

# Farklı Kesit Kalınlıklarına Sahip Büyük Hacimli Bir Çelik Dökümün Simülasyon Teknikleri ile Tasarlanması

\*Ramazan KAYIKCI, \*\*Neşet AKAR

\* Sakarya Üniversitesi , Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü,  
SAKARYA

\*\* Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü,  
06500 Teknikokullar, ANKARA

## ÖZET

Döküm yöntemi ile parça üretiminde yolluk ve besleyicilerin tasarımı kritik öneme sahip bir konudur. Özellikle yeniden tasarım ve döküm pratiklerinin yüksek maliyet içerdiği büyük tonajlı çelik dökümlerde bu konu çok daha fazla bir öneme sahiptir. Son yıllarda bilgisayar destekli mühendislik (BDM) uygulamalarının dökümhanelerde yaygınlaşması ile döküm tasarımlarının bilgisayar simülasyonlarına dayalı yapılmasına imkan sağlamıştır. Bu teknolojiler döküm tasarımlarının bilgisayar ortamında optimize edilerek dökümhane ortamında deneme yanılma pratiklerini en aza indirmektedir.

Bu çalışmada farklı kesit kalınlıkları içeren brüt 3300 Kg ağırlığa sahip bir çelik döküm parçanın bilgisayar simülasyonu teknikleri ile tasarlanması, dökülmesi ve katılaştırma süreçleri incelenmiştir. Geometrik yapısı itibarı ile endüstriyel ortamda klasik mühendislik tasarımları ile ilk defada sağlam olarak dökümünün oldukça zor olduğu bir parça seçilmiş, tasarlanmış ve dökülmüştür. Dökümden sonra parça üzerinde ultrasonik sinyal yankı (pulse-echo) tekniği ile yapılan muayeneler parçanın makro ve mikro gözeneklilik açısından kusursuz katılaştığını göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çelik döküm, besleyici tasarımı, böküm simülasyonu, katılma

## Casting Design of a Large Steel Part Consisting Various Section Thickness Using Simulation Techniques

### ABSTRACT

The design of rigging system is critically important in the manufacture of cast components. Especially in large steel castings, where redesign and recast practices entail huge expenses, this task gains even extra importance. In recent years, use of computer aided engineering (CAE) in foundries has opened the way to design castings based on computer simulations. Computer technology enables to optimize casting designs on the computer screens thus reducing the try and error practices in the foundry environment.

In the present work, using computer simulation the casting design and solidification processes of a steel part, weighted brut 3300 kg, and consisting different section thickness is investigated. The geometry of the cast part was so chosen that it would be difficult to achieve a sound casting when it has been cast first time in a foundry under classical engineering casting design. After casting evaluation of the cast part by an ultrasonic pulse echo technique showed that the sections of the cast part solidified free from macro and micro defects.

**Keywords:** Steel casting, riser design, casting simulation, solidification

### 1.GİRİŞ

Sıvı metal ve alaşımların şekillendirilmesi olarak da tanımlanabilen döküm yöntemi ile parça üretimi çok aşamalı bir süreçtir. Bu süreçlerin ilki parçanın kendi geometrisini ve gerekli mühendislik özelliklerini sağlayacak alaşımı tasarlamaktır. İkinci aşama, sıvı döküm alaşımının kalıp boşluğuna düzgün ve tam bir şekilde doldurulabilmesini ve katılma sırasında boşluksuz bir döküm elde edilmesini sağlayan yolluk ve besleyici sisteminin tasarlanmasıdır. Parçanın yolluk ve

besleyicileri ile bütünleştirilmiş olan tasarım kısaca döküm tasarımı olarak tanımlanmaktadır. İdeal bir döküm tasarımında uyulması gereken en önemli iki kriter, dökümün kalitesi (mikro ve makro yapısının tamlığı) ve dökümün verimi (parça ağırlığı/toplam döküm ağırlığı) dir (1,2). Bu kriterler dökümhane üretim sorumlularını en az metal kullanımı ile en yüksek kalitede döküm parça (minimum yolluk ve besleyici ağırlığı ile) üretmeye zorlamaktadır.

Döküm parça kalitesinin kontrolü o dökümde katılmanın kontrolü ile doğrudan ilgilidir. Katılmanın kontrolünde amaç, genellikle döküm kesitlerinde yönlenmiş kesintisiz ilerleyen katılmanın sağlanmasıdır. Bu sayede katılma sırasında katı-sıvı arayüzeyi sürekli besleyici veya besleyicilere doğru ilerleyerek döküm kesitlerinde izole olmuş sıcak nokta bırakmayacaktır. Bir dökümde sıcak nokta ancak ve sadece besleyicilerin üzerinde oluşmalıdır. Bu kriter yönlü katılma kriteri olarak bilinmekte ve bu kriterin sağlanması döküm parçanın yolluk, besleyici ve diğer besleme etkinleştirici elemanların tasarımı ile doğrudan ilgilidir.

