bölgelerinde çekme boşluğu oluştuğunu buna karşılık bilgisayar destekli mühendislik teknikleri ile kalıplama tasarımı yapılarak dökülen aynı parçanın bu tür kusurlar içermediğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Çelik dökümler, besleyici tasarımı, döküm simülasyonu, katılma, tahribatsız muayene.

COMPARISON OF CLASSICAL AND COMPUTER AIDED ENGINEERING TECHNIQUES USED IN CASTING A LARGE STEEL PART

ABSTRACT

In this study, the casting design and resulting solidification characteristics of a steel part (weighted approx. 5 tones brut) produced by classical and computer aided engineering (CAE) techniques were investigated and the results are compared. The steel part was designed and cast first using classical engineering techniques in an industrial foundry conditions. Afterwards, using a CAD program a 3D casting design of the part was built and then, the solid model was optimized in a 3D solidification modeling (simulation) environment. Then, the part was sand cast. Both castings were tested using ultrasonic testing technique. Finally, results obtained from both computer model and real castings were compared. The results showed that depending on miscalculation in molding design, a shrinkage defect existed in the central region of the casting produced using classical engineering method. Whereas, no such defects were found in the casting produced using computer aided engineering method.

Keywords: Steel castings, riser design, casting simulation, solidification, non destructive testing.

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Döküm parça üretimi çok aşamalı bir süreçtir ve bu süreçlerin ilki parçanın kendi geometrisini ve kullanılacak alaşımın özelliklerini tasarlamaktır. Bundan

sonraki aşama sıvı döküm alaşımının kalıp boşluğuna düzgün ve tam bir şekilde doldurula-bilmesini ve katılma sırasında boşluksuz bir döküm elde edilmesini sağlayan yolluk ve besleyici sisteminin tasarlanmasıdır. Parçanın yolluk ve besleyicileri ile

bütünleştirilmiş olan tasarımı kısaca kalıplama tasarımı olarak tanımlanmaktadır. İdeal bir kalıplama tasarımında uyulması gereken en önemli iki kriter ise dökümün kalitesi (mikro ve makro yapısının tamlığı) ve dökümün % verimi ((parça ağırlığı/toplam döküm ağırlığı)x100) dir [1-2]. Bu kriterler üretim maliyeti ve kalite ekseninde dökümhane mühendislerini en az metal kullanımı ile (minimum yolluk ve besleyici ağırlığı ile) en yüksek kalitede döküm üretmeye zorlamaktadır. Özellikle klasik mühendislik yöntemleri ile kalıplama tasarımı yapılan dökümlerde döküm kusurları yüzünden büyük ölçüde maliyet artışı ve hurda riskleri oluşmaktadır [3]. Buna karşılık bilgisayar destekli mühendislik teknikleri ile tasarlanan dökümlerde muhtemel kalite sorunlarının henüz tasarım aşamasında tahmin edilebildiği ve yukarıda değinilen risklerin azaltılabildiği görüşü yaygınlaşmaktadır [4]. Bu yüzden bu çalışmada büyük kütleli bir çelik döküm parçanın üretiminde kullanılan klasik ve bilgisayar destekli mühendislik teknikleri ile yapılan tasarımlar ve üretilen dökümlerin kalitesinin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Çelik Dökümlerin Kalıplanmasında Besleyici ve Besleme Etkinleştirici Elemanların Tasarımı (Rigging System Design in Steel Castings)

Besleyici tasarımı detaylı bilgi ve tecrübeler gerektirmekle birlikte genel olarak her hangi bir döküm parça için besleyici tasarımı aşağıda verilen üç kriteri sağlayacak şekilde yapılmalıdır. Bu çalışmanın temeli önemli ölçüde iki farklı tasarım tekniği ile yapılan kalıplama ve dökümlerin karşılaştırılmasına dayandığından söz edilen tasarım kriterleri aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

2.1.a. Katılma Zamanı (Modül) Kriteri (Module Requirement)

Etkili bir beslemenin yapılabilmesi için gerekli ilk koşul katılmanın besleyicilere doğru ilerlemesi ve besleyicilerde sonlanmasıdır. Bu tür bir katılma yönlendirilmiş katılma olarak adlandırılabilir. Bu aşamada en önemli kriter döküm parça içerisinde izole olmuş sıcak nokta kalmaması ve sıcak noktaların ancak besleyicilerin üzerinde oluşmasıdır [5]. Bu kriteri sağlayabilmek için besleyicilerin döküm ile en azından aynı zamanda veya biraz daha geç katılması gerekir. Kuma dökümlerde verilen bir dökümün katılma zamanı o dökümün hacmini (V) yüzey alanına (A) oranlayan bir bağıntı olan Chvorinov yaklaşımı [6] ile hesaplanabilir. Bu yaklaşımı gösteren eşitlik aşağıda gösterilmiştir.

$$t = k \left(\frac{V}{A} \right)^2 \quad (1)$$

Bu eşitlikte yer alan (t) dakika cinsinden katılma süresi (k) ise döküm alışı ve kalıp malzemesine

göre değişen eşitlik sabitidir. Dökümhane uygulamalarında (V/A) faktörü sıkça kullanılmakta ve genellikle (cm) cinsinden ifade edilen bu faktör "modül" (M) olarak adlandırılmaktadır. Döküm ve besleyicinin aynı alışı olduğu ve her ikisinin de aynı kalıp malzemesi içerisinde olduğu göz önüne alındığında yukarıda değinilen yönlendirilmiş katılma koşulu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\left(\frac{V}{A} \right)_{\text{besleyici}} \geq \left(\frac{V}{A} \right)_{\text{döküm}} \quad (2)$$

Buna göre besleyici kendisine en yakın sıcak noktadan daha geç katılmalıdır. Bu kriter çelik dökümlerde genellikle aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$M_b = k M_d \quad (3)$$

Burada, M_b besleyici modülü, M_d döküm üzerinde besleyiciye yakın sıcak noktanın modülü ve (k) ise bir katsayı olup, çelik dökümlerde en az 1,2 alınmalıdır.

