

BESLEYİCİSİZ YÖNTEMLE DÖKÜLEN BÜYÜK KÜTLELİ BİR DÖKME DEMİR İÇİN SIMÜLASYON TEKNİĞİ KULLANIMININ İNCELENMESİ

Ramazan KAYIKCI*, Murat NERGİZ**, Özkan BİLGİN**

* Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, 54187, Serdivan, Sakarya
** Gürsetaş Döküm San. Tic. Ltd. Şti., Kocaeli,

ÖZET

Bu çalışmada net döküm ağırlığı 4600 Kg olan ve kuma dökülen GGG70 sınıfı küresel grafitli dökme demir parçanın besleyicisiz olarak dökümünün simülasyon tekniği ile analizi incelenmiştir. Çalışmada döküm simülasyonu kullanılarak parçanın katılma ve besleme analizleri yapılmış ve besleyicisiz olarak dökümünün uygun olup olmadığı analiz edilmiştir. Daha sonra parça reçine bağlayıcı kuma kalıplanarak besleyicisiz olarak dökülmüş ve katılaştırılmıştır. Sonuçlar besleyicisiz dökülen döküm parçada çekinti boşluğu ve mikro gözenek oluşmadığını ve simülasyondan alınan sonuçlar ile gerçek dökümlerin bire bir benzediğini göstermiştir. Sonuçlar ayrıca simülasyon tekniklerinin iyi kullanılması, kalıp tasarımı ve metalurjik koşulların yerine getirilmesi halinde küresel grafitli dökme demir dökümlerinin besleyicisiz olarak yüksek kalitede dökülmesinin mümkün olabileceğini göstermiştir.

ABSTRACT

In this study, computer simulation of sand cast GGG70 grade spherical graphite iron of single part weighted 4600 kg has been investigated. The cast part was simulated using commercial casting simulation software for riserless casting design. The part was sand cast riserless as suggested by the results from casting simulation. After cooling, the cast parts were machined and the results from simulation and the castings were compared. Results showed that no macro and micro shrinkage porosity were observed on the machined sections of the cast parts proving an excellent similarity between simulation and the real castings. Results also showed that providing good moulding design and metallurgical conditions, simulation techniques for riserless casting design can be used for quality spherical iron castings.

1. GİRİŞ

Küresel grafitli dökme demirler başta makine ve otomotiv endüstrileri olmak üzere genel endüstriyel alanda geniş bir kullanıma sahip demir esaslı malzemelerdir. Dökme demirler özellikle çelik malzemeler ile kıyaslandığında hafif olmaları, üretimlerinin kolay ve ucuz olmaları bakımından birçok avantajlara sahiptirler. Küresel grafitli dökme

demirlerin üretiminde dökümden başka bir alternatif olmadığından her bir parçanın bir döküm süreci sonunda şekillenmesi söz konusudur. Bu yüzden küresel grafitli dökme demirlerin fiziksel ve mekaniksel özellikleri bu döküm süreci ile şekillenmektedir.

Bir döküm parçanın üretiminde döküm süreci tasarlanırken aşağıda sıralanan 3 tasarım kriterinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bunlar;

- a. Yeterli performans için tasarım (küresel grafitli dökme demirler esas alındığında bu kriter, elemental analiz ve aşılama koşulları ile belirlenen ve dökme demirin sınıfını belirleyen bileşenlerdir).
- b. Optimum maliyet için tasarım (bu kriter kalıplama, kalıp verimi, boyut toleransları, kesme, temizleme ve işleme maliyetlerinin minimize edilmesini sağlar).
- c. Boşluksuz döküm için tasarım (bu kriter döküm kesitlerinde makro ve mikro ölçeklerde boşluk oluşumunu engellemek için ergitme, alaşımlama ve aşılama dahil olmak üzere yolluk ve besleyici tasarım süreçlerini kapsar).

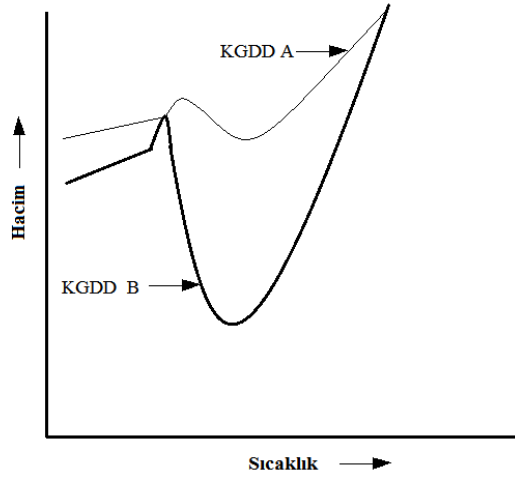
Bu kriterlerden son ikisinin sağlanmasında etkili bir araç olan döküm simülasyonları dökümhaneler tarafından gün geçtikçe artan oranlarda kullanılmaya başlamış bir teknolojidir. Özellikle ülkemizde döküm sektörü bu teknolojinin getirdiği yararları henüz yeni anlamaya başlamış ve simülasyon teknolojisi kullanan dökümhane sayısı son yıllarda hızla artmaya başlamıştır. Döküm simülasyonları 3 boyutlu (3D) döküm geometrisi üzerinde gerekli ısı ve kütle transferi denklemlerini sonlu fark veya sonlu elemanlar yöntemi ile çözerek dökümhane ortamında gerçekleşen termo-fiziksel olayları sayısal ortamda çözümleyen modelleme araçlarıdır.

