

Birim Alan Yaklaşımına Göre Katılaşma İzotermelerinin Belirlenmesi ve Gerçek Döküm Koşulları ile Karşılaştırılması

Kamil Kunt TÜZÜNALP, Şemsettin ÖZDEMİR

ÖZET

Bu çalışmada farklı geometrilere sahip döküm şekilleri için gerçek katılaşma profilleri ile Birim Alan yaklaşımına göre elde edilen katılaşma izotermeleri karşılaştırılmıştır. Gerçek katılaşma profillerinin belirlenmesinde boşaltma döküm yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde Birim Alan yaklaşımına göre çizilen katılaşma izotermelerinin gerçek katılaşma davranışına oldukça yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Birim Alan yaklaşımında küp ve dikdörtgen prizma şekline sahip döküm parçalarda dış kenarlar ile dış köşeler arasındaki soğuma farkları, iki boyutlu döküm kesitleri ile üç boyutu temsil eden köşegen kesitler arasındaki soğuma farkları ve silindirik şekilli dökümler ile küp veya dikdörtgen prizma ile arasındaki farklar ortaya çıkarılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Birim Alan, Modelleme, Katılaşmanın Modellenmesi.

Determining Solidification Isotherms According to Unit Area Approach and Comparing the Results with Actual Solidification Behaviour

ABSTRACT

The present study compares the solidification isotherms obtained by the Unit Area Approach with the actual solidification profiles. Decanting method was used for obtaining actual solidification profiles. The results showed that, Unit Area based isotherms closely agreed with actual solidification behaviour. The solidification differences between side and external corner effects of cubes and rectangular prisms, solidification differences between two dimensional and three dimensional sections of cubes and rectangular prisms, and the solidification differences between cylinders and cubes-rectangular prisms are well expressed by the Unit Area based method.

Keywords: Unit Area, Modeling, Solidification Modeling

1. GİRİŞ

Sağlam döküm parça elde edilebilmesi büyük ölçüde yolluk ve besleyici tasarımlarının iyi yapılmasına bağlıdır. Bu tasarımlar küçük ve orta ölçekli dökümhane koşullarında deneme yanılma yöntemlerine bağlı olarak yapılmaktadır. Deneme dökümleri yapılması ve elde edilen sonuçlara göre tasarımın geliştirilmesi önemli maliyet artışına yol açmaktadır. Günümüzde nümerik çözümlere (1) ve ısı transfer hesaplamalarına (2) dayalı döküm simülasyon programları oldukça gelişmiş olanaklar sunmalarına rağmen, küçük ve orta ölçekli işletmeler için alım ve işletim maliyetleri oldukça yüksektir. Bu tip simülasyonlar için yüksek kapasiteli bilgisayarlara gerek duyulmaktadır. Simülasyonlar prog-

ramları yüksek üretim sayılarının söz konusu olduğu durumlarda avantaj sağlayabilmektedirler (3). Diğer yandan, daha düşük maliyet ve bilgisayar kapasitesi ile gerçekleştirilebilecek döküm simülasyonları için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda geometri prensiplerine göre döküm parçalarda katılaşma aşamalarını belirleyerek döküm tasarımlarının yapılabilmesine olanak sağlanması amaçlanmıştır.

Bu konudaki ilk çalışmalar Chvorinov (4) tarafından başlatılmıştır ve kum kalıplarda katılaşma zamanlarının belirlenebilmesinde aşağıdaki temel eşitlik kullanılmıştır.

$$t = k \cdot (V/A)^2 \quad (1)$$

Burada, t toplam katılaşma zamanını (dak.), V döküm hacmini (cm³), A döküm soğuma yüzey alanını (cm²), ve V/A ise Döküm Modülünü (cm) temsil etmektedir. Eşitlik 1'de yer alan k sabiti ise döküm koşullarına bağlı bir sabittir. Çeşitli araştırmacılar Chvorinov yaklaşımının farklı döküm şekilleri için katılaşma zamanı farklarını ortaya koyamadığını bildir-

Makale 17.01.2008 tarihinde gelmiş, 11.04.2008 tarihinde yayınlanmak üzere kabul edilmiştir.

K. K. TÜZÜNALP, Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, Döküm/Model Anabilim Dalı, 06500, Beşevler-Ankara tuzunalp@gazi.edu.tr

Ş. ÖZDEMİR, Alfa Döküm Ltd., Avar Cad No. 1, Org. San. Bölgesi, Sincan-Ankara, ozdemir@alfadokum.com.tr
Digital Object Identifier 10.2339/2008.11.2.161-168

miştir (5,6). Chvorinov'un yaklaşımı bir geometri tabanlı döküm simülasyonu modeli oluşturulabilmesi amacıyla geliştirilmiştir. Bu konudaki en belirgin çalışma Kotschi ve Plutshack (7) tarafından, döküm modülü prensibi bir döküm parçanın farklı kesitler üzerindeki iç ve dış köşelerine uygulanarak yapılmıştır. Ancak elde edilen katılma izotermine göre özellikle iç köşelerin hesaplanmadığı bildirilmiştir.