2.1.b. Besleme Yolu Kriteri (Feed Path Requirement)

Sıcak nokta ile besleyici arasında daima açık kalacak ve belirli bir ısı gradyanına sahip bir besleme yolu bulunmalıdır [7]. Bu yol katılma süresince kapanmamalıdır. Bu sayede besleyiciden sıcak noktaya sıvı metal akışı sağlanabilir. Besleyicinin döküme bir boyun ile bağlandığı durumlarda ise aşağıdaki kriteri sağlayacak bir tasarım yapılmalıdır.

$$M_b = k_1 M_n = k M_d \quad (4)$$

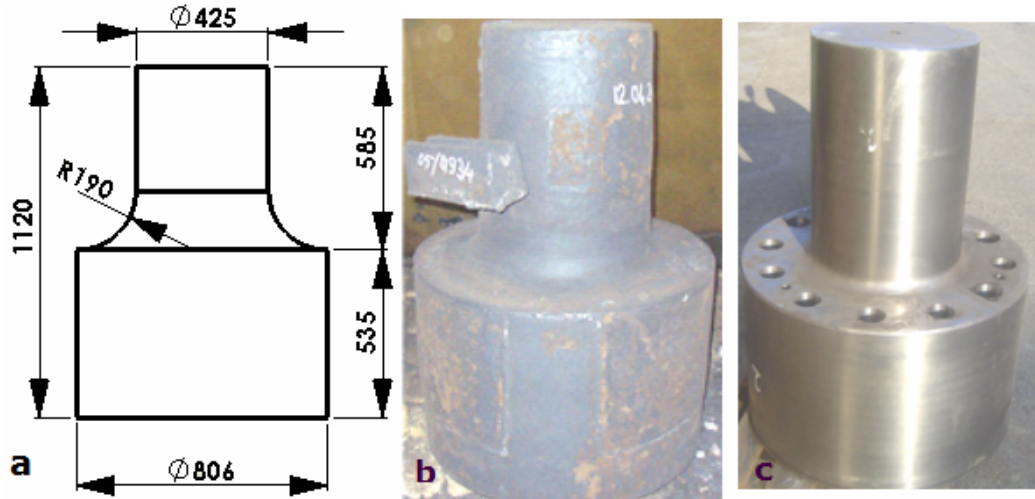
Burada M_n besleyici boğazı modülünü temsil etmektedir ve $k_1 > k$ olmalıdır. Eğer besleyici dökümün sıcak noktasına yüzeyden direkt bağlanamamakta ve sıcak nokta ile besleyici arasında belirli bir modüle (M_a) sahip bir ara bölge kalıyor ise bu durumda Eşitlik 4 aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$M_b = k_1 M_n, \quad M_n = k_2 M_a, \quad M_a = k M_d \quad (5)$$

Eşitlik 5 modülün sıcak noktadan ara bölgeye oradan besleyici boğazına ve son olarak ta besleyiciye doğru kademeli olarak ilerlemesi anlamına gelmektedir ve burada ($k_1 > k_2 > k$) olmalı ve aralarındaki fark en az 1,1 kat olmalıdır ki bu sayede ancak hacimsel çekmeler kolaylıkla beslenebilmektedir.

2.1.c. Besleyici Hacmi Gereksinimi (Feed Metal Volume Requirement)

Besleyicilerin belirli bir besleme kapasiteleri vardır ve bu kapasite belirli bir hacim limiti ile sınırlandırılmak zorundadır [5]. Aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilen bu limit boşluksuz bir döküm için bir besleyicinin sahip olması gereken asgari metal miktarını belirleyeceğinden hiçbir besleyici bu hacimden daha küçük olmamalıdır [8].



Şekil 1. Döküm parçanın a- model resmi b-dökülmüş ve c- işlendikten sonraki fotoğraf görüntüsü (Views from the casting: a- pattern drawing b- as cast and c- machined cast photograph).

$$V_b = \frac{\alpha V_d}{\phi - \alpha} \quad (6)$$

Burada V_b verilen bir döküm (veya birden fazla besleyici kullanıldığında belirli bir besleme bölgesi) için gerekli olan besleyici hacmidir. V_d tek bir besleyici kullanılacaksa döküm parçanın, birden fazla besleyici kullanılacaksa besleyici bağlanacak kısmın hacmidir. α , döküm alaşımının % hacimsel çekme oranıdır, örneğin bu oran çeliklerde yaklaşık % 6 dır. ϕ , ise besleyicinin toplam hacminin % olarak harcayabildiği besleme metalidir ve “besleyici verimi” olarak tanımlanabilir. Bu oran besleyicinin tamamen katılaştıktan sonra üzerinden merkezine doğru genellikle huni şeklinde oluşan eksilmenin (çökmenin) besleyicinin toplam hacmine oranı ile bulunabilir. Örneğin normal silindirik besleyicilerde bu oran %14 iken izolasyon gömlekli besleyicilerde %25, egzotermik malzemelerden oluşan gömleklerin kullanıldığı besleyicilerde ise %40 oranlarına yükselebilmektedir.

Boşluksuz bir döküm için yukarıda verilen kriterlerin tamamının sağlanması gerekir. Örneğin verilen bir döküm parça için önce kaç adet besleyici gerektiği saptanır. Bunun için genellikle katılma sırasında parça kesitlerinde bir birinden bağımsız kaç ayrı sıcak bölge oluştuğu araştırılarak bu sıcak bölgelerden bazıları soğutucu uygulaması ile yok edilebiliyorsa sadece kalan diğerlerine en yakın noktalardan besleyici bağlantısı yapılır. Besleyicilerin boyutlandırılmasında modül kriteri (3 no’lu eşitlik) ve hacim kriteri (6 no’lu eşitlik) ayrı ayrı sağlanmalıdır. Gerekli besleyici boyutu bu bağıntılardan hangisinde daha büyük görünüyorsa o bağıntıdan elde edilen boyutlar kullanılmalıdır. Bu şekilde ancak yönlenmiş bir katılma ve boşluksuz bir döküm parça üretimi için gerekli koşullar sağlanmış olabilir [8].