1.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Hacim Değişimi ve Besleme Mekanizmaları:

Küresel grafitli dökme demirlerin katılaşması sırasında ortaya çıkan hacim değişimini ve çekme davranışlarını anlamak makro ve mikro çekinti oluşturmaksızın boşluksuz dökümler elde etmek açısından son derece önemlidir. Bu amaçla küresel grafitli dökme demirlerde hacim değişimini ölçmek üzere geliştirilmiş birçok deneysel yöntem geliştirilmiştir (1,2,). Sıcaklığa bağlı olarak tek yönlü hacimsel küçülme gösteren çelik ve alüminyum dökümlerinin aksine dökme demirlerin katılaşması sırasında oluşan hacimsel değişim birçok parametreye bağlı olarak çekinti ve genişlemenin bir arada görüldüğü karmaşık formda ortaya çıkmaktadır(3). Küresel grafitli dökme demirlerde katılaşmaya bağlı hacim değişim davranışları birçok çalışmada detaylıca incelenmiştir. [1,2,4,5].

Küresel formda grafit oluşturarak katılaşan dökme demirler karmaşık hacimsel değişim davranışları sergilemektedir. Kesit kalınlığı 13 mm den daha küçük olan dökümler dengeli olmayan bir formda katılaşmaya başlar(6). İç kısımlardaki sıvının çekmesi dış kısımlardaki katılaşan kabukta oluşan grafit genişmesi ile kısmen telafi edilebilir. Döküm sıcaklığına bağlı olarak çekintinin genişleme ile tamamen telafi edilebilmesi için katılaşmanın belirli bir süre ilerlemesi ve dengeli katılaşma moduna geçmesi gerekir. Bunun nedeni katılaşma sırasında çökelen karbonun demire göre daha düşük bir yoğunluğa sahip olmasıdır. Grafit fazının oluşumu bu yüzden kısmi bir hacim artışına (genleşmeye) yol açmaktadır. Bazı durumlarda genişleme oranı alaşımlama toplam çekmesini telafi edebilmekte ve bu genişleme iyi bir yolluk tasarımı ile ek bir besleme gerekmesiz çekinti boşluğu oluşumunu engelleyebilmektedir. Küresel grafitli dökme demirlerde genişleme ve çekme davranışı alaşımlama bileşimi, soğuma hızı, aşılama şartları, dökümün geometrik yapısı ve kalıp malzemesi gibi birçok parametre ile

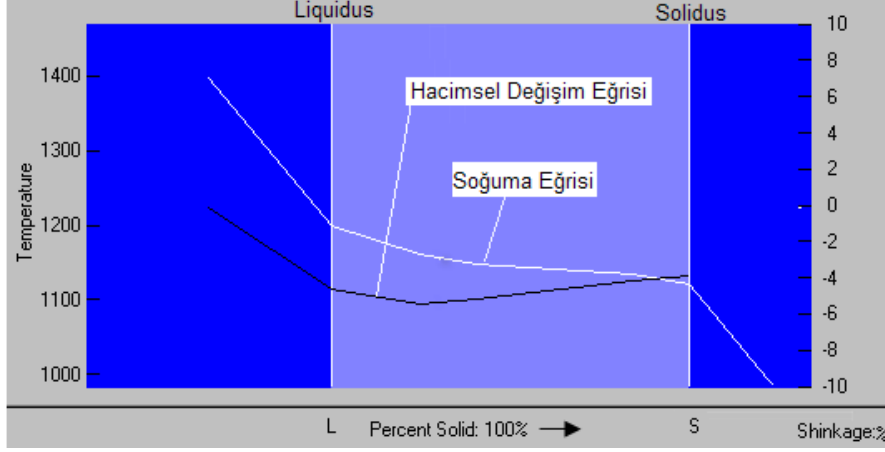
doğrudan ilişkilidir(6,7,8). Bir küresel grafitli dökme demirin katılaşması sırasında ortaya çıkabilecek olası çekme ve genleşme davranışları Şekil 1’de şematik olarak gösterilmiştir(6).