Neises ve arkadaşları tarafından geliştirilen ve "Geliştirilmiş Modül Yöntemi" olarak adlandırılan döküm modülüne dayalı geometrik modelleme yöntemi kare, dikdörtgen ve "T" kesitlere uygulanmıştır (8). Bu noktada oldukça olumlu sonuçlar alınmasına rağmen geliştirilmiş yöntemin silindir ve küre gibi farklı soğuma şartlarına sahip geometrik şekillere uygulanmamıştır. Dökümlerin katılma davranışlarının geometri tabanlı olarak modellenmesi amacıyla Özdemir (6,9) tarafından Chvorinov yaklaşımına alternatif bir yaklaşım öne sürülmüştür. Bu yeni model "Birim Alan" yaklaşımı olarak adlandırılmıştır. Birim Alan yaklaşımı oluşturulurken, tane büyümesi sonucu ısının döküm dışına aktarımı dikkate alındığı için hassas sonuçlar elde edildiği bildirilmiştir. Birim Alan yaklaşımı döküm modülü yönteminde olduğu gibi basit ampirik eşitliklere dayalıdır. Katılma zamanlarının belirlenmesinde (9) ve besleyici boyutlarının hesaplanmasında (6) döküm modülü yöntemine oranla daha hassas sonuçlar verdiği öne sürülmüştür. Birim Alan (BA) aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

Tablo 1. Birim Alan Yaklaşımına göre, katılma profillerinin hesaplanmasında kullanılan iki ve üç boyutlu formüller (9).

Üç Boyutlu Formüller	İki Boyutlu Formüller
$t = \frac{x \cdot y \cdot z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (3)$	$t = \frac{x \cdot y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (7)$
$x = \frac{\sqrt{y^2 + z^2}}{\sqrt{\left(\frac{y \cdot z}{t}\right)^2 - 1}} \quad (4)$	$x = \frac{\sqrt{y^2}}{\sqrt{\left(\frac{y}{t}\right)^2 - 1}} \quad (8)$
$y = \frac{\sqrt{x^2 + z^2}}{\sqrt{\left(\frac{x \cdot z}{t}\right)^2 - 1}} \quad (5)$	$y = \frac{\sqrt{x^2}}{\sqrt{\left(\frac{x}{t}\right)^2 - 1}} \quad (9)$
$z = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{\left(\frac{x \cdot y}{t}\right)^2 - 1}} \quad (6)$	

$$t = k \cdot (\text{BA}) \quad (2)$$

Burada t toplam katılma zamanı (oransal zaman birimi), k kalıp ve metal ile ilgili katsayı, BA ise dökümün Birim Alan değeridir (cm²). Yukarıda verilen eşitliğe göre Birim Alan yaklaşımı katılma zamanını

daha hassas ifade edebiliyor ise, katılma profillerinin tespitine uygulandığı zaman da önceki çalışmalara göre daha hassas sonuç vermesi beklenmelidir. Bu çalışmada temel döküm şekilleri için Birim Alan yaklaşımına göre hesaplanan katılma izotermi bilgisayar ortamında çizdirilerek sonuçların gerçek katılma davranışı ile yakınlığının incelenmesi amaçlanmıştır.

2. METOD

Birim alan yaklaşımına göre temel formüller ve çıkarılış yöntemleri önceki çalışmalarda verilmişti (6,9). Bu çalışmada ilgili formüller önceki çalışmalardan alınarak doğrulukları araştırılacaktır ve formüllerin elde edilmiş biçimi incelenmeyecektir. Küp veya dikdörtgen prizma şekline sahip dökümlerde, verilen bir zaman değeri için katılma metal kalınlığının hesaplanmasını sağlayan iki ve üç boyutlu eşitlikler Tablo 1'de verilmiştir. Buna göre, Eşitlik 3, üç boyutlu prizmatik dökümler için temel formüldür. Eşitlik 3, x, y ve z boyutları için çözüldüğünde sırasıyla Eşitlikler 4-6 elde edilir. Eşitlik 7 ise, prizmatik dökümlerden elde edilen iki boyutlu kesitler için temel formüldür. Eşitlik 7, x ve y boyutları için çözüldüğünde Eşitlik 8 ve 9 elde edilir. Bu çalışmada kalıp ve malzeme özellikleri ile farklı döküm koşulları arasındaki farklar dikkate alınmadığından, t oransal bir zamanı ifade eder ve gerçek zaman ile eşdeğer değildir. Bu formüller verilen bir oransal zaman değerine (t) göre katılma metal kalınlığını döküm parça veya kesitlerinde hesaplanmasını sağlamaktadır (9).

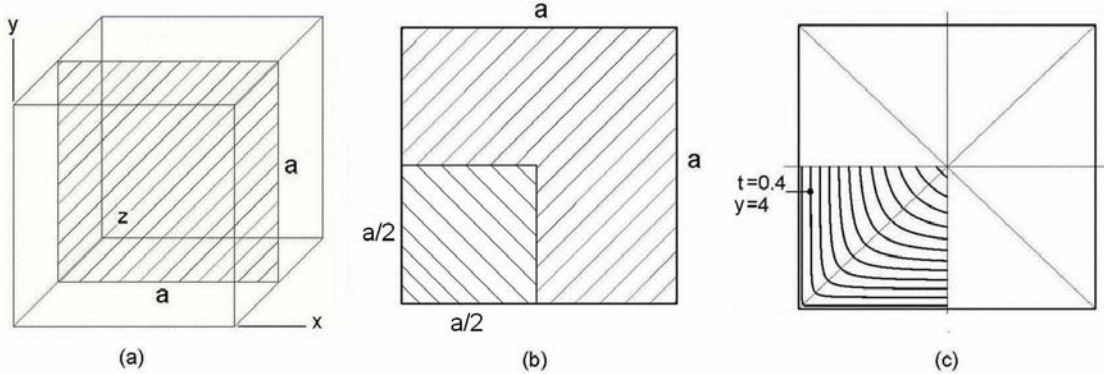
Şekil 1.a' da görüldüğü gibi boyutları $axaxa$ olan küp şeklindeki bir dökümün iki boyutlu kesiti alındığında, elde edilen boyutlar axa olacaktır (Şekil 1.b). Burada, katılma profillerinin pratik şekilde çizilebilmesi için kesitin bir dış köşesini temsil eden çeyrek bölümü dikkate alınabilir. Bu durumda, dikkate alınacak