Bu çalışmada büyük kütleli bir çelik dökümün kalıp tasarımında yukarıda detaylandırılan klasik ve bilgisa-

yar destekli mühendislik tekniklerinin uygulanması ve bunlara göre üretilen dökümlerin kalitesi karşılaştırılmıştır.

2.2. Kalıplama ve Dökümlerin Yapılışı (Molding and Casting of the Part)

Bu çalışmaya konu olan döküm parça işlenmemiş hali ile 2900 kg ağırlığına sahip paslanmaz Gx5CrNi134 (CA6NM) çelikten endüstriyel koşullarda üretilen ve hidroelektrik santrallerinde türbin ile jeneratör arasındaki bağlantıyı sağlayan bir mildir. Alaşımın kimyasal analizi Foundry Master tip spektrometre ile yapılmış ve sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir. Döküm parçanın model ölçüleri ile döküm sonrası ve işlenmiş hali sırası ile Şekil 1. a, b ve c’ de gösterilmiştir. Parça önce firmanın kendi teknik alt yapısında kullanılan gelen klasik mühendislik bilgi ve tecrübeleri ile tasarlanmış ve buna göre dökülmüştür. Döküm sonrası kabaca işlenen parça üzerinde ultrason ile yapılan testlerde parça iç bölgelerinde boşluk olabileceği yönünde hata sinyalleri (pik) alınmıştır. Bunun üzerine parçanın model ölçüleri, döküm tasarımı ve malzeme özellikleri yazara iletilerek bilgisayar modellemeleri ve döküm simülasyonu teknikleri ile firmada yapılan bu dökümün analiz edilmesi ve eldeki tasarımın gerekirse revize edilmesi istenmiştir.

2.2.a. Klasik Mühendislik Teknikleri ile Döküm Tasarımının Yapılışı (Casting Design Under Classical Engineering Conditions)

Şekil 1’den görüldüğü gibi parça basit iki farklı çapa sahip silindirden oluşmaktadır ve doğal olarak model büyük çaplı silindir üste gelecek şekilde kalıplanır. Bu durumda altta 425 mm çapında bir silindir ve onun üzerinde 806 mm çapında diğer silindir bulunur.

Tablo1. Döküm alaşımının kimyasal bileşimi. (Chemical composition of the casting material)

Element	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S
Ağırlıkça (%)	0,05	13,0	4,0	0,8	1,3	0,034	0,03

Tablo 2. Döküm kesitleri ve besleyici için hesaplanan modül ve hacim değerleri (Modulus and volumetric feeding values calculated for casting and riser)

Hesaplanan döküm geometrisi	Hacim (V) (cm ³)	Soğuma yüzey alanı (cm ²)	Modül (V/A) (cm)
D ₁ =806 mm çaplı silindir	272831	15586 (Alt yüzeyin ve besleyici ile temas eden üst yüzeyin %80'i izotermal kabul edilmiştir).	17,5
D ₂ =425 mm çaplı silindir	82948	9224 (üst yüzey izotermal kabul edilmiştir)	9,0
Silindirik besleyici için gerekli olan hacim ve modül	204623 (Eşitlik 6'dan $\phi = \%14$ ve $\alpha = \%6$ alınarak)	-----	21,0 (Eşitlik 3' ten $k=1,2$ alınarak)

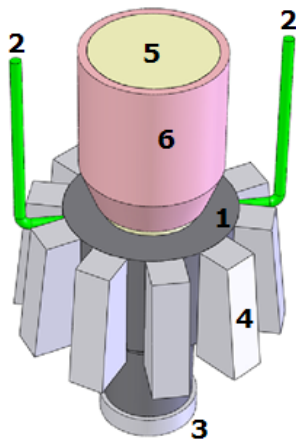
Büyük silindirin üzerine yeterli modül ve hacme sahip bir silindirik besleyici yerleştirildiğinde parçanın katılaşması doğal olarak aşağıdan yukarıya doğru sırası ile önce küçük çaplı silindir sonra büyük çaplı silindir ve en son besleyici şeklinde olur ve bu şekilde etkin bir besleme sağlanabilir. Eşitlik 2 ye göre parça ve besleyici modül hesaplamaları ve Eşitlik 6' ya göre de besleyici hacim hesaplamaları yapılarak elde edilen değerler Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2'ye bakıldığında döküm parçayı oluşturan küçük çaplı silindirin 9 cm modüle, büyük çaplı silindirin ise 17,5 cm modüle sahip oldukları görülmektedir. Bu durumda parça üstteki büyük silindir üzerine yerleştirilecek en az (17,5cm x 1,2) 21,0 cm modüle ve en az 204623 cm³ hacme sahip bir besleyici ile beslenmesi durumunda doğru bir şekilde beslenmiş olur. Bu şartları yerine getirecek bir silindirik besleyicinin boyutları aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

$M_b=21,0 \text{ cm} = V_b/A_b$ olduğundan ve besleyicinin döküme birleşen alt yüzeyi izotermal olduğundan $21,0 = (\pi r^2 h) / (\pi r^2 + 2\pi r h)$, (besleyicinin yükseklik/çap oranı $h=1,5D=3r$) alındığında; $21,0 \text{ cm} = (3/7)r$ ve $r =$

$49 \text{ cm} = 490 \text{ mm}$ ve $h=3r$ den $h=1470 \text{ mm}$ bulunmuştur. Bu boyutlardaki bir besleyicinin döküm parçanın D₁ çaplı silindirinden daha büyük bir çapa ve yüksekliğe sahip olduğu görülmektedir. Doğal olarak bu boyutlarda bir besleyici kullanımı yüksek metal sarfiyatı ve düşük verime yol açtığından maliyet açısından sakıncalıdır. Buna karşılık hacim kriteri formülüne göre yapılan hesaplama ile (bkz. Tablo 2) $V_b=204623 \text{ cm}^3$ lük bir besleyici hacmi gerektiği görülmektedir. Buna göre $V_b=204623 \text{ cm}^3 = \pi r^2 h$ bağıntısından (aynı şekilde yükseklik/çap oranı $h=1,5D=3r$ alınarak); gerekli besleyici boyutları $r=28,0 \text{ cm} = 280 \text{ mm}$ ve $h=3r$ den $h=840 \text{ mm}$ olarak hesaplandı.