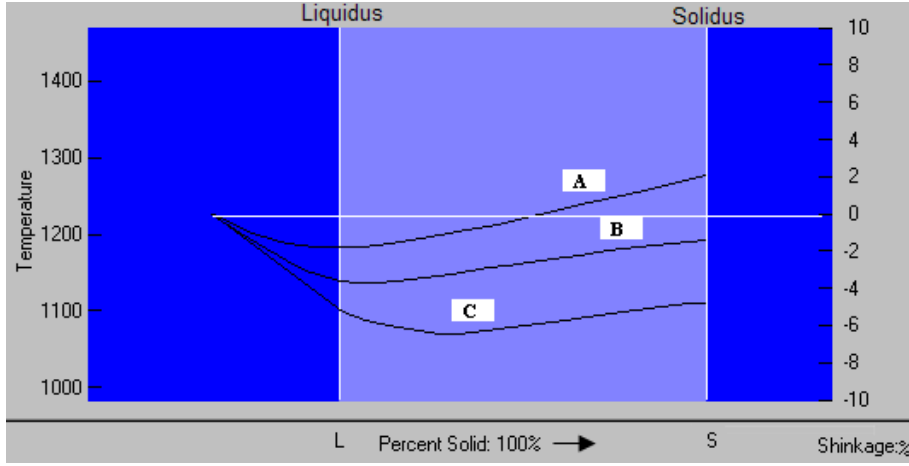
Şekil 1. Küresel grafitli dökme demirin katılaşması sırasında oluşan çekme ve genleşme davranışlarının şematik gösterimi.

Şekil 1’den görüldüğü gibi küresel grafitli dökme demirin katılaşmasında hacimsel değişim eğrisi A dan B ye doğru değişebilmektedir. A ile gösterilen hacimsel değişim eğrisine sahip bir döküm B ile gösterilen döküme göre önemli oranda daha az çekme gösterecektir. Aynı şekilde besleme metali ihtiyacı, B ile gösterilen hacimsel değişim eğrisi gösteren bir dökümden A ile gösterilene göre daha fazla olacaktır. Küresel grafitli dökme demirlerin çekme ve genleşme davranışlarında etkili olan parametrelerin Şekil 1’de gösterilen hacimsel değişim eğrilerini ne şekilde etkilediği geçmiş çalışmalarda genişçe yer almaktadır. Yüksek karbon eşdeğeri, yüksek kalıp rijitliği, yüksek katılaşma zamanı (yüksek modül), yüksek aşılama kalitesi (yüksek nodularite) ve düşük döküm sıcaklığı (düşük aşırı ısı) eğrileri B den A ya doğru yönlendirirken yüksek döküm sıcaklığı, düşük aşılama ve kalıplama kumu kalitesi ve düşük katılaşma zamanı gibi faktörler hacimsel değişim eğrilerini A’ dan B’ye doğru değiştirmektedir (7).

1.2 Hacimsel Değişim Davranışlarının Simülasyon Ortamında Tanımlanması: 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’te ise bu tür bir eğrinin yukarıda verilen A, B ve C eğrileri gibi döküm parametrelerine göre ne tür bir şekil alabileceği gösterilmiştir.



Şekil 2. Bir küresel dökme demir döküm simülasyonunda sıvı ve yarı katı bölgelerde soğuma sırasında sıcaklık değişimine göre hacimsel değişimin bir eğri ile tanımlanması (MEREDITH 2008).



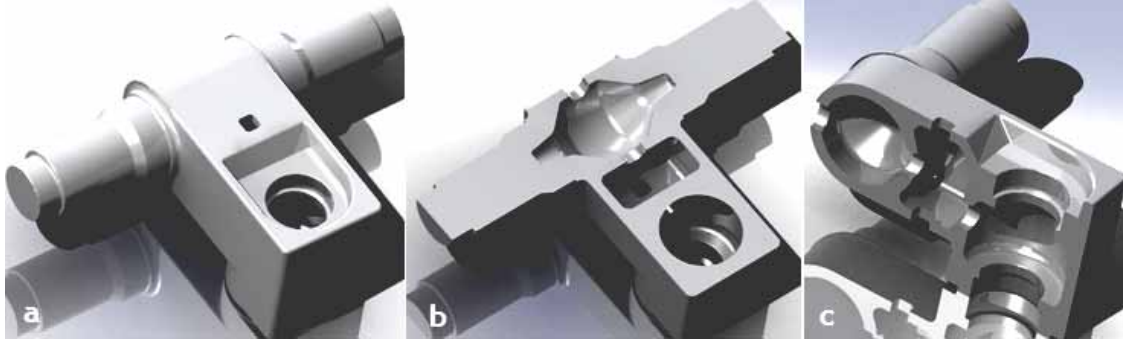
Şekil 3. Bir küresel dökme demir simülasyonunda hacimsel değişim eğrilerinin alabileceği olası şekiller(MEREDITH 2008).(Not: bir simülasyonda yalnız uygun olan bir eğri kullanılmaktadır).

