



Murat Çolak
İbrahim Arslan
Esmâ Gavgalı

Bayburt University, Bayburt-Turkey
mcolak@bayburt.edu.tr; ibrahimarslan@bayburt.edu.tr;
esmagavgalı@bayburt.edu.tr

DOI	http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2018.13.4.1A0419	
ORCID ID	-	-
CORRESPONDING AUTHOR	Esmâ Gavgalı	

GRİ DÖKME DEMİRLERİN KATILAŞMA MODELLEMESİ VE GERÇEK DÖKÜMLER İLE KARŞILAŞTIRMASI

ÖZ

Bu çalışmada; farklı kesit kalınlıkları içeren ve parça içinde çekme boşlukları oluşumuna müsaade edecek şekilde tasarlanan geometriye sahip modelden yapılan kum kalıplara gri dökme demir alaşımından dökümler yapılmıştır. Dökümhanedeki fiziksel şartlar ve döküm parametreleri birebir olarak döküm simülasyon programına girilerek SolidCast döküm simülasyon programıyla modellemeler yapılmıştır. Gerçek döküm numunelerinden alınan sonuçlarla döküm simülasyon programından alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmada, metal eritme, kuma döküm, modelleme, metalografi, mikro yapı görüntüleme teknikleri kullanılmıştır. Sonuçlar döküm simülasyon programında verileri doğru girilmesi sonrasında gerçek dökümlerle uyumlu olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Gri Dökme Demir, Döküm Simülasyonu,
Kum Döküm, Katılma Genleşmesi, SolidCast

SOLIDIFICATION SIMULATION OF GRAY CAST IRON AND COMPARISON WITH REAL CAST

ABSTRACT

In the study, gray cast iron experiments were performed using sand molds made from model with geometry designed in geometry to let expansion cavities form in the part. In foundry, models were realized by SolidCast simulation software using casting parameters and physical conditions one by one in the simulation. The results obtained from real casting samples and the ones of simulation were compared. Melting metal, sand casting, modeling, metallographic measurements, and microstructure techniques were employed in the study. It was observed that results of simulation had well-matched with ones obtained from real casting.

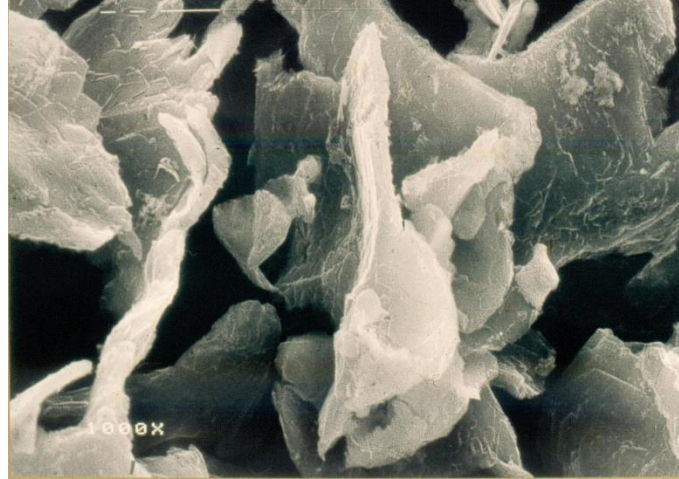
Keywords: Gray Cast Iron, Casting Simulation, Sand Casting, Solidification Expansion, SolidCast

How to Cite:

Çolak, M., Arslan, İ. ve Gavgalı, E., (2018). Gri Dökme Demirlerin Katılma Modellemesi ve Gerçek Dökümler İle Karşılaştırması, **Engineering Sciences (NWSAENS)**, 13(4):280-290, DOI: 10.12739/NWSA.2018.13.4.1A0419.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