Bu hesaplamalardan görüldüğü gibi modül kriterine göre gereken besleyici boyutları hacim gereksinimine göre hesaplanan besleyici boyutlarından yaklaşık 2 kat yüksektir. Bu yüzden besleme etkinleştiricilerin devreye sokulması ile dökümün mümkün olduğunca hacim gereksinimine göre hesaplanan boyutlarda besleyicilerle dökülerek yüksek verim sağlanabilmesi için döküm parçanın tabanına ve besleyicinin altına gelen büyük çaplı silindirin çevresine soğutucu bloklar yerleştirmek sureti ile döküm modülünün düşürülmesi açısından döküm Şekil 2'de görüldüğü



1 Döküm parça, (ağırlık = 2900 kg)

2- Yolluk gidicisi, (Toplam doldurma debisi =50 kg/sn iki adet = 100 kg/sn)

3- GG20 soğutucu disk, 1 adet, temas yüzey alanı = 1420 cm², çap = 470 mm, h=105 mm, ağırlık 127 kg.

4-GG20 soğutucu blok, temas yüzey alanı=1046 cm², ortalama kalınlık 205 mm, yükseklik = 610 mm, ağırlık = 154 kg, Çevrede 10 adet (toplam 1540 kg).

5-Silindirik besleyici. Boğazın üstünde çap=600 mm boy=800 mm boğaz çapı=250 mm, boğaz yüksekliği=200 mm (toplam ağırlık= 2090 kg)

6-Isı yalıtıcı özelliğe sahip gömlek (ortalama kalınlık 35 mm).

Şekil 2. Klasik mühendislik yaklaşımı ile soğutucu ve besleyici izolasyonları kullanarak yapılan döküm tasarımı. (Casting design by classical engineering approach).

Tablo 3. Klasik yöntemde döküm kesitleri ve besleyicilerin soğutucu ve izolasyon kullanımı dikkate alınarak hesaplanan modül ve hacim değerleri (Calculated modulus and volume of the riser and casting with insulating and chill materials considered in classical method).

Hesaplanan döküm geometrisi	Hacim (V) (cm ³)	Soğuma yüzey alanı (cm ²)	Modül (V/A) (cm)
D ₁ =806 mm çaplı silindir	272831	26046 (Soğutucu ile temas eden yüzeyler 2 kat soğuma yüzey alanı olarak hesaplandı).	10,5
D ₂ =425 mm çaplı silindir	82948	10642 (Soğutucu ile temas eden yüzeyler 2 kat soğuma yüzey alanı olarak hesaplandı).	6,9
Silindirik besleyici için gerekli olan hacim ve modül	204623 (Eşitlik 6'dan $\varphi = \%14$ ve $\alpha = \%6$ alınarak)	-----	14,8 (Eşitlik 3' ten $k=1,2$ alınarak)

gibi tasarlandı. Şekil 2'de verilen tasarım için yapılan modül hesapları Tablo 3'te gösterilmiştir. Tablo 3'ten görüldüğü gibi dökümün alt tabanında ve üst silindirin etrafında soğutucu blok kullanımı ile D₁ ve D₂ silindirlerinin modülleri sırası ile 6,9 cm ve 10,5 cm'ye düşürülmüştür. Buna göre gerekli besleyici modülünün en az (10,5 cm x 1,2) 12,6 cm olduğu görülmektedir. Besleyici etrafına izolasyon özelliği olan gömlek konulması ile besleyici etkinliği 1,25 kat artmaktadır.

Bu durumda gerekli besleyici modülü aynı oranda (12,6 cm:1,25 = 10,1 cm) düşmektedir. Bu modüle sahip bir silindirik besleyicinin boyutları ise $M_b = 10,1 \text{ cm} = V_b/A_b$ olduğundan ve besleyicinin döküme temas eden alt yüzeyi izotermal olduğundan $10,1 = (\pi r^2 h / \pi r^2 + 2\pi r h)$, (besleyici yükseklik/çap oranı $h=1,5D=3r$) alındığında; $10,1 \text{ cm} = (3/7) r$ ve $r = 23,6 \text{ cm} = 236 \text{ mm}$ ve $h=3r$ den $h=708 \text{ mm}$ bulunmuştur. Bu sonuçlara göre besleyici boyutları minimum değerlerde olduğundan emniyet payı verilerek Şekil 2'de gösterilen kalıplama tasarımı ile parça dökülmüştür.

2.2.b. Bilgisayar Destekli Mühendislik Teknikleri İle Döküm Tasarımının Yapılışı (Casting Design by Computer Aided Engineering)

Dökümün bilgisayar destekli tasarımına bir CAD programı ile (SolidWorks) parçanın 1:1 ölçekli katı modeli çizilerek başlandı. Sonra üzerine yolluk, besleyici ve soğutucular katı model olarak eklendi. Oluşturulan döküm modeli CAD programından üç boyutlu bir döküm simülasyon programı olan SolidCast yazılımına aktarıldı. Simülasyon ortamında döküm modelini oluşturan malzemelerin özellikleri Tablo 4'te gösterilen değerlerde girilerek model çözüm için 6 mm kübik elementler ile toplam 3 500 000 element içeren düğüm noktalarına ayrıldı.

Elementlere ayrılmış döküm modeline simülasyon programı ile soğuma ve katılaştırma simülasyonu

uygulandı. Kullanılan simülasyon programı soğuma ve katılaştırma modellerini sonlu farklar yöntemi ile çözümlen ticari bir pakettir [9].