boyutlar $a/2 \times a/2$ olacaktır (Şekil 1.b). Bu nedenle katılaşma profillerinin çizimi için Eşitlik 10 kullanılabilir.

$$t = \frac{(a/2) \cdot (a/2)}{\sqrt{(a/2)^2 + (a/2)^2}} \quad (10)$$

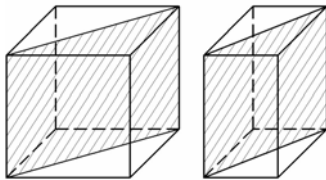
Bu eşitliğin gösterdiği gibi göre küp ve dikdörtgen prizma döküm şekilleri için katılaşma izotermi çizdirilirken Eşitlik 8 ve 9'da x ve y boyutlarının yarısı dikkate alınır.

Sonraki aşamada, verilen bir t değeri için Eşitlik 8 ve 9 kullanılarak katılaşma profili üzerindeki noktalar belirlenebilir (Şekil 1.c). Şekil üzerinde görüldüğü gibi, $t=0.4$ zaman değeri için Eşitlik 8 kullanılarak $y=4$ alındığında, $x=0.4$ değeri hesaplanabilir. Burada (0.4,4) koordinat değeri katılaşma profil eğrisi üzerindeki bir noktayı temsil etmektedir. Aynı eşitlikte farklı y değerleri verilerek diğer noktalar da hesaplanabilir.



Şekil 1. (a) Küp şekilli bir dökümün incelenmesi, (b) iki boyutlu analiz için kesitin alınması, (c) kesitin 1/4 parçası için katılaşma profillerinin çizilmesi.

Üç boyut söz konusu olduğunda Eşitlik 4,5 ve 6 kullanılmalıdır. Ancak üç boyutlu uzayda verilen t ve koordinat değerleri için çözülmesi gereken iki ayrı bilinmeyen bulunduğundan köşegen bir kesit alınması katılaşma izotermi çizdirilmesinde kolaylık sağlamaktadır (Şekil 2) ve köşegen kesit, parça içinde derinlemesine alındığı için üçüncü boyutu da temsil etmektedir.



Şekil 2. Küp ve dikdörtgen prizma şekilli dökümlerde köşegen kesitler.

Silindir şekilli dökümlerde verilen bir zaman değeri için Şekil 3'de görülen model kullanılarak katılaşan metal kalınlığının hesaplanmasını sağlayan temel eşitlik (9) aşağıda verilmiştir:

$$UA = t_p = \frac{x \cdot y}{\sqrt{1.232 \cdot x^2 + y^2}} \quad (11)$$

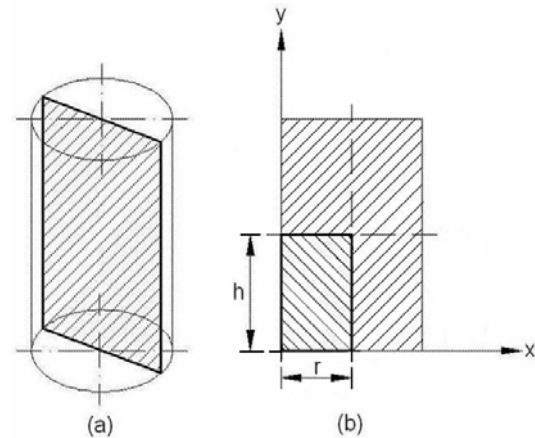
Küp ve dikdörtgen prizmalarda kullanılan yöntemle benzer şekilde silindire için Eşitlik 11, x ve y boyutları için çözüldüğünde Eşitlik 12 ve 13 elde edilir:

$$x = \frac{y^2}{\sqrt{\left(\frac{y}{t_p}\right)^2 - 1.232}} \quad (12)$$

$$y = \frac{\sqrt{1.232 \cdot x^2}}{\sqrt{\left(\frac{x}{t_p}\right)^2 - 1}} \quad (13)$$

Yukarıdaki eşitliklerde x ve y boyutları, silindirden alınan iki boyutlu kesitin bir çeyreği için r ve h olarak alınabilir. Burada r silindir yarıçapı, h ise silindir

yüksekliğinin yarısıdır (Şekil 3).



Şekil 3. Silindir şekilli bir dökümün (a) iki boyutlu analiz için kesitinin alınması ve (b) dikkate alınan boyutlar.