Şekil 3' ten görüldüğü gibi hacimsel değişim davranışı A eğrisi ile tanımlanan bir dökümde sıvı bölgedeki çekme yolluklardaki sıvıdan telafi edildikten sonra iyi bir tasarım ile yollukların katılmasında 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.

2. DENEYSEL YÖNTEM

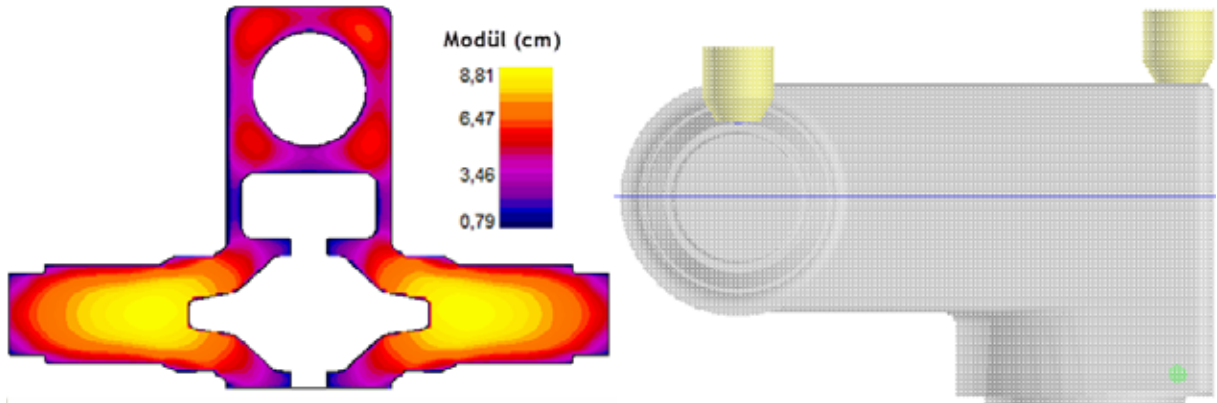
2.1 Döküm Parçanın Simülasyon Ortamında Modellenmesi: GGG70 kalitesinde küresel grafitli dökme demirden modellenerek dökülmesi istenen büyük kütleli “vals döndürme kolu” parçasının 3 boyutlu görünüşü Şekil 4.a’da gösterilmiştir. Parçanın işlenmemiş döküm ağırlığı 4700 Kg dır. Parçanın döküm modellenmesi SolidCast simülasyon yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.a’da görülen 3 boyutlu katı modelin iç detayları sırası ile Şekil 4.b’de ve 4.c’de yatay ve düşey ekseninde kesit alınarak

gösterilmiştir. Parçaya önce CAD ortamında alttan çift taraflı yolluk girişleri bağlandıktan sonra döküm modeli stl formatına çevrilerek simülasyon programına alındı döküm pozisyonuna getirildi. İlk simülasyon döküm parça üzerinde oluşan sıcak noktaları görmek ve döküm kesitlerinin modül değerlerini hesaplamak amacı ile yapıldı. Malzeme olarak bu aşamada sadece 1380 °C döküm sıcaklığı, perlitik küresel grafitli dökme demir ve silis kumu girilerek döküm modeli 1 000 000 düğüm noktalı (kaba) meş yapılarak döküm işlemi başlatıldı.



Şekil 4. Simülasyon programında modellenen 4700 Kg ağırlığında döküm parçanın a.katı modeli, b.yatay eksende kesit görünüşü c.düşey eksende kesit görünüşü.

Soğuma ve katılaşma süreçleri modellenen ilk deneme simülasyonundan elde edilen sonuçlar sadece parça kesitlerinde modül dağılımını görüntülemek amacı ile kullanılmıştır. Bu sonuçlar Şekil 5'te gösterilmiştir. Modül değeri parçanın uç ve kenar kısımlarından başlayarak iç kısımlara doğru 8,81 cm seviyelerine yükselmiştir. İlk deneme simülasyonundan elde edilen en yüksek modül değeri bir sonraki aşamada dökümün katılaşması sırasında oluşacak hacimsel değişim eğrisinin çizilmesinde ve buna bağlı olarak gerektiğinde besleyici boyutlandırmasında kullanılacağından oldukça önemlidir.