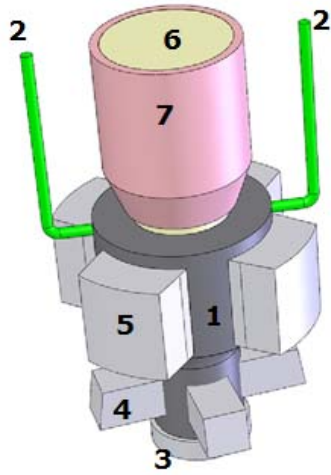
Simülasyon programının çalışma prensipleri ve döküm-kalıp sisteminde sonlu farklar yöntemi ile ısı transferine ilişkin detaylı bilgi sırası ile [9] ve [10] no'lu kaynaklardan görülebilir. Her bir simülasyonun tamamlanması ile simülasyon sonu analizleri yapılarak tasarımda revizyon gerekip gerekmediğine bakıldı. Soğutucuların boyut, adet ve yerlerinde bazı değişiklikler yapılarak CAD çizimleri ve simülasyon analizleri doğru ve etkili bir yönlü katılma ve hatasız bir döküm üretebilecek nihai tasarım elde edilinceye kadar tekrarlandı. Tekrarlı simülasyonlardan alınan sonuçlar ışığında Şekil 3'te gösterilen kalıplama tasarımı belirlendi ve bu tasarıma göre parça kalıplanarak ikinci kez döküldü.

3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada ortaya çıkan iki farklı tasarım ve bu tasarımlara göre yapılan dökümler sırası ile önce bilgisayar simülasyonu ortamında analiz edildi daha sonra gerçek dökümler üzerinde ultrason sinyal-yankı testleri ile elde edilen sonuçlar değerlendirildi.

Tablo 4. Döküm simülasyonunda kullanılan malzemelerin termo-fiziksel özellikleri (Thermal properties of materials which are used in casting simulation program)

Döküm modelindeki malzemenin cinsi	Isıl iletkenlik (W/m.K)	Özgül ısı J/kg.K	Yoğunluk kg/m ³	Başlangıç sıcaklığı (°C)
Gx5CrNi134	24,95	460,24	7752,71	1565,5
İzolasyon gömleği	0,35	836,80	480,54	26,6
GG20 Soğutucular	44,97	460,24	7200,00	26,6
Silis kumu	0,59	1075,28	1521,71	26,6



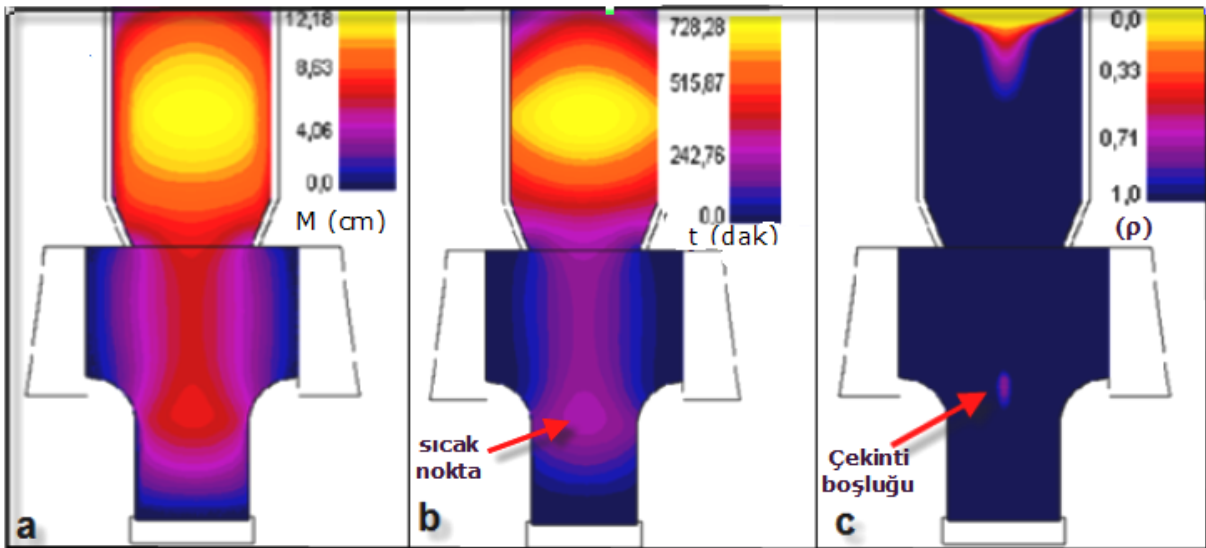
- 1-Döküm parça, (ağırlık = 2690 kg).
- 2-Yolluk gidicisi, (Toplam doldurma debisi = 50 kg/sn iki adet =100 kg/sn).
- 3- GG20 soğutucu disk, 1 adet, temas yüzey alanı = 1420 cm², çap = 470 mm, h=105 mm, ağırlık 127 kg.
- 4- Alt yan soğutucu blok, temas yüzey alanı = 418 cm², kalınlık 300 mm yükseklik 200 mm ağırlık = 86 kg çevrede 4 adet (toplam 344 kg)
- 5-GG20 soğutucu blok, temas yüzey alanı = 1993 cm², kalınlık = 200mm, yükseklik = 450 mm, ağırlık=281 kg, çevrede 4adet (toplam 1124 kg).
- 6-Silindirik besleyici. Boğazın üstünde çap=600 mm boy=600 mm boğaz çapı=250mm, boğaz yüksekliği=200 mm (toplam ağırlık= 2090 kg).
- 7-Isı yalıtıcı özelliğe sahip gömlek ortalama et kalınlığı 35 mm.

Şekil 3. Döküm simülasyonu ile tasarlanan döküm, soğutucu, besleyici ve izolasyon elemanlarının katı model görünüşü (View of 3D casting model including chills, riser and insulating material).