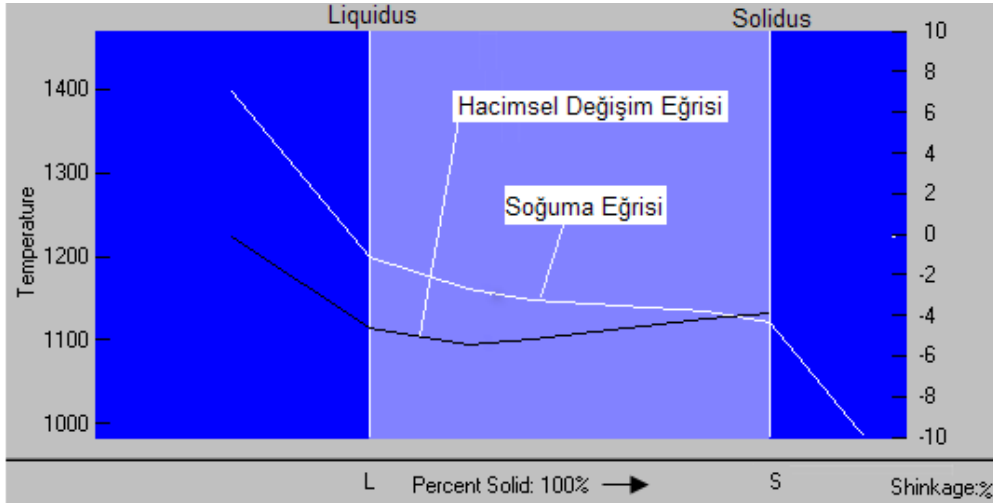
Kimyasal bileşiminde %2'den fazla karbon bulunan demir malzemeler grubu genel olarak dökme demir malzemeler olarak isimlendirilir. Genel olarak yaklaşık %2-4 C ve %1-3 Si içerirler. Bu malzemeler nihai şekil ve boyutlara ancak dökümle getirilebildiği için dökme demir olarak adlandırılırlar. Dökme demirlerin çok geniş aralıkta değişen mukavemet, sertlik, korozyon direnci, kolay işlenebilme, aşınmaya dayanıklılık ve titreşimleri yutma gibi özellikleri vardır. Bu özellikler dökme demirlere çok geniş bir kullanma alanı açmıştır. Bunların yaygın olarak kullanılmalarının diğer bir önemli nedeni de düşük maliyetleridir. Yeni malzemelerin güçlü rekabetine rağmen, dökme demirler binlerce mühendislik uygulamaları içerisinde halen uygun ve ekonomik malzeme olarak rağbet görmektedir [1 ve 2]. Dökme demirlerde karbon miktarının büyük kısmı katılaşma sırasında ayrışır ve dökme demirin mikro yapısında ayrı bir yapı elemanı olarak görülür. Karbonun oluşturduğu şekil ve biçim dökme demirin tipini belirlemede ve dolayısıyla özelliklerine etki etmektedir. Dökme demirlerde değişik gurupların oluşumunu, malzemenin kimyasal kompozisyonu, soğuma hızı, üretim yöntemi, üretimden sonraki ısıtma işlem yöntemleri gibi değişkenler belirlemektedir. Dökme demirlerin özelliklerinin oluşumunda, mikro yapılarında meydana gelen fazların büyük etkisi vardır [3 ve 4]. Dökme demirlerin yavaş soğumaları sonucu, sıvı demirdeki karbonun ayrışarak grafit lamelleri oluşturacak şekilde katılaştığı dökme demir türüne gri (lamel grafitli) dökme demir denir. Gri dökme demir yapılarına ait tarama elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Lamel grafitli dökme demir SEM görüntüsü [4]
(Figure 1. SEM image of cast iron with lamella graphite)

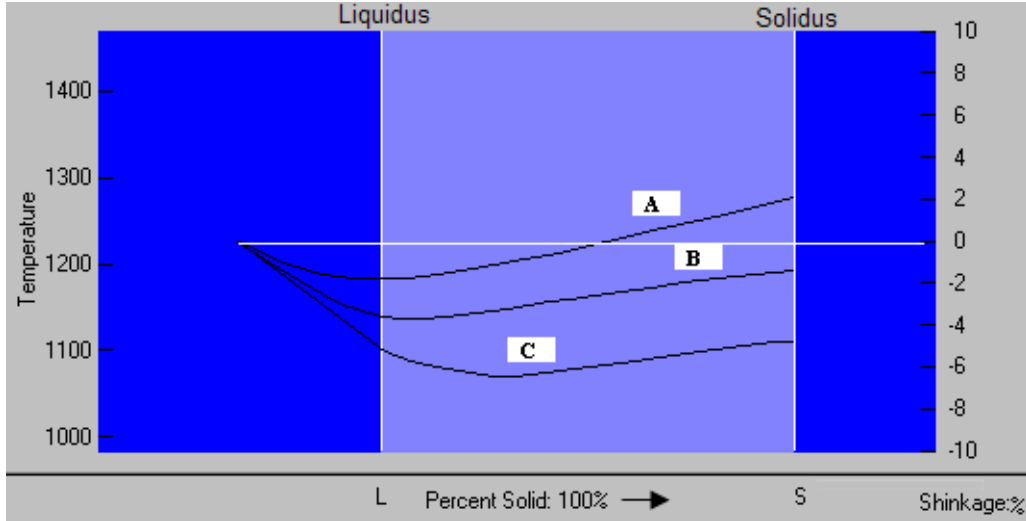
Dökme demirler, ötektik katılaşma gösteren alaşımlardır. Özellikle lamel grafitli ve küresel grafitli dökme demirler bileşim itibarıyla ötektik bileşime daha yakındırlar. Dökme demirlerin katılaşması esnasında grafit çökmesinden dolayı diğer alaşımların katılaşmasından farklılık gösterirler. Demiri çevreleyen grafitin yoğunluğunun düşük olması nedeniyle katılaşma sırasında çökelen grafitler genişlemeye yol açar. Bu yüzden katılaşma mekanizması karmaşık ve besleyici tasarımı zordur. Nerdeyse bütün demir alaşımlarının katılaşmasında olduğu gibi katılaşma süresince östenitik demirde büzülür. Bununla birlikte grafitin çökmesi katılaşma esnasında yoğunluk farkından dolayı genişleme basıncına neden olur [5 ve 6]. Küresel grafitli dökme demirlerin katılaşması sırasında oluşan hacimsel değişim çelik ve alüminyum dökümlerden farklı şekilde