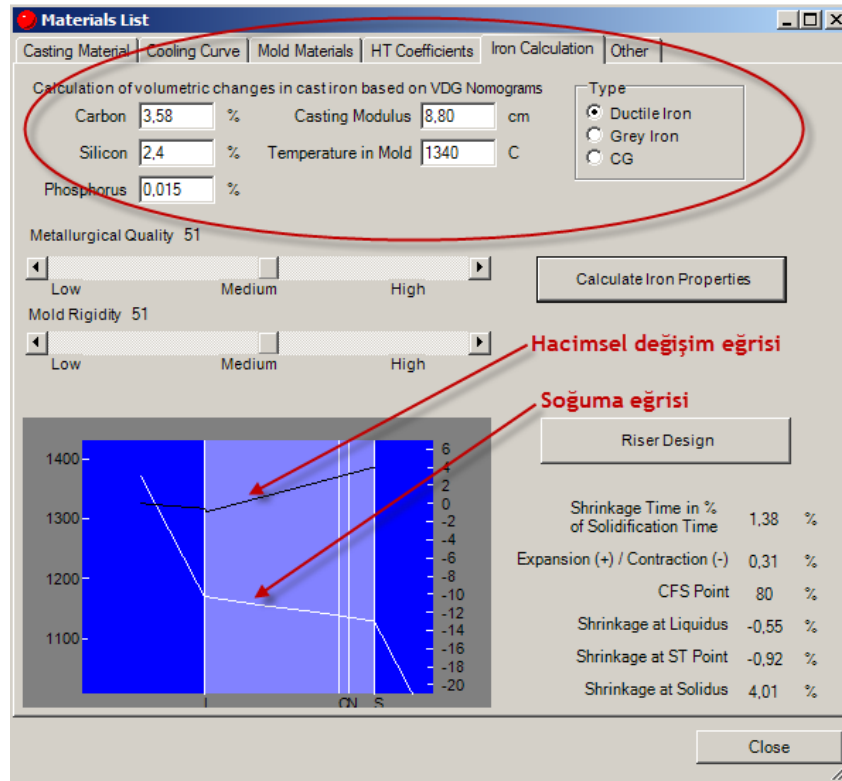
Şekil 5. Deneme modellemesi yapılan parçanın kesitlerinde oluşan modül dağılımı.

Tablo 1'de döküm için hedeflenen ve döküm sonrası DLA2000SE tip bir spektrometre ile ölçülen kimyasal bileşim değerleri verilmiştir. Modelleme aşamasında simülasyon programına Tablo 1'deki hedef değerleri girilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi hacimsel değişim eğrisi hesaplaması için kullanılan simülasyon programına yalnız karbon, silisyum ve fosfor değerleri girilmektedir.

Tablo 1. Simülasyon ve dökümlerde hedeflenen ve gerçekleşen kimyasal bileşim değerleri.

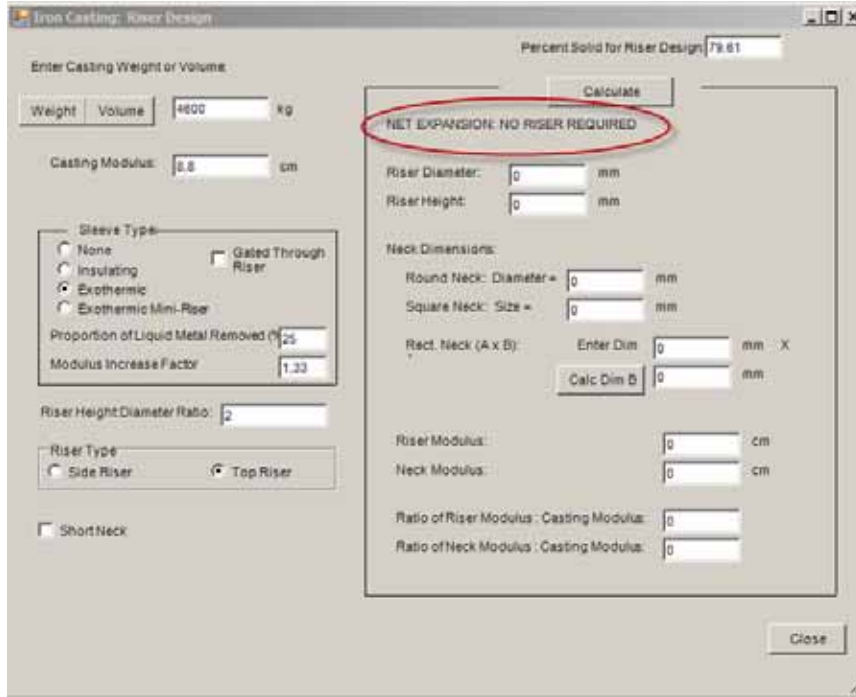
Element	C	Si	P	Mn	Cr	Cu	Mg	Ni	Mo
Hedef (%)	3,60	2,50	0,018	0,30	0,30	1,25	0,050	1,45	0,20
Gerçekleşen (%)	3,58	2,40	0,010	0,50	0,35	1,06	0,05	1,50	0,25