Bu çalışmanın amacı, farklı kesit kalınlıklarına sahip büyük hacimli bir çelik döküm parçanın döküm tasarımında simülasyon tekniklerinin etkili kullanılmasını incelemektir.

## 2. ÇELİK DÖKÜMLERDE BESLEYİCİ VE BESLEME ETKİNLEŞTİRİCİ ELEMANLARIN TASARIMI

Büyük hacimli çelik dökümlerde yolluk sistemi genellikle birden fazla düşey gidici ile dökümü istenen sürede doldurmak üzere tasarlanır. Yolluk sisteminin kendi ağırlığı bu tür dökümlerde önemli bir verim kaybına neden olmadığından fazla üzerinde durulmaz. Bununla birlikte, yolluk bağlantılarının döküm parçanın üst kısımlarından ve besleyicilere yakın bölgelerden bağlanması yolluk ağızlarında sıcak nokta oluşturulmaması açısından önemlidir. Bu tür dökümlerde en kritik tasarım konusu besleyicilerin ve besleme etkinleştiricilerin tasarlanmasıdır. Besleyici tasarımı, karmaşık ve detaylı bilgi ve tecrübeler gerektirmekle birlikte, her hangi bir döküm parça için besleyici tasarımı aşağıdaki kriterlerin ışığı altında yapılmalıdır.

### 2.1. Sıcak Nokta Kriteri

Sıcak nokta kriteri, besleyici tasarımında, hem besleyici sayısının tespitinde hem de besleyici yerlerinin belirlenmesinde önemli bir yaklaşımdır. Bu kriterin doğru bir şekilde yerine getirilmesiyle, döküm parça içerisinde izole olmuş sıcak nokta kalmaması ve sıcak noktaların ancak besleyicilerin üzerinde oluşması sağlanabilir (3,4).

Besleyici tasarımı yapılırken önce döküm kesitleri içerisinde kaç adet izole olmuş sıcak nokta bulunduğunun belirlenmesi gerekir. İzole olmuş sıcak nokta, katılma sırasında etrafı katı metal (veya kabuk) ile sarılmış (hiçbir komşu sıvı bölge ile irtibatı olmayan) bir sıvı bölgesi olarak tanımlanabilir. Bir döküm farklı kesit kalınlıkları içeriyor ise döküm içerisinde birden fazla izole olmuş sıcak nokta oluşabilir ve her bir sıcak noktanın mümkün ise soğutucu kullanılarak soğutulması, değilse mutlaka besleyici ile beslenmesi gerekir. Bazen birbirine yakın birden fazla sıcak nokta tek bir besleyici ile de beslenebilir. Besleyiciler sıcak noktalara mümkün olduğunca en yakın mesafeye bağlanmalıdır.

Böylece besleme yolunun en kısa mesafeden geçmesi ve kapanma riskinin azaltılması sağlanır.

### 2.2. Katılma Zamanı (Modül) Kriteri

Etkili bir beslemenin yapılabilmesi için gerekli ilk koşul katılmanın besleyicilere doğru ilerlemesi ve besleyicilerde sonlanmasıdır. Bu tür bir katılma yönlü katılma olarak adlandırılabilir. Bu kriteri sağlayabilmek için besleyicilerin dökümün sıcak noktaları ile en azından aynı zamanda veya biraz daha geç katılması gerekir. Kuma dökümlerde, verilen bir kesitin katılma zamanı o kesitin hacmini yüzey alanına oranlayan Chvorinov (5) yaklaşımı ile hesaplanabilir. Buna göre;

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

Burada  $t$ , dakika cinsinden katılma süresi;  $k$  ise döküm alaşımı ve kalıp malzemesine göre değişen eşitlik sabitidir. Dökümhane uygulamalarında  $\left( \frac{V}{A} \right)$  faktörü, sıkça kullanılmakta ve genellikle cm cinsinden ifade edilen bu faktör olan “modül” (M) olarak adlandırılmaktadır. Döküm ve besleyicinin aynı alaşım olduğu ve her ikisinin de aynı kalıp malzemesi içerisinde bulunduğu göz önüne alındığında, yukarıda değinilen yönlü 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 genellikle 1,2 alınmaktadır.