gelişmektedir. Çelik ve alüminyum gibi dökümlerde soğuma ve katılaşma sürecinde yoğunluk artışına bağlı olarak belirli oranlarda hacimsel küçülme (çekinti) oluşurken dökme demir dökümlerinde birden fazla parametreye bağlı olarak çekinti ve genişleme bir arada görülebilmektedir. Bu parametrelerden en önemlileri; kalıp malzemesi, kimyasal bileşim, alaşımın aşırı ısı, aşılama kalitesi, dökümün katılaşma zamanı (modül) ve döküm hızıdır. Yüksek genişleme basıncı ve buna bağlı olarak düşük çekme ve besleme oranı elde edebilmek için yüksek karbon eşderi, yüksek kalıp rijitliği, yüksek katılaşma zamanı (yüksek modül), yüksek aşılama kalitesi (yüksek nodularite), düşük döküm sıcaklığı (düşük aşırı ısı) ve düşük döküm hızları kullanılmalıdır [7 ve 8]. Sağlam parça üretmek için dökme demirin ne tip olduğundan ziyade besleyici tasarımının uygunluğu önemlidir. Dökme demirlerin tipine bakılmaksızın bazı temel tasarım kriterleri sağlandığında yüksek kaliteli ve sağlam döküm elde edilebilir. Özellikle karmaşık geometri ve farklı kesit kalınlıklarına sahip döküm parçaların yolluk besleyici tasarımı oldukça zordur ve yoğun mühendislik bilgi ve becerisi gerektirmektedir. Ancak, bilgisayar teknolojilerindeki hızlı ilerlemelerle birlikte geliştirilen döküm simülasyon programları kullanılarak döküm proseslerinin modellenmesi, döküm mikro ve makro yapılarının tahmini gerçekleştirilebilmektedir. Döküm simülasyon programları; dökümhanelerde kullanımı hızla yaygınlaşan bir teknoloji olarak döküm kalıplama tasarımının kolay, ekonomik ve doğru yapılmasına olanak sağlamakta, deneme ve yanılma maliyetini ortadan kaldırmaktadır [9 ve 10]. Tipik bir simülasyon programında sıvı ve yarı katı bölgelerde soğuma sırasında sıcaklık değişimine göre hacimsel değişimin ne şekilde geliştiği Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 3'de ise bu tür bir eğrinin yukarıda verilen A, B ve C eğrileri gibi döküm parametrelerine göre ne tür bir şekil alabileceği gösterilmiştir.



Şekil 2. Dökme demir döküm simülasyonunda sıvı ve yarı katı bölgelerde soğuma sırasında sıcaklık değişimine göre hacimsel değişimin bir eğri ile tanımlanması [8]

(Figure 2. Definition of volumetric change with curve depending on temperature change during cooling in liquid and semi solid regions in casting simulation of cast iron [8])



Şekil 3. Dökme demir simülasyonunda hacimsel değişim eğrilerinin alabileceği olası şekiller [8]

(Figure 3. Probable shapes which volumetric change can take in cast iron simulation [8])

Şekil 3'den görüldüğü gibi hacimsel değişim davranışı A eğrisi ile tanımlanan bir dökümde sıvı bölgedeki çekme yolluklardaki sıvıdan telafi edildikten sonra iyi bir tasarım ile yollukların katılaşması sağlanmalıdır. Yarı katı bölgede başlangıçta oluşan az miktardaki hacimsel çekinti ise sonlara doğru oluşan genleşme ile telafi edilebilecek oranlardadır. Bu tür bir dökümde ilave bir beslemeye gerek kalmaksızın parça besleyicisiz olarak dökülebilecektir. Döküm simülasyon programları ile dökme demirlerin dökümlerinde besleyici tasarımı işlemleri genel hatlarıyla;

- Döküm parçanın sıcak noktaları ve bu bölgelerin modüllerinin belirlenmesi.
- Dökülecek alaşımın kimyasal bileşimi, döküm sıcaklığı, kalıp rijitliği ve döküm parça modülü gibi faktörlere bağlı olarak çekme zamanı, net genleşme veya çekme oranlarının hesaplanması.
- Hesaplanan değerlere göre gereken besleyicinin (gerekliyse) yerinin, hacminin ve sayısının belirlenmesi.
- Tasarımın tamamlanarak sonuçların değerlendirilmesi aşamalarından oluşmaktadır [7 ve 11].