Şekil 6’da döküm parça için gerekli girdiler yapıldıktan sonra simülasyon programında hacimsel değişim eğrilerinin program tarafından otomatik olarak hesaplanması gösterilmektedir. Hesaplanan hacim değişim eğrisi şekil üzerinde görüntülenmektedir. Şekil 6’ da hesaplanmış hacimsel değişim eğrisinden ve ”Shrinkage at liquidus %” uyarısından görüldüğü gibi sıvı alaşımın döküm sıcaklığından solidüs sıcaklığına kadar soğuması sırasında % -0,55 oranında bir hacimsel küçülme gerçekleşmektedir. Solidüs - likidüs aralığında ise ilk %1,38’lik katılaşma sırasında döküm yaklaşık % -0,92 oranında daha hacimsel küçülmeye maruz kalmaktadır “Shrinkage at ST point”. Buna karşılık döküm, solidüs-likidüs aralığında kalan yaklaşık % 97,6 oranında katılaşmayı ise genişleme etkisi altında tamamlamaktadır. Program tarafından % +4,1 oranında bir genişleme oranı hesaplanmıştır. Elde edilen bu verilere göre besleyici adedi ve boyutlarının hesaplanması için SolidCast simülasyon programında Şekil 6’da görülen “Riser Design” butonuna basıldığında Şekil 7’de gösterilen “Net Expansion:No Riser Required” net genişleme-besleyici gerekmiyor mesajı alınmıştır.



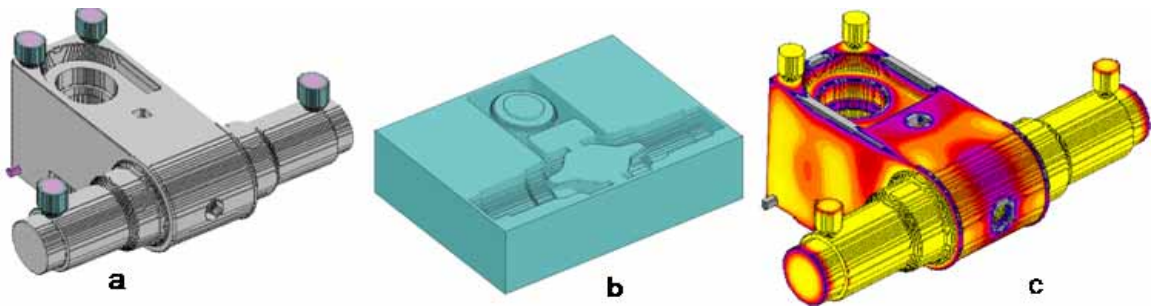
Şekil 6. Girilen C, Si ve P ve modül değerlerine göre hacim değişim eğrisinin SolidCast programı tarafından hesaplanması.

Buna göre herhangi bir besleyiciye gerek kalmaksızın bu dökümün hem simülasyon ortamında hem de gerçek dökümhane ortamda dökümünün yapılması aşamasına geçilmiştir. Ancak gerçek döküm ortamında bu ağırlıkta bir dökümün tamamen besleyicisiz olarak dökülmesi döküm sektöründe henüz alışılmış bir uygulama olmadığından dökümün yapılacağı firmanın da isteği doğrultusunda %1 lik sıvı çekmeyi telafi edecek oranda 4700 Kg ağırlığında bir döküme göre sembolik boyutlarda 4 adet No:3 (0,8 dm³) ekzotermik gömleli besleyici ile yeniden simülasyon analizleri yapılmıştır.



Şekil 7. Şekil 6.a.'da girilen ve hesaplanan değerlere göre simülasyondan alınan net genişleme "Riserless Feeding" (besleyici gerekmiyor) uyarısı.

Şekil 8a-c' de sırası ile dökümün ve kalıbın 5 000 000 düğüm noktası ile meş edilmiş görüntüleri kalıbın sıvı metal ile doldurulmasından sonra simülasyon programında soğuma ve katılaşmanın ilerlemesi gösterilmiştir.

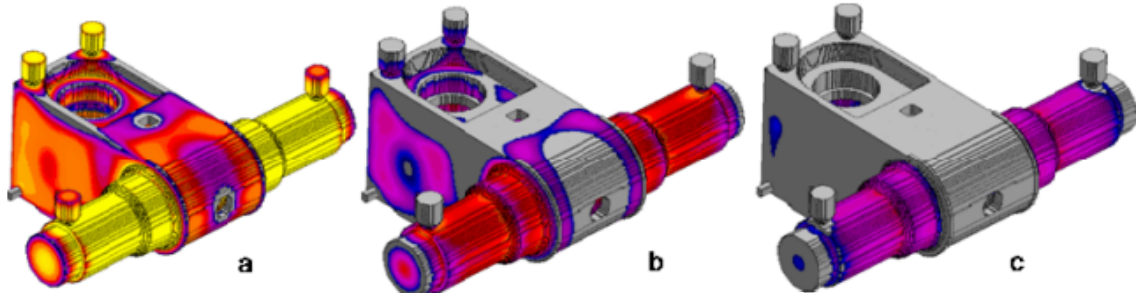


Şekil 8. a. Dökümün, b kum kalıbın meş edilmiş görünüşleri, c.sıvı metalin döküm boşluğuna doldurulması ve d. Kalıpta soğuma ve katılaşmanın ilerlemesi.