3.1. Klasik Mühendislik ve Bilgisayar Destekli Mühendislik Yöntemleri İle Yapılan Döküm Simülasyonu Sonuçlarının Karşılaştırılması (Comparison of the Simulation Results Obtained from Casting Design Made by Classical Engineering and Computer Aided Engineering Methods)

Şekil 4.a, b ve c’de klasik mühendislik yaklaşımı ile yapılan tasarımın bilgisayar simülasyonu ile yeniden analiz edilmesi ile elde edilen sonuçlar verilmiştir. Şekil 4 a’ da parçanın merkez kesit düzleminde modül dağılımı görülmektedir. Üst silindirik gövde çevresine dizilen 10 adet (toplam 1540 kg) soğutucu bloğun gövdenin merkezi boyunca ortalama modül sınırını yaklaşık 8 cm seviyesine düşürdüğü görülmektedir. Buna karşılık tabandaki 127 kg ağırlığındaki silindirik soğutucu bloğun alt silindirik bölgesinin sadece tabanında etkili olduğu ve üst bölgelerde etkili bir

soğutma yapmadığı buna bağlı olarak iki farklı kalınlıktaki silindirin birleşme bölgesinde sıcak nokta bırakacak şekilde yönlü katılaşmanın bozulduğu görülmektedir. Şekil 4.b’de aynı kesitte gösterilen katılaşma zamanı analizinde besleme yolunun sıcak noktanın katılaşma zamanından önce kapandığı ve sonuç olarak parça iç kesitinde Şekil 4.c’de ok ile gösterilen bölgede çekinti boşluğu riskinin oluştuğu görülmüştür. Bu tasarımda ortaya çıkan çekinti boşluğu riskinin en temel nedeni Bölüm 1.1’de değinilen besleme kriterlerinden birisi olan “besleme yolu kriterinin” sağlanamamasıdır. Bunun altında yatan teknolojik neden ise simülasyon ile belirlenen (gerçeğe yakın) modül değerlerinin (Şekil 4.a) Tablo 3’te verilen hesaplanmış (teorik) modül değerlerinden daha küçük olmasıdır. Örneğin çevresine 10 adet soğutucu blok yerleştirilen kalın silindirin hesaplanan



Şekil 4. Klasik mühendislik yaklaşımı ile tasarlanan döküme ait simülasyon sonu analiz sonuçları, a- parçanın merkez kesitinde oluşan modül dağılımı, b- parçanın katılaşma zamanı profili (dakika) c- merkez kesitinde çekinti boşluğu analizi (0 tam boş, 1 tam dolu, %100 yoğunluk). (Simulation and analysis results of molding design with classical engineering techniques. a- modulus distribution through the central section. b- solidification time profile of the casting (min.) c- feeding and material density analysis at the central section of the casting. 0 represents holes and empty spaces, 1 represents sound casting (%100 density).

modül değeri 10,5 cm iken (Tablo 3) simülasyon analizlerinde bu değer ortalama 8 cm seviyelerindedir (Şekil 4.a). Bunun en muhtemel nedeni klasik mühendislik yaklaşımında modül değerleri hesaplanırken soğutucuların etkisi sadece temas yüzey alanının iki katı oranında hesaba katılması buna karşılık soğutucu ağırlığı, soğutucu malzemesi ve soğutucu geometrilerinin bu hesaba bir şekilde dahil edilmemesidir. Soğutucu parametrelerinin döküm modülü hesaplamalarında net etkisi henüz tam olarak formüle edilemediğinden bu konunun ayrıca detaylı araştırılması gerekmektedir. Bu sonuca göre bu çalışmadakine benzer ve özellikle çok sayıda soğutucu kullanılması gereken büyük kütleli dökümlerde teorik hesaplamalara dayalı klasik mühendislik teknikleri ile yapılan kalıplama tasarımlarının önemli ölçüde hata riski taşıdığı söylenebilir.

3.2. Bilgisayar Destekli Mühendislik Yöntemi ile Yapılan Tasarım ve Dökümden Alınan Sonuçların Değerlendirmesi (Evaluation of the Design and the Casting Made by Computer Aided Engineering Method)

Bilgisayar destekli tasarım ile yapılan döküm simülasyonu analizleri Şekil 5.a, b ve c' de gösterilmiştir. Klasik yöntem ile yapılan tasarımdan farklı olarak bu tasarımda üst silindirin etrafında daha az ağırlıkta soğutucu kullanılarak besleme yolunun erken kapanmasının önlenmesi amaçlanmıştır. Buna ek olarak alt silindir çevresine toplam 344 kg ağırlığında 4 adet ek soğutucu konuşlandırılarak bir önceki tasarımda oluşan sıcak noktanın giderilmesi hedeflenmiştir. Şekil 5a'da simülasyon ile hesaplanan modül dağılımı görülmektedir. Alt kısımdaki silindirin etrafına soğutucu yerleştirilmesi bu bölgede parça modülünün 4-4,5 cm seviyelerine düşmesini sağlamıştır. Üsteki büyük çaplı silindirin iç kesimlerinde en yüksek modül seviyesi 7-8 cm ve besleyicide 12,2 cm seviyelerinde görülmektedir.

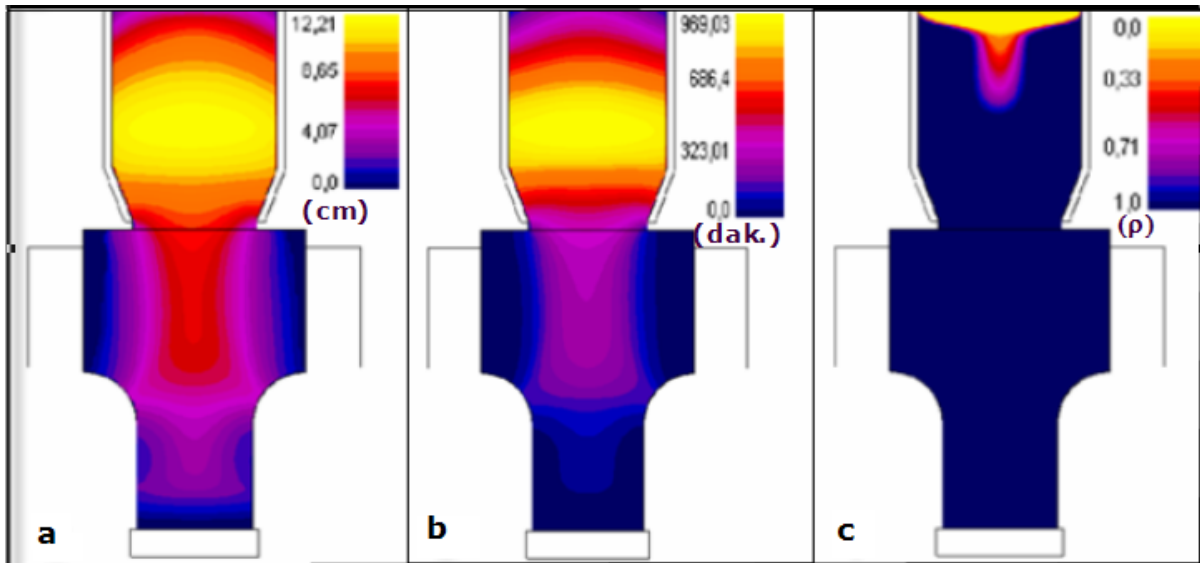
Böylece parça tabanından besleyiciye doğru etkili bir yönlü katılaşmanın sağlanabildiği görülmektedir.