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

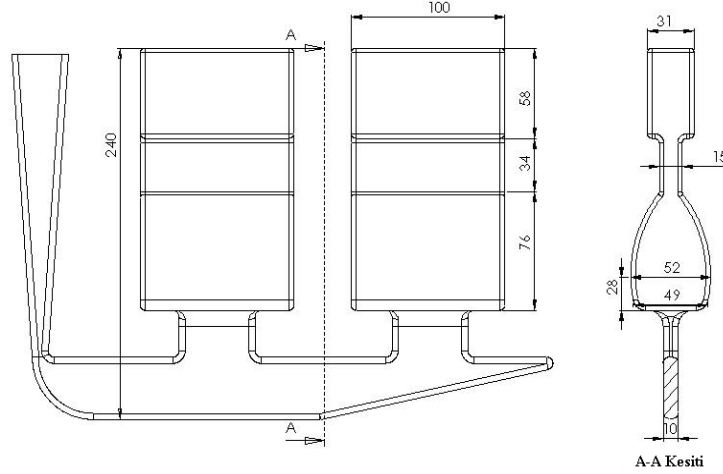
Bu çalışmada; farklı kesit kalınlıkları içeren ve parça içinde çekme boşlukları oluşumuna müsaade edecek şekilde tasarlanan geometriye sahip modelden yapılan kum kalıplara gri dökme demir alaşımından dökümler yapılmıştır. Dökümhanedeki fiziksel şartlar ve döküm parametreleri birebir olarak döküm simülasyon programına girilerek SolidCast döküm simülasyon programıyla modellemeler yapılmıştır. Gerçek döküm numunelerinden alınan sonuçlarla döküm simülasyon programından alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL METHOD-PROCESS)

3.1. Model Tasarımı (Model Design)

Model farklı kesit kalınlıkları bulunan, alt kısmı döküm, üst kısmı besleyici ve döküm ile besleyici arasında dar bir boğazı olacak şekilde tasarlanmıştır. Model geometrisi seçiminde rol oynayan en önemli etken dökümün herhangi bir bölgesinde beslenmesi zor bir sıcak nokta oluşturmaktır. Beslenebilirlik ölçütü olarak dökümlerin sıcak

noktalarında oluşan makro porozitelerin dağılımları esas alınmıştır. Bu nedenle seçilecek geometride; döküm kesitlerinde farklılıklar içeren ve yetersiz beslemeye bağlı porozite oluşumu gerçekleşmelidir. Buna karşılık oluşan tüm çekme kusurlarının iç kesitlerde oluşması ölçme ve değerlendirme kolaylığı açısından gereklidir. Yüzey çökmesi şeklinde oluşan kusurların boyutları tam olarak ölçülemediğinden seçilen geometride yüzey çökmesi şeklinde bir besleme kusuru da istenmemiştir. Model tasarımı geometrisi görünüşleri Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Döküm deneylerinde kullanılan nihai model tasarımı geometrisi ve ölçüleri
(Figure 4. The geometry and size of final model design used in casting experiments)

3.2. Kalıpların Hazırlanması ve Döküm Çalışmaları (Preparation of Molds and Casting Studies)

Çift taraflı plak model olarak hazırlanan sandık tipi derece içerisinde kum kalıpların hazırlanmasında CO₂ gazı ile sertleşen reçineli kum (%3.5 reçine + kuru silis kumu) kullanılmıştır. Kalıplama işlemi sonrası hazırlanan kalıp dereceye ve modellere verilen koniklik sayesinde rahatça modelden ayrılabilir. Şekil 5'de model plakası ve hazırlanmış kalıp görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5. a) Kum kalıp model plakası, b) Hazırlanmış kum kalıp görüntüsü
(Figure 5. a) Images of sand mold model plate, b) Images of prepared sand mold)

Kalıplar hazırlandıktan sonra merkezleme maçalarına göre kapatıldıktan sonra döküm esnasında sıvı metal basıncına karşı kalıpların açılmasını önlemek için ve kalıpları bir arada tutabilmek için plakalar arasına konulup tampon arasında sıkıştırılmıştır. Şekil 6'da döküme hazır kalıp görüntüsü ve döküm sonrası görüntüler verilmiştir.



Şekil 6. a) Döküme hazır kalıp görüntüsü, b) Döküm sonrası görüntü
(Figure 6. a) Images of mold ready to casting, b) After casting)