### 2.3. Besleme Yolu Kriteri

Sıcak nokta ile besleyici arasında daima açık kalacak ve belirli bir ısı gradyanına sahip bir besleme yolu bulunmalıdır (6). Bu yol katılma süresince beslemeyi engelleyecek şekilde 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 boynu modülünü temsil etmektedir ve  $k_1 > k$  olmalıdır. Eğer besleyici dökümün

sıcak noktasına yüzeyden direkt bağlanamıyor ve sıcak nokta ile besleyici arasında belirli bir modüle ( $M_a$ ) sahip bir ara bölge mevcut ise bu durumda Eşitlik 4 aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

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

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

#### 2.4. Besleyici Hacmi Gereksinimi

Bazı istisnalar dışında, bütün döküm alaşımları soğuma ve katılaşma aşamalarında hacimsel olarak yaklaşık %2-7 oranında küçülürler. Hacimsel çekme olarak adlandırılan bu küçülme doğal olarak döküm parçaların en son katılaştıkları bölgelerinde (sıcak noktalarında) belirli bir boşluk oluşmasına neden olmaktadır. Besleyicilerin belirli bir besleme kapasiteleri vardır ve bu kapasite belirli bir hacim limiti ile sınırlanmaktadır[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 (7).

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

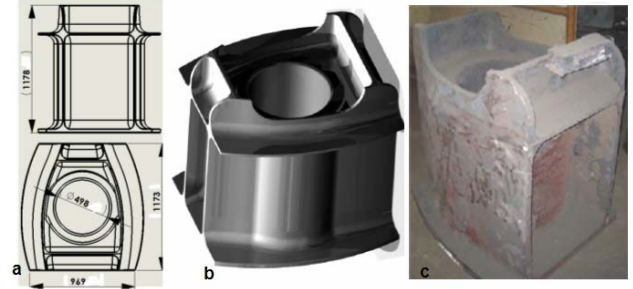
Burada  $V_b$  verilen bir döküm (veya birden fazla besleyici kullanıldığında belirli bir besleme bölgesi) için gerekli olan besleyici hacmidir.  $V_d$  tek bir besleyici kullanılacaksa döküm parçanın, birden fazla besleyici kullanılacaksa besleyici bağlanacak kısmın hacmidir.  $\alpha$  döküm alaşımının % hacimsel çekme oranıdır, örneğin bu oran çeliklerde yaklaşık %6'dır.  $\phi$  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 izolasyonu 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 saptanmalıdır. Bunun için katılaşma sırasında parça kesitlerinde birbirinden bağımsız kaç ayrı sıcak bölge oluştuğu araştırılmalıdır. Eğer bu sıcak bölgelerden bazıları soğutucu uygulaması ile elimine edilebiliyor ise sadece diğer sıcak bölgelere en yakın noktalardan besleyici bağlantısı yapılmalıdır. 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, yönlendirilmiş bir katılaşma ve boşluksuz bir döküm parça üretimi için gerekli koşullar sağlanmış olacaktır.

### 3. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmaya konu olan döküm parça, işlenmemiş hali ile 3300 Kg ağırlığına sahip standart ST 1020 çelik alaşımından endüstriyel koşullarda dökülen ve gemi inşa endüstrisinde kullanılmaktadır. Döküm parçanın teknik resmi, üç boyutlu katı modeli ve döküm sonrası fotoğrafı sırası ile Şekil 1.a, b ve c'de gösterilmiştir.



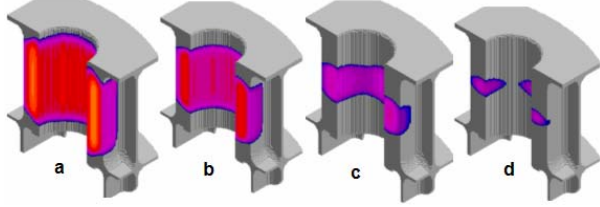
Şekil 1. Döküm parçanın; a) teknik resmi, b) üç boyutlu katı modeli ve c) döküm sonrası (işlenmemiş halinin) fotoğrafı.

Şekil 1.b'de verilen katı model parçanın, üç boyutlu döküm simülasyon programı olan SolidCast (8) simülasyon sistemi ile modellenerek, yolluk ve besleyicileri olmaksızın soğuma ve katılaşma analizleri yapılmıştır. Bu analizden alınan veriler doğrultusunda, döküm parça için gerekli besleyici tasarımı yapılmış ve parça simülasyon ortamında yolluklu ve besleyicili olarak dökülmüştür. Simülasyon sonrası analizler, parçanın bu tasarım ile sağlam (boşluksuz) olarak dökülebileceğini göstermiştir. Parçanın daha verimli dökülüp dökülemeyeceği konusunda eldeki tasarımda bir değişiklik yapılabilmesi için parça üzerine dış soğutucu bloklar yerleştirilerek, tekrar soğuma ve katılaşma simülasyonu yapılmış ve yeniden besleyici tasarımı yapılarak parça tekrar simülasyona alınmıştır. Elde edilen sonuçlar bu parçanın yeni tasarım ile daha yüksek verim altında dökülebileceğini gösterdiğinden, parça dökümhane ortamında bu tasarım ile kalıplanmış ve dökülmüştür. Aşağıda tüm bu süreçler ayrıntılı olarak ve sırasıyla açıklanmıştır.