Şekil 5.b'de verilen katılaşma zamanı analizi de bunu doğrulamakta ve katılaşmanın parça tabanından başlayarak besleyiciye doğru kesintisiz ilerlediğini ve besleyici merkezinde sonlandığını göstermektedir. Şekil 6.c'de verilen malzeme yoğunluğu (çekinti boşluğu) analizinde ise besleyici haricinde parça kesitlerinde her hangi bir çekme boşluğu riskinin oluşmadığı görülmektedir.

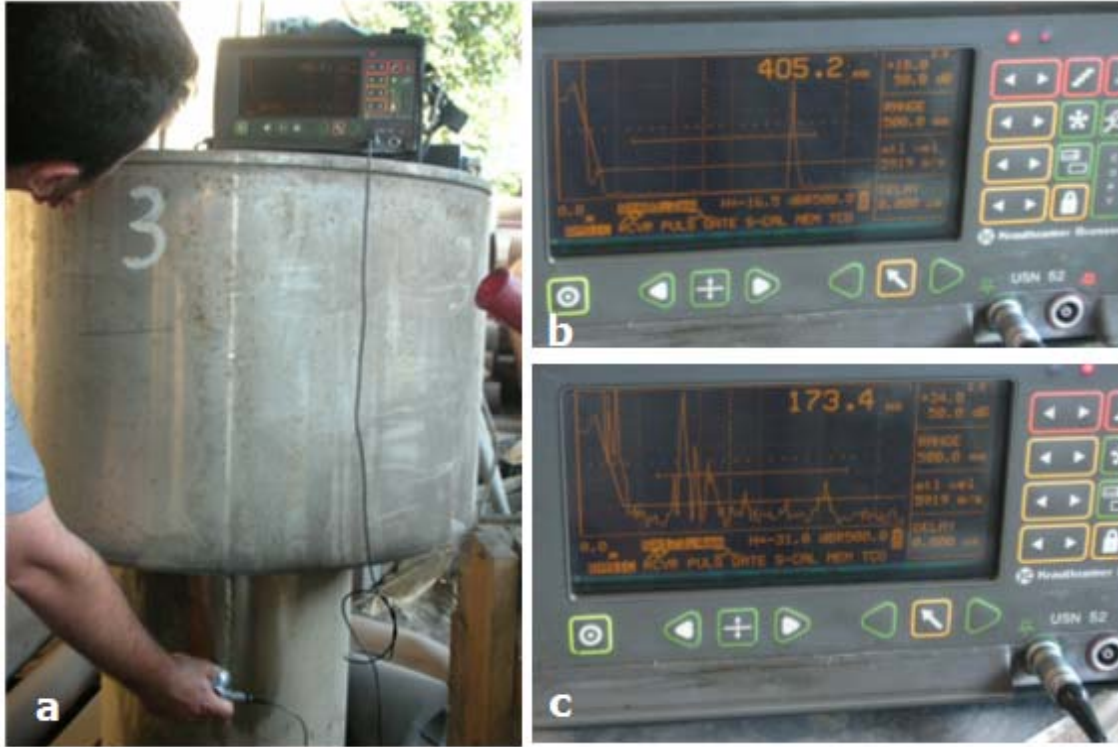
3.3. Gerçek Dökümler Üzerinde Ultrason Yöntemi ile Yapılan Boşluk Testleri Sonuçları (Ultrasonic Tests Results Obtained From Porosity Measurements on Real Castings)

Şekil 6.a'da klasik mühendislik tasarımı ile dökülen parçanın kaba işlenmiş hali görülmektedir. Hurdaya ayrılmış olan dökümün üzerinde bu çalışma için yeniden ultrason ile ölçümler yapılmıştır. Şekil 6.a'da görülen ultrason sinyal-yankı probu 405 mm çaplı alt silindirin orta kısımlarında gezdirildiğinde Şekil 6.b'de görüldüğü gibi silindirden sadece arka duvar yankısı alınmıştır (425 mm çaplı silindir % 2,3 oranında döküm çekmesi ve çaptan 10 mm kaba işleme pasosu ile 405 mm'ye düşmektedir). Arka duvar yankısından önce başka hata sinyali (pik) alınmaması dökümün bu bölgesinde her hangi bir iç boşluğun olmadığını ve göstermektedir. Prob iki silindirin birleşme bölgesine doğru (yukarıya) yaklaştırıldığında ise Şekil 6.c'deki ekran görüntüsünden de görüldüğü gibi 173 mm'den başlayarak merkez bölgelerinden hata sinyalleri (pik) vermektedir. Bunun anlamı o bölgede parça iç kesitlerinde çekinti boşluğu oluştuğudur.

Probtan çıkan ultrason sinyalleri parça iç kesitlerinde herhangi bir boşluk ile karşılaştığında bu boşluklardan geri dönmekte ve prob tarafından algılanmaktadır [11].



Şekil 5. Bilgisayar destekli tasarım ile yapılan döküm simülasyonu sonrası analizleri a- iç kesitte modül dağılımı, b-katılaşma zamanı profili (dak.) ve c-merkez kesitte çekinti boşluğu (yoğunluk) analizi (Analysis of simulation results obtained with computer aided casting design a- modulus distribution at the central section of casting b- solidification time profile (min.) and c- material density and feeding analysis at the central section of the casting).