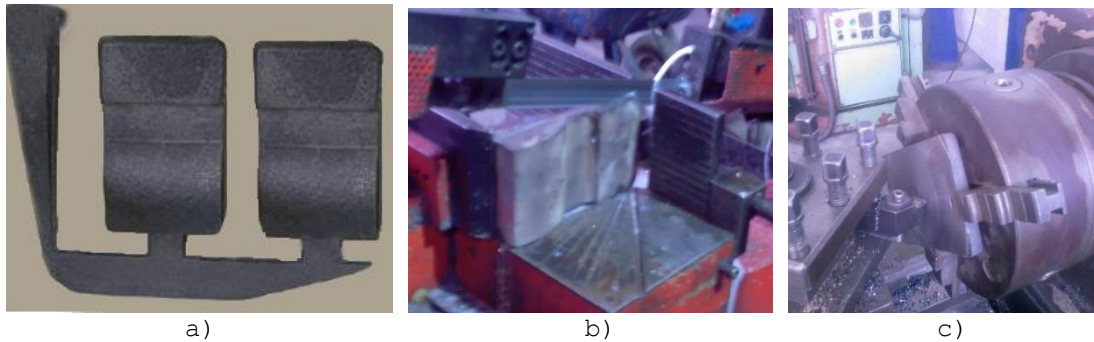
Döküm deneylerinde kullanılan gri dökme demir alaşımına ait kimyasal bileşim değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Ergitme ve döküm işlemleri ticari olarak üretim yapan bir dökümhanede 500kg ergitme kapasiteli İndüksiyon ocağı içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan gri dökme demir alaşımına ait kimyasal bileşimleri (% Ağı.)
(Table 1. Chemical contents of gray cast iron alloy used in experiments (weight %))

Element	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
%	3.689	0.343	2.292	0.038	0.041	0.050	0.038
	Mo	Mg	Cu	V	Al	Tİ	Fe
	0.003	0.033	0.082	0.002	0.015	0.007	93.35

3.3. Dökümlerin İncelenmesi (Investigations of Casting)

Katılaşma ve soğuma sonrası kalıp içerisinden çıkarılan döküm numuneler kuşlama işlemine tabi tutulmuştur. İncelemek üzere döküm numuneler öncelikle yollukları kesilmiş sonrasında düşey eksende geniş yüzeyi ortadan simetrik olarak ikiye ayrılacak şekilde şerit testere ile kesilmiştir. İlgili düşey eksenlerin incelenmesi için kesilen yüzeylerden frezeleme işlemi ile talaş kaldırılmıştır (Şekil 7).

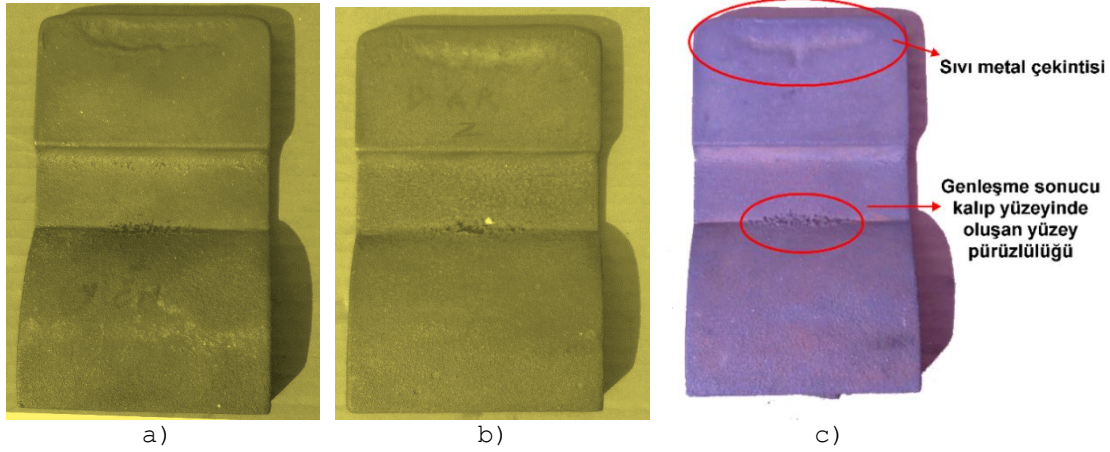


Şekil 7. a) Döküm numunesi, b) Numune kesilmesi, c) Kesit yüzey frezeleme
(Figure 7. a) Casting sample, b) Sample cutting, c) Cross-section milling)

Mikroyapı incelemeleri için numuneler alınıp metalografik hazırlık süreçlerinden geçirilmiş ve mikroskop altında incelemelere tabi tutulmuştur. Ayrıca döküm şartlarına uygun olarak SolidCast döküm simülasyon yazılımı ile modelleme çalışmaları yapılmıştır.

