

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖKÜMLERDE BESLEYİCİLERİN İŞLEVİNİN
SÜREÇ BENZEŞİMİ İLE KONTROLÜ

Haydar KAHRAMAN

Ağustos, 2013

İZMİR

DÖKÜMLERDE BESLEYİCİLERİN İŞLEVİNİN SÜREÇ BENZEŞİMİ İLE KONTROLÜ

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı**


Haydar KAHRAMAN

Ağustos, 2013

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

HAYDAR KAHRAMAN, tarafından **PROF. DR. ÜMİT CÖCEN** yönetiminde hazırlanan **“DÖKÜMLERDE BESLEYİCİ İŞLEVİNİN SÜREÇ BENZEŞİMİ İLE KONTROLÜ”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



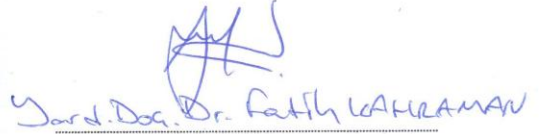
Prof. Dr. Ümit CÖCEN

Yönetici




Prof. Dr. Kazım ÖNEL

Jüri Üyesi



Yard. Doç. Dr. Fatih KAHRAMAN

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR
Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tezimin her aşamasında, göstermiş olduğu yakın ilgi, destek ve anlayıştan dolayı, daima örnek aldığım, çok sevgili danışman hocam Prof. Dr. Ümit CÖCEN'e,

Deneysel çalışmalarımın gerçekleşmesi için bana vermiş oldukları destekten ötürü başta Metalurji ve Malzeme Mühendisi M. Kemal TOZAN ve Metalurji ve Malzeme Mühendisi Ünsal MİNOĞLU olmak üzere tüm Çukurova Kimya Endüstrisi A. Ş. ailesine,

Yaptığı teorik bilgi ve deneysel katkılar ile göstermiş olduğu destekten dolayı Yüksek Makine Mühendis Yalçın ÇAY'a ve tez çalışmalarım sırasında deneme dökümlerinde bana destek veren MEDÖKSAN Döküm Sanayi çalışanlarına,

Kıymetli bilgilerini benimle paylaştıkları ve zamanlarını ayırdıkları için Bölümümüzün araştırma görevlilerine, yüksek lisans ve doktora öğrencisi arkadaşlarıma,

Tüm eğitim ve özel yaşantım boyunca bana maddi ve manevi olarak hiçbir zaman desteğini esirgemeyen aileme ve değerli eşim Metalurji ve Malzeme Yüksek Mühendisi Nihal KAHRAMAN'a

Teşekkürü bir borç bilirim.

Haydar KAHRAMAN

DÖKÜMLERDE BESLEYİCİ İŞLEVİNİN SÜREÇ BENZEŞİMİ İLE KONTROLÜ

ÖZ

Bu çalışmanın amacı halen sanayide kullanılmakta olan besleyici gömleklerinin döküm sırasındaki fonksiyonel davranışlarını belirleyerek bunların döküm süreç benzeşimi programları ile uyumunu belirlemektir. Bu amaçla, döküm süreç benzeşim programındakilere benzer üç farklı şekilde konik, silindirik kapalı ve silindirik açık olmak üzere besleyici gömlek şekli seçilmiştir. Açık silindirik besleyici gömlekler için de yüksek, orta ve düşük olmak üzere üç farklı ekzotermik özelliği karşılaştırmak üzere toplam beş farklı besleyici gömleği deneysel ve benzeşim çalışmaları için seçilmiştir. Deneysel çalışmalar yaş kum kalıplarda küresel grafitli dökme demir numunelerle gerçekleştirilmiştir. Besleyici gömleklerinin derece dış yüzeyine olan mesafeleri ve giriş yolluk kesitleri tüm deneysel çalışmalarda aynı tutulmuştur. Besleyici gömleklerinin merkezlerinden alınan sıcaklık ölçümleri ile reaksiyona girme süresi, en yüksek sıcaklık ve soğuma süreleri belirlenmiştir. Sıcaklık ölçümleri için seramik kaplı S tipi termal çiftler kullanılarak soğuma eğrileri çıkarılmıştır. Ayrıca besleyici gömleklerin döküm öncesi ve sonrası yapısal ve bileşim değişimleri X-ışınları kırınım cihazı kullanılarak kontrol edilmiştir. DT-TG analizleri ile de hava ortamında gömleklerin yanma davranışları incelenmiştir. Tüm bu verilerin döküm benzeşim programı ve uygulamalı sıcaklık ölçümleri ile uyumu irdelenmiştir.