Şekil 6. a- Kaba işlenmiş döküm parça üzerinde ultrason testlerinin sonuçları, b-yüzeyden 405 mm mesafeden alınan arka duvar yankı sinyalinin ekranda görünüşü, c-yüzeyden 173,4 mm mesafeden itibaren iç kesitteki boş alandan dönen piklerin ekranda görünüşü (a- Ultrasonic testing results after rough machining. b- display of backwall reflection signal from 405mm c- peaks from 173.4mm distance from the surface indicating porous area at the central region of the casting).

Şekil 6.c'deki ekran görüntüsünde yüzeyden 173,4 mm mesafeden alınan hata sinyalleri dökümün merkezi kısmında ($405 \text{ mm}/2 - 173,4 \text{ mm} = 29,1 \text{ mm}$) yarıçapında (yaklaşık 60 mm) çapında boşluklu bir bölgenin bulunduğu anlamına gelmektedir. Aynı döküm için sonradan yapılan simülasyon analizlerinde (bkz. Şekil 4.c) ortaya çıkan çekme boşluğu riski hem yer bakımından hem de boyut bakımından ultrason testlerinden alınan veriler ile mükemmel derecede bire bir uyumaktadır. Bu da bu çalışmada uygulanan bilgisayar simülasyonu tekniklerinin gerçek döküm şartlarını çok iyi derecede modelleyebildiğini göstermektedir.

Bilgisayar destekli tasarım ile yapılan döküm üzerinde de detaylı olarak dökümün tüm bölgeleri ultrason ile taranmasına rağmen sadece arka duvar yansımalarından başka iç kesitlerden herhangi yansıma piki alınmadı. Bu da bilgisayar destekli döküm tasarımı için yapılan simülasyon sonuçlarının da (Şekil 5) gerçek döküm ile bire bir uyumlu olduğunu göstermesi açısından önemlidir. Bu şekilde üretilen döküm ultrason testlerinden geçtiği için Şekil 1.c'de görüldüğü hali ile son işleme ve delik delme işlemlerinden geçirilerek kullanıma sunulmuştur.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

1. Bu çalışma bir çelik dökümde boşluksuz yapı elde edilebilmesi açısından yönlü katılaşmanın ve besleme kriterlerinin sağlanmasının önemli olduğunu göstermiştir.

2. Bu çalışmada kullanılan döküm simülasyonundan her iki döküm için alınan sonuçlar ile her iki gerçek döküm üzerinden alınan ultrason testleri verileri tam bir uyum göstermiştir. Bu sonuç kullanılan simülasyon tekniklerinin tutarlı olduğunu göstermesi açısından önemlidir.

3. Alınan sonuçlar bilgisayar destekli mühendislik yönteminde simülasyon tekniği sayesinde henüz tasarım aşamasında iken yapılacak dökümün yapısal olarak tüm yönleri ile görülebilmesini ve gerektiğinde tasarımcıya tekrar tasarım imkanı sağlayarak deneme yanılma maliyetlerini en aza indirebilmesi imkanını sağlayabileceğini göstermiştir.

4. Bu çalışmada olduğu gibi yüksek modül değerlerine sahip büyük kütleli çelik dökümlerde döküm veriminin yükseltilmesi açısından soğutucu ve diğer besleme etkinleştiricilerin kullanılması kaçınılmazdır. Bununla birlikte bu çalışmadan alınan sonuçlar teorik hesaplamaya dayalı klasik mühendislik yaklaşımlarının bu gibi dökümlerde yönlü katılaşmanın kontrolü açısından risk içerdiğini göstermiştir. Buna karşılık bilgisayar destekli mühendislik tekniklerinin doğru kullanıldığında bu risklerin ortadan kaldırılabilmesi açısından etkili bir çözüm olabileceği görülmüştür.

SEMBOLLER (LIST OF SYMBOLS)

A	Yüzey alan (cm^2)
D	Çap (mm)

h	Besleyici yüksekliği (mm)
J	Joule
k	Eşitlik sabiti (katsayı)
M	Modül (cm)
r	Yarı çap (mm)
t	Katılma zamanı (dakika)
V	Hacim (cm ³)
W	Watt
ε	Besleyici verimi (%)
π	Pi sayısı
φ	Alaşımın çekme oranı (%)

Alt indisler:

a	Ara bölge
b	Besleyici
d	Döküm
n	Besleyici boğazı

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazar bu çalışmanın firma içinde yapılmasına ve sonuçların yayınlanmasına izin veren Anadolu Döküm Sanayi A.Ş. Kocaeli Firmasına teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Campbell, J., **Castings**, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, England, 1991.
- Gwyn, M.A., "Cost-Effective Casting Design", **Engineered Casting Solutions**, Moderncasting, 1999.
- Kayıkcı, R., "Use of Computer Modelling in Predicting Microporosity in Commercial Aluminum Alloy", **The 66 World Foundry Congress**, İstanbul, 235-246, 2004.
- Kayıkcı, R. ve Akar, N., "Farklı Kesit Kalınlıklarına Sahip Büyük Hacimli Bir Çelik Dökümün Simülasyon Teknikleri ile Tasarlanması", **Politeknik Dergisi**, 10-4, 214-227, 2007.
- Wlodower, R., **Directional Solidification of Steel Casting**, Pergamon Press, Oxford, 1966. (Çeviren: Yaman, M., **Çelik Dökümlerde Besleyici ve Soğutucu Hesapları**, TMMOB Metalurji Müh.Odası, 1985.
- Chvorinov, N., "Theory of Solidification of Castings", **Giesserei**, 27, 177- 225, 1940.
- Guleyupoglu, S., "Casting Process Design Guidelines", **AFS Transactions**, 83, 869-876, 1997.
- Campbell, J., **Castings Practice**, Elsevier, London, 2004.
- SolidCast, <http://www.finitesolutions.com>.
- Şahin, H.M., Kocatepe, K., Kayıkcı, R. and Akar, N., "Determination of Unidirectional Heat Transfer Coefficient during Unsteady State Solidification at Metal Chill Interface", **Energy Conversion and Management**, 47, 19-34, 2006.
- Krautkramer, J. ve Krautkramer, H., **Ultrasonic Testing of Materials**, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1990.