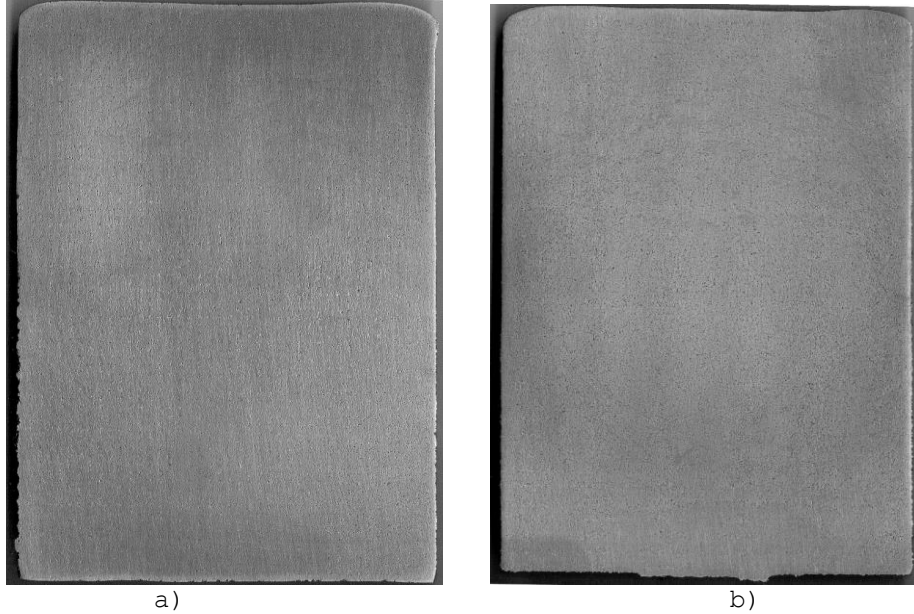
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ (EXPERIMENTAL RESULTS AND EVALUATION)

Döküm geometrisinde yolluğa bağlı iki ayrı döküm parça mevcuttur. Bunun sebebini; aynı döküm şartlarından iki numune ve iki sonuç üreterek sonuçların daha tekrarlanabilir olmasını sağlamak ve farklı soğuma hızları oluşturarak soğuma hızının diğer ölçülen faktörler üzerine etkisinin olup olmadığını incelemek şeklinde açıklayabiliriz. Yolluğa daha yakın olan döküm parça diğer döküm parça ile yolluk arasında kısmen izole olmuş bir şekilde soğuyacağından yolluğa uzak olan döküme göre daha yavaş bir soğuma hızı ile soğumaktadır. Dış tarafta kalan numunenin diğer numuneden daha hızlı soğuması beklenmektedir. Şekil 8'de döküldükten sonra numunelerin fotoğraf görüntüleri verilmiştir.



Şekil 8. a) Yolluk tarafı, b) Dış taraf numune, c) Sıvı metal çekintisi ve genleşme basıncı sonucu kalıp görüntüsü
(Figure 8. a) Runner side b) Outside of sample c) Image of mold due to contraction of liquid metal and expansion pressure)

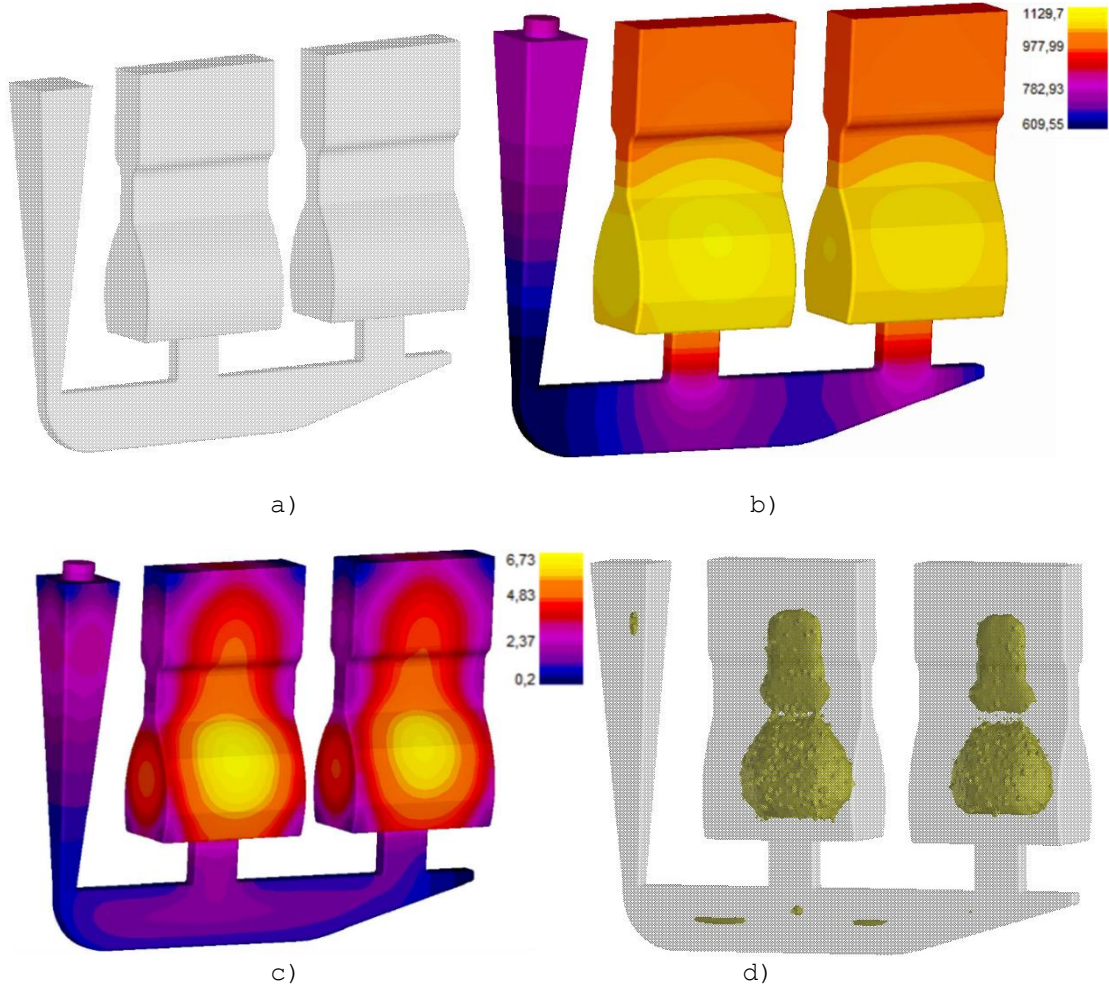
Şekil 8'de görüldüğü her iki döküm numunesi de şekilsel olarak tam gözükmemekte, yüzeylerinde herhangi bir çekinti riski gözlemlenmemektedir. Sıvı metal çekmesinin ve daha sonra genleşme sonucu kalıbın zorlandığı kısımlar Şekil 8c'de görülmektedir. Bu durum yapılan dökümlerin hepsinde ve hem yolluk hem de dış taraf numunelerinde gözlenmiştir. Genleşme, katılaşma esnasında alaşımın yapısında serbest halde bulunan grafitin yoğunluğunun düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Döküm numunelerin kesit yüzeylerinin taranmış görüntüsü Şekil 9'da verilmiştir. Şekillerden de görüleceği gibi numunenin kesit yüzeyinde herhangi bir makro poroziteye rastlanmamıştır. Fakat yüzeyin neredeyse her tarafında mikro porozite gözlenmektedir. Yolluk ve dış taraftaki numunelerin porozite durumu karşılaştırıldığında yolluk tarafındaki numunenin soğuması dış taraftaki numuneye nazaran daha yavaş olacağından daha fazla mikroporozite oluşması beklenmektedir.