#### 3.1. Soğuma ve Katılaşma Analizleri ile Parça Kesitlerine ait modüllerin ve sıcak noktaların belirlenmesi

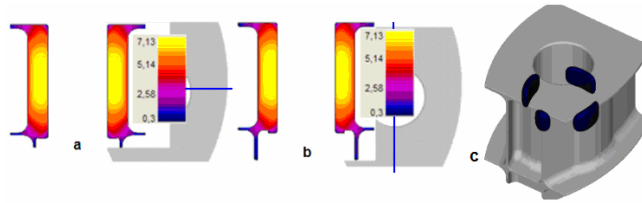
Katı model, önce Şekil 2'de gösterilen döküm pozisyonunda yolluk ve besleyici bağlanmadan simülasyon programına alınarak soğuma ve katılaşma analizleri yapıldı. Şekil 2 a-d'de simetri düzleminde kesilmiş olan parçanın %20 - %95 aralığında katılaşmasına ait görüntüler verilmiştir. Bu görüntülerden

parçanın doğal soğuma ve katılaşma eğilimi görülmektedir. Parçanın alt ve üst kısımlarında bulunan flanşlar ve yanlarda bulunan ince kanatlar soğutucu kanat etkisi yapmış ve bu kısımların daha hızlı ısı kaybederek kısa sürede katılaşmasına neden olmuştur.



Şekil 2. Yolluk ve besleyicisiz olarak simülasyonu yapılan parçanın doğal katılaşma eğiliminin takibi (gri bölgeler katılaşan alanları göstermektedir); a-%20 katı, b-%50 katı, c-%80 katı ve d-%95 katı.

Katılaşma seyri parçanın üst orta bölgelerinde 4 adet sıcak nokta bırakacak şekilde ilerlemiştir. Şekil 3.a ve b'de sırası ile parçanın merkezinden geçen (xz) ve (yz) düzlemlerinde oluşan modül dağılımı ve Şekil 3c'de parçanın bütünü üzerinde oluşan sıcak noktaların yerleri gösterilmektedir.



Şekil 3. Yolluk ve besleyicisiz olarak simülasyonu yapılan parçanın çizgi ile gösterilen kesit düzlemlerinde oluşan modül dağılımının analizi (cm); a) x-z kesit düzlemi, b) y-z kesit düzlemi, c) izometrik görünüşte parça üzerinde oluşan sıcak noktaların yerleri .

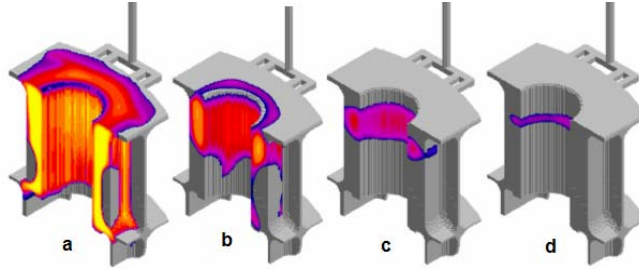
Şekil 3.a ve b'ye göre parça içerisinde oluşan modüllerin maksimum değeri 7,13 cm'dir. Parça geometrisi üzerinde düşey eksene paralel olarak duran 4 adet kanatçık hızlı soğutma etkisi yaratarak parçayı katılaşma sırasında dörde bölmekte ve 4 ayrı sıcak nokta bırakmaktadır. Bu durum Şekil 3.c'de net bir şekilde görülmektedir. Sıcak nokta kriterine göre parça bu 4 sıcak noktayı parçadan uzaklaştırmak üzere (muhtemelen 4 besleyici) ile beslenecek ve besleyicilerin her biri sıcak nokta modülü olan 7,13 cm den daha büyük bir modüle sahip olacaktır. Besleyici modülünün hesaplanması ve hesaplanan değerlere göre tasarlanan besleyici ve besleyici boynunun geometrisi Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1'deki tasarımdan görülebileceği gibi, besleyici ile parçanın sıcak noktaları arasında boyun ilave edilerek besleme yolunun etkili bir şekilde açık kalması sağlanmıştır. Ayrıca, besleyicilerin oturtulduğu üst flanşın soğutucu kanat etkisini zayıflatmak amacı ile flanş etrafına komple yatay gidici ve meme bağlantısı ilave edilmiştir. Bu şekilde doldurma sırasında flanşın ısıtılması ve besleyicilerin daha geç soğuması amaçlanmıştır. Tablo 1'de modül ve hacim kriterlerinin her ikisinin birden karşılanabildiği görülmektedir ve bu bakımdan mevcut besleyici tasarımı ile bu parçanın dökümü mümkün olabilir. Bununla birlikte, bir dökümün tasarlanmasında dökümün kalitesi güvenceye alındıktan sonra döküm verimi sorgulanmalıdır. Döküm verimi döküm parça ağırlığının toplam ağırlığa oranı ile bulunur. Mevcut tasarımda her birinin ağırlığı 1026 Kg olan 4 adet silindirik besleyici kullanıldığından döküm verimi =  $[(4 \times 1026) / ((4 \times 1026) + 3300)] \times 100 = \% 57,7$  dir. Çelik dökümlerde %50'nin üzerindeki verimler kabul edilebilirse de ortalama % 65 verim değerlerinde dökümler genellikle yapılabilmektedir (3). Simülasyon

Tablo 1. Tasarım için hesaplanan besleyici modül değerleri.