Yukarıdaki temel eşitlikler kullanılarak üç farklı döküm şekli ve her döküm şekli için iki farklı hacim dikkate alınarak iki ve üç boyutlu katılaşma izotermi bilgisayarla çizdirilmiştir. Kullanılan döküm boyutları Tablo 2'de ve aynı çizelgede verilen boyut ve

hacimlere göre çizilen iki ve üç boyutlu katılaşma izotermi ise Bölüm 4’de verilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Dökümlerde katılaşma işlemi dökümün kalıp duvarına temas eden yüzeyinden başlar. Bir sonraki

yakıtlı ertitme ocağında yaklaşık 800°C sıcaklığa çıkarıldıktan sonra bir grafit potaya alınarak sıcaklığı 725°C değerine gelinceye kadar beklendi ve önceden hazırlanmış kum kalıplara (Şekil 4) döküm yapıldı. Döküm sonrasında kabuk oluşumu izlendi. Kronometre ile kaydedilen bir sürenin sonunda katılaşmamış sıvı

Tablo 2 Katılaşma profillerinin çiziminde dikkate alınan döküm ölçüleri (10)

Şekil	1. Hacim = 1000 cm ³	2. Hacim = 1953 cm ³
Küp	10x10x10 cm	12.5x12.5x12.5 cm
Dikdörtgen Prizma	13x13x5.9 cm	15x15x8.66 cm
Silindir	10.8x10.8 cm	13.53x13.55 cm

adımda Katılaşma döküm merkezine doğru ilerler ve son katılaşacak bölge dökümün görünmeyen iç merkezinde oluşur. Bu nedenle katılaşma doğrudan gözlenemeyeceğinden aşamaları izlemek için boşaltma döküm veya sıcak safha fotoğraflaması teknikleri uygulanabilir. Bu çalışmada boşaltma döküm metodu uygulanabilirliği açısından tercih edildi. Boşaltma döküm yöntemi metalin bir bölümü katılaştıktan sonra kalan sıvının kalıp dışına boşaltılması prensibine dayalıdır (3,6,7,9,10,11). Sıvının boşaltılması ile katılaşma işlemi durdurulmakta ve geçen zaman içinde katılaşmış bölüm ve elde edilen katılaşma profili incelenebilmektedir.

Deneilerde ertitme kolaylığı ve boşaltma döküm yöntemi için uygunluğu açısından Tablo 3’de kompozisyonu verilen ticari saflıktaki alüminyum malzeme kullanılmıştır

Tablo 3 Boşaltma döküm deneylerinde kullanılan ticari saflıktaki alüminyumun kompozisyonu (10).

Element	Si	Fe	Cu	Zn	Ni	Ti	Al
%	0.162	0.343	0.039	0.032	0.010	0.020	99.36

Kompozisyonu verilen alüminyum malzeme sıvı

Tablo 4. Boşaltma döküm deneylerinde numunelere uygulanan boşaltma süreleri (10).

Model No	Şekil	Hacim (cm ³)	Boşaltma Süresi
1	Küp	1000	2:50
1	Küp	1000	6:26
1	Küp	1000	8:43
2	Küp	1953	5:07
2	Küp	1953	7:25
2	Küp	1953	8:33
3	Dikdörtgen Prizma	1000	3:46
3	Dikdörtgen Prizma	1000	5:26
3	Dikdörtgen Prizma	1000	6:45
4	Dikdörtgen Prizma	1953	5:05
4	Dikdörtgen Prizma	1953	5:40
4	Dikdörtgen Prizma	1953	8:30
5	Silindir	1000	3:07
5	Silindir	1000	5:50
5	Silindir	1000	6:11
6	Silindir	1953	6:00
6	Silindir	1953	7:31
6	Silindir	1953	8:45

metal kalıp ters çevrilerek dışarı boşaltıldı. Burada, kalıbın dolduğu an ile boşaltıldığı an arasında geçen süre dikkate alındı. Bu işlem Tablo 2’de verilen üç döküm şekli, her şeklin iki farklı hacmi ve her hacmin üç farklı boşaltma süresi için tekrarlandı.



Şekil 4. Boşaltma döküm deneylerinde kullanılan kum kalıplar (10).

Boşaltma döküm deneyleri sırasında farklı döküm şekil ve hacimlerine uygulanan boşaltma süreleri Tablo 4’de verilmiştir. Silindir dışında incelenen iki döküm şekli olan küp ve dikdörtgen prizma parçaların iki ve üç boyutlu inceleme için kesitleri alınmıştır. İki boyutlu inceleme amacıyla katılaşan dökümler dikey simetri eksenlerinden iki eşit parçaya ayrılarak ortaya çıkan profiller incelenmiştir. Üç boyutlu inceleme için ise dökümler üst köşegen üzerinden kesilmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

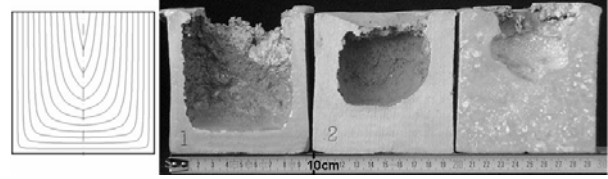
4.1. Küp ve Dikdörtgen Prizma Dökümlerin İki Boyutlu Katılma İzotermi