Şekil 9. a) Yolluk tarafı, b) Dış taraf numune kesit yüzey görüntüsü
(Figure 9. a) Runner side, b) Outside sample cross-sectional surface)

4.1. SolidCast ile Bilgisayar Modellemelerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi (Evaluation of Results Obtained from Computer Modelling with SolidCast)

Çalışma kapsamında yapılan modellemeler SolidCAST döküm simülasyon programıyla yapılmıştır. Program üç boyutlu döküm-kalıp geometrisini kübik meşler yardımıyla verilen sınır şartlarına göre sonlu fark yöntemi ile çözümleyen bir yazılımdır. Döküm alaşımının soğuma ve katılaşma sırasında oluşan sıcaklığa bağlı hacim değişimi, lamel grafitli dökme demir alaşımı ve kullanılan döküm geometrisi için programa girilen sınır şartları gerçek döküm koşullarına göre girilmiştir. SolidCAST döküm simülasyon yazılımının demir özellikleri hesaplamaları (Iron Property Calculator) modülü ile dökümü yapılan gri dökme demir alaşımının kimyasal bileşim değerleri, döküm sıcaklığı, döküm modülü, kalıp rijitliği, aşılama kalitesi değerlerine göre çekinti ve genleşme değerleri hesaplanmıştır. Modellemelerde demir özelliklerinin hesaplamalarında kalıp rijitliği ve aşılama kalitesi değerleri dökümhaneye özgü değişiklik gösterebileceğinden bu değerler değiştirilerek farklı simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Böylece dökümhanenin optimum aşılama kalitesi değerleri ve kalıp rijitliği yaklaşık olarak belirlenmiştir. Yapılan modelleme çalışmalarından elde edilen makro porozite (çekinti) sonuçları, soğuma analizi, katılaşma analizi ve mikro porozite sonuçları Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. a) Makroporozite sonuçları (0.95 %95 ve altı yoğunluğu göstermektedir -1 %100 yoğunluğu göstermektedir), b) Soğuma analizi görünüşü (Soğuma birimi °C ve en sıcak yer 1130°C'dir), c) Katılaşma zamanı görünüşü (Katılaşma zamanı birimi dakika ve en son katılaşma zamanı 6.73 dk. dır), d) FCC kriterine göre mikroporozite riski sonuçları

(Figure 10. a) Macro porosity results (0.95 represents density of 95% and below -1 represents 100% density), b) Image of cooling (unit of temperature is °C and the highest temperature is 1130°C), c) Image of solidification (unit for solidification time is minute and the latest solidification duration is 6.73 min), d) Results of micro porosity risk according to FCC criteria)

Modelleme sonuçlarının gerçek döküm sonuçlarıyla uyumlu olduğu gözlenmektedir. Parça üzerinde makro porozitede bir risk olmadığı fakat mikroporozite riskinin bulunduğu modelleme sonuçları ile de doğrulanmıştır.