Besleyici Modül ve Hacim Değerlerinin Hesaplanması	Besleyici ve Boyun Tasarımı
<p>Sıcak noktaların modülü = <math>M_d = 7,13</math> (Bkz.Şekil 3.)            Sıcak nokta ve besleyici arasında kalan bölgede daire içindeki alanda kesit genişletilerek boyun verilmiştir. Boyun Modülü = <math>M_n = kM_d = 1,1 \times 7,13 = 8,44</math> cm ve;  <math>M_b = k_1 M_n &gt; k M_d</math>, <math>k_1 &gt; k</math> (Bkz.Eşitlik 4)  <math>K_1 = 1,15</math> alınarak,  <math>M_b = k_1 M_n = 1,15 \times 8,44</math> cm = 9,70 cm. bulunur.</p> <p>Buna göre yandaki şekilden de görülebileceği gibi etrafında yalıtıcı gömlek bulunan 30 cm çapında ve 60 cm yüksekliğinde 4 adet besleyici kullanılmıştır.            Her bir besleyicinin geometrik modülü = <math>V_b / A_b</math>' den  <math>V_b = [\pi(15)^2 \cdot 30] / [\pi(15)^2 + 2 \pi(15)(30)] = 7,8</math> cm. bulunur.</p> <p>Yalıtıcı gömlek besleyici geometrik modülünü 1,25 kat artırdığından gerçek besleyici modülü <math>M_b = 1,25 \times 7,8</math> cm = 9,75 cm dir. Dolayısı ile modül kriteri için gerekli besleyici modülü (9,70) karşılanmıştır.</p> <p>Hacim kriterini karşılayıp karşılamadığını bulmak için;            Eşitlik 6'daki <math>\alpha = 0,065</math> (%6,5) , <math>\varphi = 1,25 \times 0,14 = 0,175</math> (%17,5) ve <math>V_d = 139000</math> cm<sup>3</sup> alınarak hesaplandığında:  <math>V_b = 82137</math> cm<sup>3</sup> bulunur. Çapı 30 cm ve yüksekliği 60 cm olan 4 adet besleyicinin toplam hacmi ise ; <math>4 \times 84823</math> cm<sup>3</sup> olduğundan hacim gereksinimi de rahatça karşılanabilmektedir.</p>	<p>Simetri düzleminde kesilmiş model üzerinde besleyici tasarımının görünüşü. (<math>M_n</math> – Besleyici boyunu modülüdür)</p>

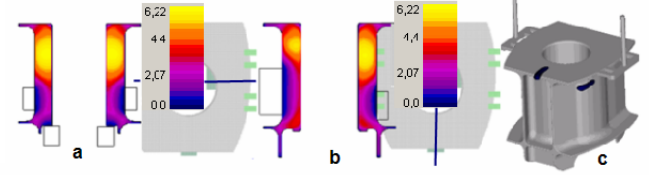
teknolojisi bilgisayar ortamında döküm verimini maksimize etmek için oldukça etkili bir teknolojidir (4,8-11). Bu yüzden, Tablo 1’de gösterilen tasarıma alternatif olarak daha yüksek verimli bir döküm tasarımı tercih edilmiştir. Bunun için çelik döküm parçanın alt kısımlarına uygun dökme demir soğutucu bloklar yerleştirilerek parça besleyicisi olarak simülasyona alınmış ve soğuma (modül) değerleri buna göre yeniden hesaplanmıştır. Şekil 4’de bu tasarım ile simülasyon ortamında modellenen parçanın katılma seyrinin değişik aşamalardaki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4. Yolluk bağlantıları ve dış soğutucu blokları yerleştirilmiş olarak simülasyonu yapılan parçanın doğal katılma eğiliminin takibi (gri bölgeler katılma alanları göstermektedir); a) %20 katı, b) %50 katı, c) %80 katı ve d) %95 katı.