Boyutları Tablo 2’de verilen küp ve dikdörtgen prizma şekilli dökümler için Birim Alan yaklaşımına göre elde edilen iki boyutlu katılma izotermi ile boşaltma döküm yöntemi ile elde edilen katılma profilleri Şekil 5-8’de verilmiştir. Şekillerde Birim Alan yaklaşımına göre çizdirilen iki boyutlu katılma izotermi Eşitlik 8 ve 9’a göre koordinatlar hesaplanarak elde edilmiştir. Burada Bölüm 2’de anlatılan yöntemle göre ardışık zaman ve koordinat değerleri verilerek, her zaman değerine karşılık gelen katılma izotermi döküm dış yüzeylerinden merkezine doğru çizilmiştir. Elde edilen teorik katılma izotermi ile aynı boyutlara sahip boşaltma döküm kesitleri ise karşılaştırılmıştır. Burada katılma profili ile katılma izotermi arasındaki şekil uyumu incelenmiştir. Birim Alan yaklaşımına göre çizilen iki boyutlu katılma izotermi gerçekteki profillerin şekline benzer oldukları ve bu nedenle aralarında uyumun bulunduğu gözlenmiştir.

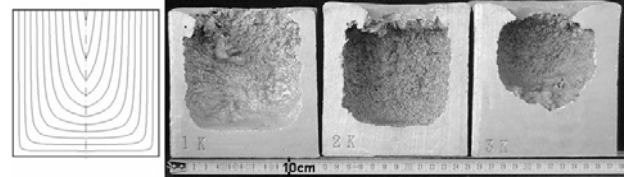
Birim Alan yaklaşımına göre elde edilen iki boyutlu katılma izotermi üst tarafı sonsuz kabul edilen dökümler için çizilmiştir. Boşaltma döküm sonuçlarında ise üst bölümden çevreye doğru taşınım ve çok az da olsa ışınım yoluyla ısı transfer olmuş ve bunun bir sonucu olarak döküm üst bölümünde bir miktar metal katılmıştır. Bu çalışmada katılmanın genel davranışı incelendiği için verilen farkın sonucu etkilemeyeceği düşünülmektedir.

Boşaltma döküm deneylerinde katılmanın döküm tabanından başlayarak ilerlemesi yan duvarlara oranla daha hızlı gerçekleşmiştir. Bu durum, katılma sırasında yan duvarların çekme sonucu kalıp yüzeyinden ayrılması nedeniyle arada hava boşluğu olduğundan (12) ısı transfer hızının tabana oranla yavaşlaması ile açıklanabilir. Birim Alan yaklaşımı ile elde edilen izotermi homojen soğuyan döküm şartlarına göre çizildiği için yukarıda verilen farklara duyarlı değildir. Ancak Bu konunun daha detaylı araştırılmasında yarar bulunmaktadır.

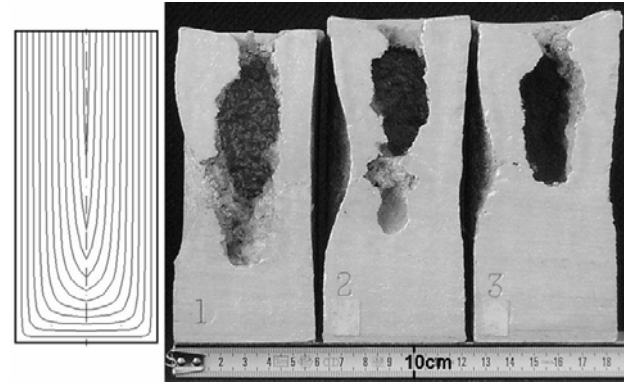
Katılma izotermi ile katılma profili karşılaştırıldığında döküm dış köşelerinde katılma metal kalınlığının kenarlara oranla daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni, kenarlarda tek yönlü ısı akışı ve köşelerde iki yönlü ısı akışının olmasıdır. Isı çıkışının iki yönlü olduğu köşe bölgelerinde daha hızlı ısı transferi oluşmaktadır. Diğer bir ifade ile, köşelerde birim hacimden çıkan ısı daha geniş bir alandan iletilmekte (13) ve bu nedenle katılma metal kalınlığı da fazla olmaktadır. Birim Alan’a göre çizilen katılma izotermi gerçekteki profillerin bu duruma duyarlı oldukları gözlenmiştir.



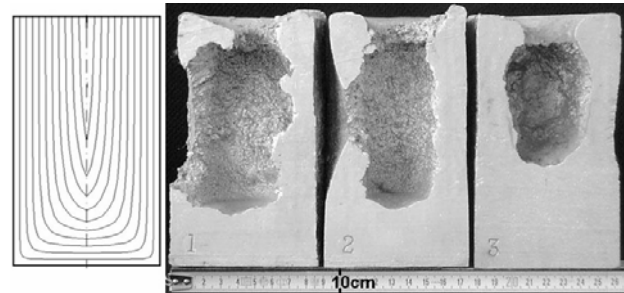
Şekil 5. 10x10x10 cm (1000 cm³) boyutlarında küp için iki boyutlu katılma izotermi ve katılma profilleri sonuçları.



Şekil 6. 12.5x12.5x12.5 cm (1953 cm³) boyutlarında küp için iki boyutlu katılma izotermi ve katılma profilleri sonuçları.



Şekil 7. 13x13x5.9 cm (1000 cm³) boyutlarında dikdörtgen prizma için iki boyutlu katılma izotermi ve katılma profilleri sonuçları.



Şekil 8. 15x15x8.66 cm (1953 cm³) boyutlarında dikdörtgen prizma için iki boyutlu katılma izotermi ve katılma profilleri sonuçları.