2.2 Dökümlerin Yapılışı: Ergitme işlemi sfero piki olarak bilinen düşük kükürt oranına sahip dökme demir külçeleri kullanılarak indüksiyon ergitme fırınında gerçekleştirildi. Alaşımın analizi Tablo 1’de verilen değerlere geldiğinde metal yaklaşık 1400 °C de potaya alınarak aşılama işlemine tabi tutuldu. Aşılama olarak % 0,5 oranında %2 baryum içeren Ni-Mg aşılama ilavesi ilave edildi. Sıvı alaşımın sıcaklığı 1370 °C civarına geldiğinde Şekil 8’ de gösterilen döküm modeline göre hazırlanan reçine bağlayıcılı kum kalıplara alttan boşaltma ile döküldü. Yaklaşık 48 saat kum kalıpta soğumaya bırakıldıktan sonra dökümler kumdan çıkarıldı ve temizleme işlemine tabi tutuldu.

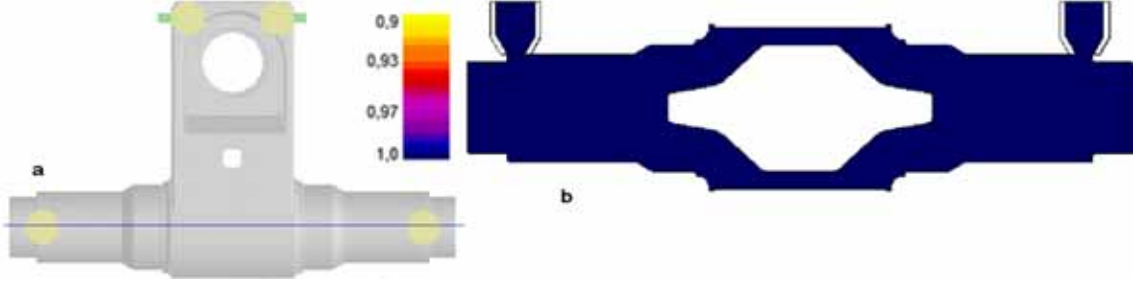
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Simülasyon analizlerinden elde edilen sonuçlar: Şekil 9.a, b ve c.’de dökümün simülasyon ortamında soğuması sırasında katılaşmanın döküm kesitlerinde ilerleyişi gösterilmektedir. Kesitlerdeki modül dağılımına (bkz.Şekil 5) paralel bir şekilde katılaşmanın dökümün ince uç kesitlerinden başlayarak kalın merkezi kesitlere doğru ilerlediği görülmektedir. Diğer bir nokta ise dökümün üst yüzeyinde bulunan besleyicilerin henüz katılaşmanın başlangıcında soğuyarak devre dışı kalmalarıdır. Bu durum aslında bu dökümün katılaşması sırasında neredeyse hiçbir harici besleme desteği almadığını göstermektedir. Şekil 9.c.’de görüldüğü gibi besleyicilerin tamamı katılaşmış gövde üzerindeki dolu kesite sahip kollarının henüz tamamen sıvı olduğu izlenilmektedir.



Şekil 9. a,b ve c. Simülasyon ile modellenen döküm parçanın kesitlerinde katılaşmanın ilerlemesi.

Simülasyon sonrası analizlerde öncelikle döküm parça kesitlerinde her hangi bir makro veya mikro çekinti boşluğu oluşup oluşmadığını araştırmak için malzeme yoğunluğu kriterine göre Şekil 10 ’da görüldüğü gibi analizler yapıldı. Şekilden de görüldüğü gibi parça üzerinde her hangi bir çekme kusuru görülmemektedir. Döküm üzerinde bulunan 4 besleyicinin en üst kısımlarından yaklaşık 1 cm kadar bir metal azalması görülmektedir. Daha detaylı bir boşluk analizi için Şekil 10.a’ da gösterilen kesit düzlemi ile parça tamamen taranarak her bir kesitte x-ray görüntüsü ile boşluk ve gözenek taraması yapılmıştır. Şekil 10’da görüldüğü gibi döküm kesitleri tamamen koyu mavi ile kaplı ve 1’e karşılık gelen (tam yoğun, boşluksuz) bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Döküm kesitlerinde yapılan mikro gözenek (porozite) analizleri de aynı şekilde yapılmış ve döküm parçanın her hangi bir bölgesinde mikro gözenek şeklinde bir çekinti ve boşluk hatasına rastlanmamıştır.



Şekil 10. a Simülasyon sonrası izometrik görünüşte çekinti boşluğu analizi, b. Kesit düzlemi, c kesit düzleminde x-ray görüntüsü ile yoğunluk dağılımı (0 tam boş – 1 tam dolu).