Şekil 4’ten görüldüğü gibi, alt kısımlara yerleştirilen soğutucu bloklar sayesinde, parça alt kısımlardan daha hızlı soğumakta ve katılma üst kısımlara doğru daha etkili bir şekilde yönlenebilmektedir. Yeni tasarımdan alınan modül değerleri ve sıcak noktaların yerleri Şekil 5.a-c’de gösterilmiştir. Şekil 5.a ve b’den görüldüğü gibi, sıcak noktalarındaki modül değerleri 6,22 cm seviyesine düşerken sıcak noktaların

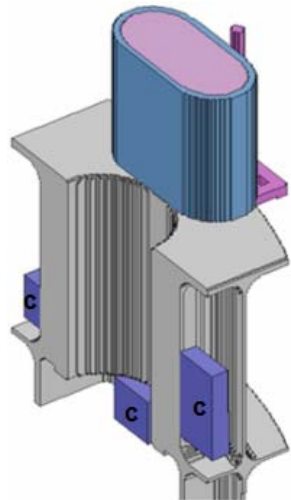
yerleri bir miktar daha üst yüzeye doğru yaklaşmıştır. Ayrıca, parça üzerinde oluşan izole olmuş sıcak nokta sayısı 4’den 2’ye düşmüştür. Bu durum, parçanın daha düşük modül değerine sahip sadece 2 adet besleyici kullanımı ile de dökülebileceğini göstermektedir.



Şekil 5. Yolluk bağlantısı yapılmış, alt ve alt yan kısımlarına soğutucu bloklar yerleştirilerek simülasyonu yapılan parçanın çizgi ile gösterilen kesit düzlemlerinde oluşan modül dağılımının analizi (cm); a) x-z kesit düzlemi, b) y-z kesit düzlemi, c) izometrik görünüşte parça üzerinde oluşan sıcak noktaların yerleri .

Şekil 5.a,b ve c’den görüldüğü gibi, 2. tasarımda, hem sıcak nokta sayısı azalmış hem de sıcak noktalar bir miktar daha parça üst yüzeyine doğru ötelenmiştir. Bu sayede hem daha az sayıda besleyici kullanılacak hem de besleyiciler ile sıcak noktalar arasındaki mesafe azaldığından ara bölgede (besleme yolu) boyun uygulamasına gerek kalmayacaktır. Şekil 5’te gösterilen analiz sonuçlarına göre yeniden yapılan besleyici tasarımına ait detaylar Tablo 2’de verilmiştir. Buradan görüldüğü gibi, bu 2. tasarımda sadece 2 adet besleyici kullanılmıştır. Besleyicilerin daha geniş bir alana etki edebilmesi için oval tip besleyiciler seçilmiş ve etrafları aynı şekilde yalıtıcı (izolasyon) gömlekleri ile sarılmıştır. Bu tasarımda üst flanşın sadece besleyicilerin altına gelen kısımlarını daha sıcak tutmak için yolluk ve meme bağlantıları yalnızca oval besleyicilerin altından yapılmıştır.

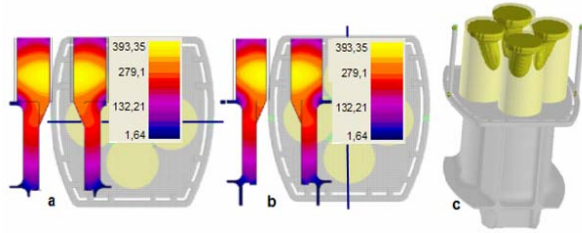
Tablo 2. Tasarım için hesaplanan besleyici modül değerleri.

Besleyici Modül Değerlerinin Hesaplanması	Besleyici ve Boyun Tasarımı
<p>Sıcak noktaların modülü = <math>M_d</math> alındığında;  <math>M_d = 6,22</math>  Yandaki şekilden görüldüğü gibi boyun uygulaması yapılmamıştır. Gerekli besleyici modülü Eşitlik 3’ ten;  <math>M_b = 1,2 M_d</math>  <math>M_b = 1,2 \times 6,22 = 7,46</math> cm bulunur.</p> <p>Buna göre yandaki şekilden de görülebileceği gibi etrafında yalıtıcı gömlek bulunan 15 cm yarı çapında ve 60 cm yüksekliğinde 2 adet oval besleyici kullanılmıştır.</p> <p>Her bir besleyicinin geometrik modülü = <math>V_b/V_a</math>’ dan <math>V_b = (67347 \text{ cm}^3)/(8659 \text{ cm}^2) = 7,8</math> cm bulunur. Yalıtıcı gömlek besleyici geometrik modülünü 1,25 kat artırdığından gerçek besleyici modülü <math>M_b = 1,25 \times 7,8 \text{ cm} = 9,75</math> cm dir. Dolayısı ile modül kriteri için gerekli besleyici modülü fazlası ile karşılanmıştır.</p> <p>Hacim kriterini karşılayıp karşılamadığını bulmak için; Eşitlik 6’daki <math>\alpha = 0,065</math> (%6,5) , <math>\varphi = 1,25 \times 0,14 = 0,175</math> (%17,5) ve <math>V_d = 139000 \text{ cm}^3</math> alınarak hesaplandığında; <math>V_b = 82137 \text{ cm}^3</math> bulunur. Yarı çapı 15 cm ve yüksekliği 60 cm olan 2 adet oval besleyicinin toplam hacmi ise ; <math>2 \times 96411 \text{ cm}^3</math> olduğundan hacim gereksinimi de çok rahatça karşılanabilmektedir.</p>	 <p>Simetri düzleminde kesilmiş model üzerinde besleyici tasarımının görünüşü. (Soğutucu bloklar C ile gösterilmiştir).</p>