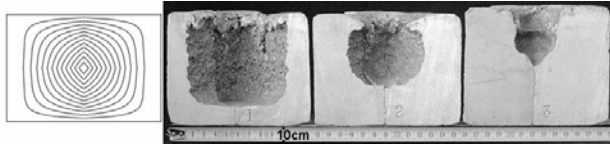
4.2. Küp ve Dikdörtgen Prizma Dökümlerin Üç Boyutlu Katılma İzotermi

Tablo 2’de boyutları verilen küp ve dikdörtgen prizma şekilli dökümler için Birim Alan yaklaşımına göre elde edilen üç boyutlu katılma izotermi ile boşaltma döküm yöntemi ile elde edilen katılma profilleri Şekil 9-12’de verilmiştir. Şekillerde Birim Alan yaklaşımına göre çizdirilen üç boyutlu katılma izotermi Eşitlik 4-6 VISUAL BASIC dilinde hazırlanan bir bilgisayar programı ile çözümlenmiştir.

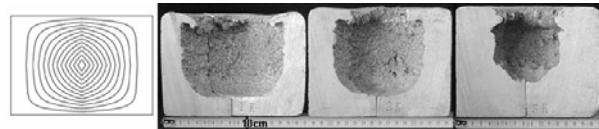
çizdirilmiştir. Burada ardışık zaman ve koordinat değerleri verilerek, her zaman değerine karşılık gelen katılma izotermi döküm dış yüzeylerinden merkezine doğru çizilmiştir. Verilen teorik katılma izotermi ile aynı ölçülere sahip köşegen boyunca kesilmiş boşaltma döküm kesitleri de karşılaştırma amacıyla eklenmiştir. Köşegen kesitin alınış amacı döküm parçasının derinlemesine giden bir kesiti üzerinde üç boyutu temsil eden katılma profillerinin elde edilebilmesidir. Bu durumda iki boyutlu kesitlere oranla köşegen kesit boyunca daha fazla uzamış profiller elde edilmesi beklenmelidir. Şekiller Bölüm 4.1’de verilen iki boyutlu sonuçlar ile karşılaştırıldığında bu durum Birim Alan yaklaşımına göre elde edilen katılma izotermi ve gerçek katılma profillerinde açıkça görülebilmektedir. Bu nedenle Birim Alan yaklaşımına göre çizilen üç boyutlu katılma izotermi ve gerçek profillerin şekline benzerlik gösterdikleri ve aralarında uyumun bulunduğu gözlenmiştir.

Boşaltma döküm deneylerinde taban ile yan duvarlar arasında kalınlık farkı bulunduğu, katılmanın tabandan daha hızlı ilerlediği gözlenmiştir. Bu durumun nedeni daha önce Bölüm 4.1’de açıklanmıştır. Birim Alan yaklaşımı ile elde edilen izotermi iki boyutlu döküm kesitlerinde olduğu gibi üç boyutlu kesitlerde de homojen soğuyan döküm şartlarına göre çizildiği için açıklanan ısı transfer farkına duyarlı değildir.

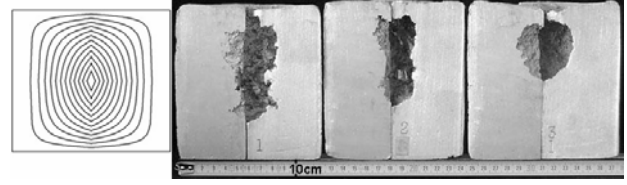
Üç boyutlu katılma izotermi ve profillerinde döküm dış köşelerinde katılma metal kalınlığının kenarlara oranla daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni, kenarlarda tek yönlü ısı akışı ve köşelerde iki yönlü ısı akışının olmasıdır. Üç boyutlu kesitlerde dış köşelerde katılma metal kalınlığı ise iki boyutlu kesitlerdekine oranla daha fazladır. Bu durum, dış köşelerde ısının iki boyutta iki yönden, üç boyutta ise üç yönden transfer edilmesi ile açıklanabilir. Birim Alan’a göre çizilen katılma izotermi ve bu duruma duyarlı oldukları gözlenmiştir.



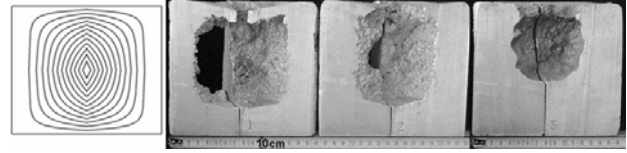
Şekil 9. 10x10x10 cm (1000 cm³) boyutlarında küp için üç boyutlu köşegen kesitte katılma izotermi ve katılma profilleri.



Şekil 10. 12.5x12.5x12.5 cm (1953 cm³) boyutlarında küp için üç boyutlu köşegen kesitte katılma izotermi ve katılma profilleri.



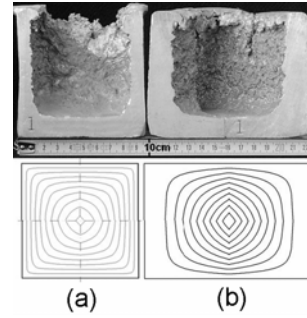
Şekil 11. 13x13x5.9 cm (1000 cm³) boyutlarında dikdörtgen prizma için üç boyutlu köşegen kesitte katılma izotermi ve katılma profilleri.