3.2. Simülasyon sonuçları ile Gerçek Dökümlerin Karşılaştırılması: Şekil 11.a.'da simülasyona uygun olarak gerçek dökümhane ortamında üretimi yapılmış bir döküm parçanın kalıptan çıkarılmış hali gösterilmiştir. Üzerinde bulunan 4 adet sembolik boyutlarda besleyicinin her hangi bir besleme desteği sağlamamasına rağmen dökümün dolu bir şekilde alındığı görülmektedir. Buna göre dökümün soğuma ve katılaşma sırasında hiç besleme metaline ihtiyaç duymadan tamamen genleşme etkisi altında katılaştığı söylenebilir. Buna göre dökümde kullanılan sembolik besleyiciler kullanılsa bile bu dökümün rahatlıkla besleyicisiz dökülmesi mümkündür. Şekil 11.c.'de ise döküm parçanın işleme için tezgâha bağlanmış hali görülmektedir.



Şekil 11. a.Döküm parçanın temizlenmiş ve b. işleme için tezgâha bağlanmış hali.

İşlenen ve iç kısımlarına delik delinen dökümlerde de herhangi bir çekinti boşluğu veya gözenekliliğin oluşmadığı görülmüştür. Alınan bu sonuçlara göre, analiz, katılaşma zamanı, döküm şekli ve kalıp rijitliği gibi önemli faktörlerin avantajlarını kullanarak bazı dökümlerin simülasyon ortamında ve gerçek döküm şartlarında dışarıdan bir beslemeye gerek duyulmaksızın (besleyicisiz) sağlam olarak dökülebilmemesinin mümkün olduğu söylenebilir.

4. GENEL SONUÇLAR

1. Bu çalışmada döküm ağırlığı 4700 Kg olan tek parçalı bir dökümün kuma döküm yöntemi ile GGG70 sınıfı küresel grafitli dökme demir malzemedan dökümü incelenmiştir.
2. Verilen malzeme ve döküm şartları esas alınarak SolidCast döküm simülasyon programı ile yapılan simülasyonlarda dökümün yaklaşık +%4 bir hacimsel değişim (genleşme) etkisi altında katılaşıcağı belirlenmiş ve buna bağlı olarak hacimsel genleşme basıncının etkisi ile besleyici gerekmezsin bu dökümün dökülebileceğı belirlenmiştir.
3. Gerçek dökümhane ortamında kum kalıba yapılan dökümlerde simülasyondan alınan sonuçlara benzer şekilde hiçbir çekme boşluğu ve gözenekliliğe rastlanmamış, kullanılan sembolik besleyiciler de dahil olmak üzere döküm tamamen dolu olarak kalıptan alınmıştır.
4. Bu çalışmanın sonuçları küresel grafitli dökme demirden dökülen bu ve benzer dökümlerde yeterli şartlar oluştuğunda ek besleyici kullanılmadan dökümlerin yalnız yolluk bağlantısı ile sağlam bir şekilde dökülebileceğini göstermiştir. Besleyicisiz dökümler daha az sıvı metal ile daha fazla döküm yapılması (yüksek verim) anlamına geldiğinden gerek rekabet ve kârlılık gerekse çevresel zararlı etkilerin azaltılması açısından önem taşımaktadır.

5. TEŞEKKÜR

Yazarlar bu çalışmanın firma içinde yapılmasına ve sonuçların yayınlanmasına izin veren Gürsetaş Döküm San. Tic. Ltd. Şti. Gebze, Kocaeli, Firmasına teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- 1-C. E. Bates, G. L. Oliver and R. H. Mcswain, AFS Transactions, 86, (1977) 289–306.
- 2-C. J. Margerie, “The Metallurgy of Cast Iron”, edited by B. Lux, I. Minkoff and F. Mollard, (Georgi Publication Comp., St Saphorin, (1975), pp. 723–740.
- 3-ASM Handbook, 1988, Vol.15, Castings, ASM International, Metalspark, Ohio, USA.
- 4-Qiming Chen, Influence of C, Si on volume change of SG iron during solidification computer modelling for hypereutectic and hypoeutectic compositions, journal of materials science letters, 16 (1997), 1288–1290.
- 5-Qiming Chen, E.W.Langer, P.N.Hansen, Volume change during the solidification of SG iron: Comparison between experimental results and simulation, journal of materials science, 32 (1997), 1825 – 1833.
- 6-Fredriksson H., Stjerndahl A., Tinoco J., On the solidification of nodular cast iron and its relation to the expansion and contraction, Materials Science and Engineering, A 413–414, (2005), 363-372.
- 7-The Sorelmetal Book of Ductile Iron, Rio Tinto Iron&Titanium Inc. Montreal, Canada, (2004).
- 8-Doru M. Stefanescu, Solidification and modeling of cast iron—A short history of the defining moments, Materials Science and Engineering A 413–414, (2005), 322–333.