Anahtar sözcükler: Süreç benzeşimi, besleme, besleyici gömlek, sıcaklık ölçümü

VERIFICATION OF THE FUNCTION OF FEEDERS BY CASTING SIMULATION

ABSTRACT

The aim of this study is to determine the functional behavior of feeder sleeve that are currently used in industry and test the accordance with casting simulation program. For these aim three different forms of feeder sleeves such as conical, open and closed cylindrical feeders that are similar to the existing ones in casting process simulation program were chosen. Three different compositions of open cylindrical feeder sleeve were chosen to compare the exothermic properties of feeder sleeves such as high, mild and low exothermic. So experimental and simulation studies carried out for the total of five different feeder sleeves. Experimental studies conducted with the samples of ductile iron in green sand molds. The distances between feeder sleeve and the outer surface of the mold and cross-sectional area of ingates are the same for all experimental studies. Reacting time, maximum temperature and cooling time are determined by taking temperature measurements from centre of feeder sleeve. S type ceramic sleeved thermocouple is used for this purpose. Also the structural and composition change of sleeve before and after casting was determined by X-ray diffraction. The burning of sleeve in air was analyzed by DT-TG analyzer. Verification of all these data comprised with casting simulation program and practical temperature measurements are discussed.

Keywords: Simulation, feeding, feeder sleeve, measuring temperature,

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|--|----------|
| YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU | ii |
| TEŞEKKÜR..... | iii |
| ÖZ..... | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | viii |
| TABLolar LİSTESİ..... | xii |
| BÖLÜM BİR-GİRİŞ..... | 1 |
| BÖLÜM İKİ-TEORİK..... | 4 |
| 2.1 Katılışmaya Giriş | 4 |
| 2.1.1. Katılışma Büzülmesi | 4 |
| 2.1.4 Büzülme Oluşumu..... | 7 |
| 2.2 Besleme Mekanizmaları | 9 |
| 2.2.1. Sıvı Beslemesi | 9 |
| 2.2.2. Kütle Beslemesi..... | 9 |
| 2.2.3. Dentritler Arası Besleme..... | 9 |
| 2.2.4. Patlatma Beslemesi | 10 |
| 2.2.5. Katı Besleme..... | 10 |
| 2.3 Besleyici Tasarımı | 11 |
| 2.3.1 Besleyici Şekli | 12 |
| 2.3.2. Besleyicilerin Boyutlandırılması..... | 13 |
| 2.3.3 Besleyici Veriminin Arttırılması..... | 14 |
| 2.4 Besleyici Gömlek Özellikleri ve İşlevi | 14 |
| 2.5 Döküm Benzeşim programı..... | 16 |
| 2.4.1 Sayısal Yöntemler | 18 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4.2 Benzeşim Programı Girdileri ve Program Çıktılarının Değerlendirilmesi | 22 |
| 2.5 Sıcaklık Ölçümü ve Katılma Eğrileri | 26 |
| BÖLÜM ÜÇ-LİTERATÜR ÖZETİ | 28 |
| BÖLÜM DÖRT-MATERYAL VE YÖNTEM..... | 30 |
| 4.1 Kalıp Tasarımı ve 3 Boyutlu Çizimi | 30 |
| 4.2 Benzeşim Programına Tanıtılması | 33 |
| 4.2.1 Katı Modelin Benzeşim Programına Aktarılması..... | 33 |
| 4.2.2 Benzeşim ve Döküm Parametrelerinin Belirlenmesi..... | 33 |
| 4.4 Dökümlerin Gerçekleştirilmesi ve Sıcaklık Ölçümleri | 36 |
| 4.6 Döküm Öncesi ve Sonrası Gömlek Bileşiminin Belirlenmesi | 38 |
| 4.7 Besleyici Gömlek Isıl Özelliklerinin Karakterizasyonu..... | 39 |
| BÖLÜM BEŞ-ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA..... | 40 |
| 5.1 Benzeşim Programından Sıcaklık Verilerinin Alınması | 41 |
| 5.2. Deneme Döküm Sonuçları | 44 |
| 5.4. Döküm Öncesi ve Sonrası Besleyici Gömlek Faz Analizi..... | 60 |
| 5.4 DT-TG Analizleri | 62 |
| 5.5 Hava Ortamında Gerçekleştirilen Yakma Verileri | 66 |
| BÖLÜM ALTI-SONUÇLAR | 67 |
| KAYNAKLAR | 69 |