4.2. Mikroyapı İncelemeleri (Microstructure Investigations)

Gri dökme demir alaşımından yapılmış döküm numunelerinden yolluk tarafındaki numuneden farklı kesit kalınlıklarına sahip bölgelerden alınan numunelerin mikroyapı resimleri Şekil 11'de verilmiştir. Yapılan mikroyapı incelemelerinde kesit kalınlığına bağlı olarak lamel kalınlıklarının değiştiği gözlenmiştir. Kalın kesitli bölgelerde katılaşma daha geç tamamlandığından grafit yapısı büyümek için zaman

bulmuş ve daha kaba yapılar oluşmuştur. Bu durum simülasyon programından alınan katılaşma zamanı verileri ile uyumludur.



Şekil 11. Mikroyapı resimleri
(Figure 11. Images of microstructure)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada iki numuneli modele sahip kalıp, kuma döküm yöntemi ile gri dökme demir malzemeden üretimi incelenmiştir.

- Fiziksel ortamda yapılan dökümler ile simülasyonda alınan sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu da simülasyon programına girilen malzeme özellikleri ve sınır şartları değerlerinin doğru seçildiğini göstermektedir.
- Verilen malzeme ve döküm şartları esas alınarak yapılan simülasyonlarda dökümün büyük oranda pozitif bir hacimsel değişim etkisi altında katılaşacağı belirlenmiş ve buna bağlı olarak hacimsel genleşme basıncının etkisi ile besleyici gerekmesizin bu dökümün dökülebileceği belirlenmiştir.
- Yapılan mikroyapı incelemelerinde kesit kalınlığına bağlı olarak soğuma oranının değişmesinden lamel kalınlığının değiştiği gözlenmiştir. Kalın kesitli bölgelerde katılaşma daha geç tamamlanmış grafit yapısı büyüme için zaman bulmuş ve daha kaba yapılar oluşmuştur. Bu durumun modelleme programından alınan veriler ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.
- Döküm modellemesinde gerçek döküm şartlarının birebir girilmesi başarının anahtarı rolündedir ve birebir değerler girildiğinde başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Buna göre bundan sonraki çalışmalarda döküm şartlarına göre optimize edildikten sonra doğru bir şekilde yapılan simülasyonun sağlam parça imalinde, özellikle hata yapıldığında ortaya çıkabilecek maddi kayıplar göz önüne alındığında çok önemli olduğu gözlenmiştir.

NOT (NOTICE)

Bu çalışma, 21-23 Eylül 2017 tarihinde Bayburt'ta düzenlenen International Conference on Advanced Engineering Technologies (ICADET) Konferansında sözlü bildiri olarak sunulmuş ve yeniden yapılandırılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Campbell, J., (2003). Castings Second Edition. University of Birmingham, UK.
- [2] Çavuşoğlu, N., (1981). Döküm Teknolojisi 1, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu.
- [3] Fredriksson, H., Stjerndahl, A., and Tinoco, J., (2005). On the Solidification of Nodular Cast Iron and its Relation to the Expansion and Contraction, Materials Science and Engineering, A 413-414, 363-372.
- [4] Stefanescu, D.M., (1988). ASM Handbook Metals Handbook, Vol:15, Casting, ASM International, Metals Park, pp:296-307, Ohio.

-
- [5] Stefanescu, D.M., (2005). Solidification and Modeling of Cast Iron—A Short History of the Defining Moments, *Materials Science and Engineering A* 413-414, 322-333.
- [6] Lacaze, J., (199). Solidification Of Spheroidal Graphite Cast Irons: III. Microsegregation Related Effects, *Acta mater.* Vol:47, No:14, pp:3779-3792.
- [7] Schmidt, D.C., (2007). The Basics of Solidification, Gating and Riser Design of Cast Irons, AFS Wisconsin Regional Conference, Finite Solutions Inc Slinger WI, February 8.
- [8] Meredith, J.F., (2008). Solving Porosity Problems in Graphitic Iron Castings, Casting Solutions Pty Ltd Moorebank, NSW, Australia.
- [9] Kayıkcı, R., (2008). Büyük Kütleli Bir Çelik Parçanın Dökümünde Klasik ve Bilgisayar Destekli Mühendislik Yöntemlerinin Karşılaştırılması, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Cilt:23, No:2.
- [10] Çolak, M., Şirin, S., Kayıkcı, R. ve Bilgin, Ö., (2010). Küresel Grafitli Dökme Demir Dökümlerinde Simülasyon Tekniği İle Besleyici Tasarımı ve Uygulamaları, 3. Uluslararası Döküm ve Çevre Sempozyumu (IFES 2009), İstanbul, Türkiye.
- [11] Kayıkcı, R., (2010). Besleyicisiz Döküm Yöntemi İle Dökülen Bir Küresel Grafitli Dökme Demir Dökümünün İncelenmesi, 3. Uluslararası Döküm ve Çevre Sempozyumu (IFES 2009), İstanbul, Türkiye.