Tablo 2’de gösterilen tasarımın döküm verimi şu şekilde hesaplanabilir. Her birinin ağırlığı 711 Kg olan 2 adet oval besleyici kullanıldığından döküm verimi =  $[(2 \times 711) / ((2 \times 711) + 3300)] \times 100 = \% 69,8$  dir.

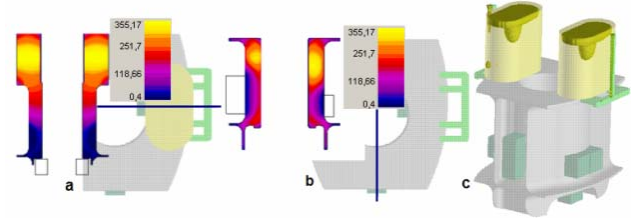
#### 4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, işlenmemiş ağırlığı 3300 Kg olan ve farklı kesit kalınlıklarına sahip bir ST 1020 çelik döküm parça için yapılan 2 farklı yolluk-besleyici tasarımı ele alınmış ve simülasyon teknolojisi ile yapılan tasarım süreçleri detaylandırılmıştır. 2. tasarıma göre daha yüksek döküm verimine sahip parça sentetik reçine bağlayıcılı kum ile kalıplanarak dökülmüştür. Şekil 6 ve Şekil 7’de çelik parça için yapılan iki farklı yolluk ve besleyici tasarımına ait simülasyon sonrası soğuma ve çekme analizleri gösterilmiştir.



Şekil 6. Tasarımda 4 adet silindirik besleyici ile simülasyonu yapılan parçanın çizgi ile gösterilen kesit düzlemlerinde oluşan katılma süresi dağılımının analizi; a) x-z kesit düzlemi, b) y-z kesit düzlemi c) izometrik görünüşte çekme boşluğu analizi.

Şekil 6.a ve b’de 4 adet silindirik besleyici ile yapılan simülasyon soğuma analizleri, dökümün besleyicileri ile birlikte toplam 393,35 dakikada katılaştığını göstermektedir. Katılma, parçanın alt kısımlarından başlayarak besleyicilerin bulunduğu üst kısımlara doğru yönelmiş ve aşamalı bir şekilde ilerlemiştir. Parçanın besleyiciler ile birleştiği üst yüzeyde bulunan flanşların ince kesit ve yüksek yüzey alanı içermesinden dolayı önemli ölçüde soğutucu kanat etkisi gösterdiği görülmektedir. Bu flanşların etrafına bağlanan yatay yolluk kanalı ve memelerin de soğutucu etkisini tamamen gideremediği görülmüştür. Buna karşılık, besleyicilerden parçanın sıcak noktalarına doğru verilen boyunlar sayesinde besleme yolunun açık kaldığı ve katılmanın herhangi bir kesintiye uğramadan besleyici merkezine doğru aşamalı bir şekilde ilerlediği görülmektedir. Bu durum besleyici ( $M_b$ ) ve besleyici boynu modülünün ( $M_n$ ) doğru hesaplandığını ve doğru uygulandığını göstermektedir. Şekil 6.c’de verilen çekme analizi sonucu bu dökümde olası çekmelerin yalnızca yolluk ve besleyicilerde gerçekleşeceğini ve dolayısı ile çelik döküm parçanın boşluksuz olarak dökülebileceğini teyit etmektedir.



Şekil 7. Yolluk ve besleyicileri ile simülasyonu yapılan parçanın çizgi ile gösterilen kesit düzlemlerinde oluşan katılma süresi dağılımının analizi; a) x-z kesit düzlemi, b) y-z kesit düzlemi c) izometrik görünüşte çekme boşluğu analizi.