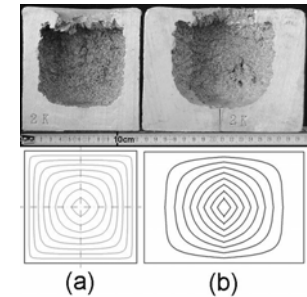
Şekil 12. 15x15x8.66 cm (1953 cm³) boyutlarında dikdörtgen prizma için üç boyutlu köşegen kesitte katılma izotermi ve katılma profilleri.

4.3. Küp ve Dikdörtgen Prizma Dökümlerinin İki ve Üç Boyutlu Katılma İzotermi ve Profillerinin Karşılaştırılması

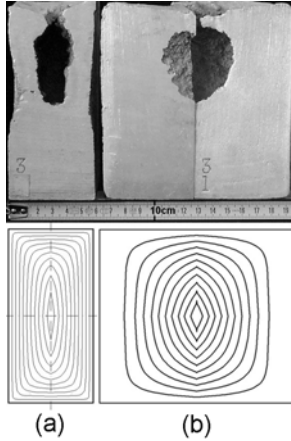
Tablo 2’de boyutları verilen küp ve dikdörtgen prizma şekilli dökümlerden seçilen parçalar için Birim Alan yaklaşımına göre elde edilen iki ve üç boyutlu katılma izotermi ve profilleri Şekil 13-16’da karşılaştırılmıştır. Burada bütün izotermi kapalı döküm parçalar için çizilmiştir. Şekiller incelendiğinde Bölüm 4.1 ve 4.2’de anlatılan iki ve üç boyutlu katılma şartlarının Birim Alan yaklaşımına göre çizilen katılma izotermi ve köşegen kesitte oluşan katılma davranışını ifade edebildiği görülmüştür.



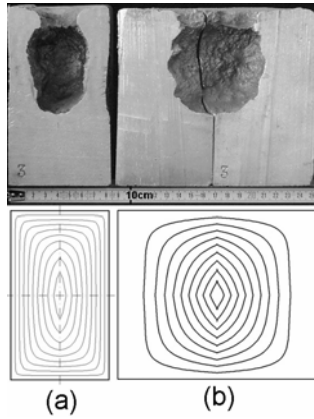
Şekil 13. 10x10x10 cm (1000 cm³) boyutlarında küp için (a) iki boyutlu ve (b) üç boyutlu katılma izotermi ve profillerinin karşılaştırılması.



Şekil 14. 12.5x12.5x12.5 cm (1953 cm³) boyutlarında küp için (a) iki boyutlu ve (b) üç boyutlu katılma izotermi ve profillerinin karşılaştırılması.



Şekil 15. 13x13x5.9 cm (1000 cm³) boyutlarında dikdörtgen prizma için (a) iki boyutlu ve (b) üç boyutlu katılaşma izotermi ve profillerinin karşılaştırılması.



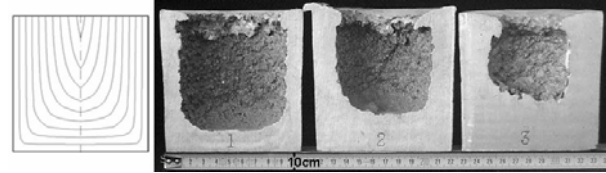
Şekil 16. 15x15x8.66 cm (1953 cm³) boyutlarında dikdörtgen prizma için (a) iki boyutlu ve (b) üç boyutlu katılaşma izotermi ve profillerinin karşılaştırılması.

4.4. Silindir

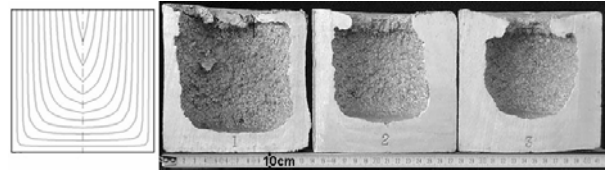
Tablo 2'de boyutları verilen silindir şekilli dökümler için Birim Alan yaklaşımına göre elde edilen katılaşma izotermi ile boşaltma döküm yöntemi ile elde edilen katılaşma profilleri Şekil 17-18'de verilmiştir. Şekillerde Birim Alan yaklaşımına göre çizdirilen katılaşma izotermi Eşitlik 12 ve 13'e göre koordinatlar hesaplanarak elde edilmiştir.

Silindir şekilli parçalarda kavisli dış yüzeyin, küp veya dikdörtgen prizmalardaki köşeli yüzeylere oranla daha yavaş soğumaya yol açtığı bilinmektedir. Küp veya dikdörtgen prizma şekilleri için Birim Alan yaklaşımına göre iki boyutlu katılaşma profillerinin çizimi için kullanılan eşitlikler ile silindir için kullanılan eşitlikler arasında katsayı farkları bulunmaktadır, Eşitlik 8,9 ile 12,13. Birim Alan yaklaşımına göre silindir şekli için kavisli dış yüzeyde daha yavaş ısı transferi nedeniyle katılaşma profillerinin daha yavaş ilerlemesi beklenmelidir. Şekil 19'da eşit boyuttaki küp ve silindir şekilli parçalar için katılaşma izotermi üst tarafı sonsuz döküm parça için üst üste çizdirilmiştir. Şekle göre parçanın dikey eksenini boyunca tabandan yukarı yönde ilerlediğinde küp ve silindir için elde edilen

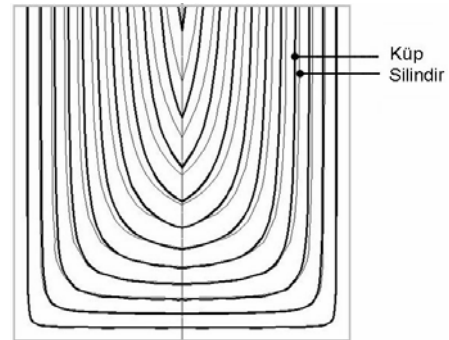
profillerin benzer oldukları görülebilir. Bu durum belirtilen yönde soğuma şartlarının eşit olduğunu göstermektedir. Diğer yönden, yan duvarlardan merkeze doğru silindir için elde edilen izotermi küp şekilli geometriye oranla daha geride kaldıkları ve katılaşma metal kalınlığının daha az olduğu izlenebilir. Bu nedenle Birim Alan yaklaşımının kavisli dış yüzeylerdeki yavaş ısı transfer farkına duyarlı olduğu sonucuna varılabilir. Bu durum daha önce Chvorinov prensibine dayalı modellerde (7,8) bulunmamaktadır.



Şekil 17. 10.8x10.8 cm (1000 cm³) silindir için katılaşma izotermi ve katılaşma profilleri sonuçları.



Şekil 18. 13.53x13.53 cm (1953 cm³) silindir için katılaşma izotermi ve katılaşma profilleri sonuçları.



Şekil 19. 12.5x12.5x12.5 cm küp ile 12.5x12.5 cm silindir için Birim Alan yaklaşımına göre çizilen iki boyutlu katılaşma izotermi karşılaştırılması.

Birim Alan yaklaşımına göre çizdirilen izotermi incelendiğinde, belirlenen döküm şekillerinde bütün kesitler için katılaşmanın döküm dış yüzeylerinden başlayarak merkeze doğru ilerlediği görülmektedir. Bu durum deneysel profillerin davranışı ile benzerlik göstermektedir.

5. SONUÇ

Temel şekillerin dökümünde Birim Alan yaklaşımı ve katılaşma deneyleri ile elde edilen katılaşma izotermi karşılaştırılarak aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur:

1. Birim Alan yaklaşımı ile küp, dikdörtgen prizma ve silindir şekilleri dökümü için ve aynı zamanda aynı döküm şeklinin farklı hacimleri için katılaşma profilleri döküm dış yüzeyinden merkeze doğru elde edilebilir.

2. Birim alan yaklaşımına dayalı katılaşma izotermelerinin iki ve üç boyutlu kesitlerde dış köşe etkisini doğru şekilde ifade edebildiği ortaya çıkarılmıştır.

3. Birim Alan yaklaşımı ile küp ve dikdörtgen prizma parçalar arasındaki ısı transfer farkı ifade edilebilmiştir.

4. Küp-dikdörtgen prizma parçalar ile silindirler arasındaki ısı transfer farkı ortaya konulmuştur.

5. Silindir şekilli dökümler için verilen Birim Alan yaklaşımına dayalı eşitlikler silindir taban yüzeyi ile kavisli yüzeyi arasındaki ısı transfer farkını ortaya çıkarmıştır.

6. KAYNAKLAR

1. N. Sirilertworakul, P.D. Webster, T.A. Dean, Computer Prediction of Location of Heat Centres in Castings, *Materials Science and Technology*, 9, 923-928, 1993.
2. Lewis, R.W., Huang, H.C., Usmani, A.S., Tadayon, M.R., Solidification in Castings by Finite Element Method, *Materials Science and Technology*, 6, 482-489, 1990.
3. M.H. Kim, C.R. Loper, Jr., C.S. Kang, Experimental Analysis of Wave Fronts in Standard Casting Sections and in Finned Castings, *AFS Transactions*, 73, 463-474, 1985.
4. N. Chvorinov, Theory of Solidification of Castings, *Die Giesserei*, 27, 17-224, 1940.
5. F.A. Brandt, H.F. Bishop, W.S. Pellini, Solidification of Various Metals in Sand and Chill Molds, *AFS Transactions*, 646-653, 1954.
6. S. Ozdemir, E. Atasoy, A New Approach to Feeder Dimensioning, *Cast Metals*, 8, 129-137, 1995.
7. R.M. Kotschi, L.A. Plutshack, An Easy and Inexpensive Technique to Study the Solidification of Castings in Three Dimensions, *AFS Transactions*, 117, 601-610, 1981.
8. S.J. Neises, J.J. Uicker, R.W. Heine, Geometric Modeling of Directional Solidification Based on Section Modulus, *AFS Transactions*, 61, 25-30, 1987.
9. Özdemir, Ş., Dökümlerde Besleyicilerin Ölçülendirilmesinde Yeni Bir Yaklaşım, Doktora, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, 1989.
10. Tüzüenalp, K.K., Katılaşmanın Üç Boyutlu Olarak İncelenmesi, Master, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, 1996.
11. Heine, R.W., Loper, C.R., Rosenthal, P.C., Principles of Metal Casting, Tata McGraw-Hill Publishing Co., Delhi, 1967.
12. Campbell, J, Castings, Solidification Dynamics, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, 1991.
13. Akar, N, Katılaşma Sırasında Döküm-Kalıp Ara Yüzeyinde Isı Transfer Katsayısının İncelenmesi, Doktora, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.