Şekil 7.a ve b’de verilen soğuma analizi sonuçları soğutucu uygulanan ve 2 adet oval besleyici ile simülasyonu yapılan döküm parçanın toplam 355,17 dakikada katılacağını göstermektedir. Bu toplam katılma süresi, bir önceki tasarımda hesaplanan toplam katılma süresinden %10 oranında daha kısadır. Daha da önemlisi, soğutucu kullanımı ve daha az sayıda besleyici kullanımı döküm kesitlerinin 2. tasarımda 1. tasarıma göre yaklaşık 2-5 kat daha hızlı katılaştığını göstermektedir. Katılma süresinin kısalığı çelik dökümlerde ince tane oluşumu ve segregasyonların azaltılabilmesi açısından önemli bir avantaj sayılabilir. Şekil 7.a ve b’den görüleceği gibi, 2. tasarımda da katılma parçanın alt kısımlarından besleyicilere doğru daha etkili bir şekilde yönelmiş ve sonuçta besleyicilerde sonlanmıştır. Şekil 7.c’de gösterilen çekme analizi sonucu döküm parça üzerinde herhangi bir çekme boşluğu riski bulunmadığını teyit etmektedir.

Döküm verimi dikkate alındığında 2 adet oval besleyici ile yapılan tasarımın verimi (% 69,8) 4 adet silindirik besleyici ile yapılan tasarımın veriminden (%57,7) yaklaşık 1,21 kat daha yüksek bulunmuştur. Oval besleyicili tasarım ile döküm yapıldığında toplamda yaklaşık 2680 Kg daha az döküm metali kullanılacağı anlamına gelmektedir. Sonuç olarak parça 2. tasarıma göre kalıplanmış ve dökülmüştür. Döküm işleminden sonra oda sıcaklığına soğutulan ve yolluk ve besleyicileri kesilen parça üzerinde ultrasonik sinyal-yankı (pulse-echo) tekniği (12) ile yapılan muayenelerde herhangi bir çekme boşluğuna rastlanmamıştır.

#### 5. GENEL SONUÇLAR

İşlenmemiş ağırlığı 3300 Kg olan ve özellikle soğutucu kanat etkisi yaratan, farklı kesit kalınlıklarına sahip bir ST 1020 çelik döküm parça için yapılan 2 farklı yolluk-besleyici tasarımı ele alınmış ve simülasyon teknolojisi ile yapılan tasarım süreçleri detaylandırılmıştır. Daha yüksek döküm verimine sahip tasarıma göre parça sentetik reçine bağlayıcılı kum ile kalıplanarak dökülmüştür. Bu çalışmanın sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

1. Bir çelik dökümde; sıcak nokta, modül ve hacim gereksinimi gibi önemli tasarım kriterlerinin yerine getirilmesi o dökümde doğru bir yönlü ve aşamalı katılaşmanın sağlanmasında ve dökümün boşluksuz bir şekilde dökülebmesinde önemli rol oynamaktadır.
2. CAD teknikleri ile birlikte döküm simülasyonu teknolojisi soğuma ve katılaşma analizlerinin daha hızlı ve daha doğru yapılabilmesini sağlayarak hem besleme kriterlerinin sağlanmasında hem de döküm veriminin maksimize edilmesinde kullanılabilen etkili teknolojilerdir.
3. Bilgisayar destekli mühendislik, henüz tasarım aşamasında tüm yönleri ile sonuçların görülebmesini sağlamakta ve tasarımcıya bilgisayar ortamında tekrar tasarım imkanı sağlayarak deneme yanılma maliyetlerini en aza indirebilmektedir.

## 6. TEŞEKKÜR

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

## 7. KAYNAKLAR

1. Campbell, J., Castings, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, England, 1991.
2. Gwyn, M.A., Cost-Effective Casting Design: What Every Foundryman and Designer Should Know, Modern Casting, 88 (5), 32-36, 1998.
3. Wlodower, R., Directional Solidification of Steel Casting, Pergamon Press, Oxford, 1966 (Çev.Yaman, M., Çelik Dökümlerde Besleyici ve Soğutucu Hesapları, TMMOB Metalurji Müh.Odası, 1985.
4. Franssman, H., Hızlı ve Doğru Yolluk ve Besleyici Dizaynı için Döküm Simülasyon Programlarının Pratik Kullanımı, Metal Dünyası, 164, 30-31, 2007
5. Chvorinov, N., Theory of Solidification of Castings, Giesserei, 27, 177- 225, 1940.
6. Guleyupoglu, S., Casting Process Design Guidelines, AFS Transactions, 83, 869-876, 1997.
7. Campbell, J., Castings Practice, Elsevier, London, 2004.
8. SolidCast, <http://www.finitesolutions.com>.
9. Arda, İ., Kayıkcı, R., Döküm Simülasyonu Nedir? Ne Değildir?, Metal Dünyası, Sayı 154, 44-48, 2006
10. Süzen, F., Dökümhanelerde Bilgisayar Destekli Mühendislik, Metalurji, 20 (102), 45-47, 1996.
11. Ransing, R.S., Review of Optimization Methods for Casting Simulation, JOM, 56(11), 250-253, 2004.
12. Krautkramer, J. and Krautkramer, H., Ultrasonic Testing of Materials, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1990