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1 Sıvı fazda, katılaşma sırasında ve katı da meydana gelen büzülmenin şematik gösterimi | 5 |
| Şekil 2.2 a) Tümleşik boşluk hatası, b) Dağılmış boşluk c) Merkezi çizgisel boşluk hatası7 | |
| Şekil 2.3 Alaşımın katılaşma eğrisindeki kritik sıvı yüzdesi | 8 |
| Şekil 2.4 Kritik sıvı dağılımını faktörünün büzülme hatasında etkisinin benzeşim programı ile gösterimi | 8 |
| Şekil 2.5. (a) Dentritler arası beslemenin son aşamasında nasıl zorlaştığının ve (b) az miktardaki ötekiğin beslemenin bu son kademesini kolaylaştırmasının şematik gösterimi..... | 10 |
| Şekil 2.6 Katı besleme ve bir döküm içindeki artık sıvının çevresinde oluşan plastik bölgeler..... | 11 |
| Şekil 2.7 Besleyici şekilleri ve metal verimleri, (a) silindirik, (b) yarım küre, (c) kesik koni ve (d) ekzotermik..... | 13 |
| Şekil 2.8 Ekzotermik besleyici kullanımının sıvı çeliğin soğumasına etkisi | 16 |
| Şekil 2.9 Freze tezgahının sonlu elemanlar ile modellenmesi | 19 |
| Şekil 2.10 Dairenin çevresinin sonlu elemanlar yaklaşımı ile bulunması | 20 |
| Şekil 2.11 Döküm parçanın, besleyici gömleklerin ve yolluk sisteminin programa tanıtılması..... | 23 |
| Şekil 2.12 Döküm, besleme aşamaları, katılaşma ve radyografik incelemenin görsel akışı | 24 |
| Şekil 2.13 Geleneksel ve bilgisayar destekli tasarımların karşılaştırılması | 25 |
| Şekil 2.14 a) Termal çift ile soğuma eğrisi çıkarılması, b) Soğuma eğrisi bölgeleri. | 27 |
| Şekil 2.15 Saf metallerin katılaşması | 27 |
| Şekil 3.1 Düşük yoğunluklu ekzotermik-yalıtım özellikli besleyici gömleğin gerçek döküm şartları ve benzeşim programı sonuçlarının karşılaştırması..... | 29 |
| Şekil 4.1 Konik besleyici gömleklerin deneme dökümleri için yapılan 3 boyutlu kalıp tasarımı..... | 31 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.2 Açık silindirik besleyici gömleklerin deneme dökümleri için yapılan 3 boyutlu kalıp tasarımı..... | 32 |
| Şekil 4.3 Kapalı silindirik besleyici gömleklerin deneme dökümleri için yapılan 3 boyutlu kalıp tasarımı..... | 32 |
| Şekil 4.4 a) Kapalı silindirik besleyici gömleğin iç kısmının benzeşim programına tanıtılırken hücrelere ayrılmış olan yüzey görüntüsü, b) Kapalı silindirik besleyici gömleğin iç kısmının benzeşim programına tanıtıldıktan sonraki katı görüntüsü | 34 |
| Şekil 4.5 Programa kayıtlı besleyici gömlekler | 35 |
| Şekil 4.6 Kalıplanmış besleyici gömleklerden sıcaklık ölçüm düzeneği..... | 38 |
| Şekil 4.7 Radyasyon piroetre ve termal çift ile alınan sıcaklık ölçümü düzeneği .. | 39 |
| Şekil 5.1 Konik yüksek ekzotermik ve EXO özellikli besleyici gömlekteki metalin katılaştıktan sonraki çekintileri içeren görüntüsü ve benzeşim programından alınan çekinti verileri | 42 |
| Şekil 5.2 Kapalı silindirik yüksek ekzotermik ve EXO özellikli besleyici gömlekteki metalin katılaştıktan sonraki çekintileri içeren görüntüsü ve benzeşim programından alınan çekinti verileri..... | 42 |
| Şekil 5.3 Açık silindirik orta ve yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin katılaştıktan sonraki çekintileri içeren görüntüsü ve benzeşim programından alınan çekinti verileri..... | 43 |
| Şekil 5.4 Açık silindirik yüksek ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin katılaştıktan sonraki çekintileri içeren görüntüsü ve benzeşim programından alınan çekinti verileri..... | 43 |
| Şekil 5.5 Açık silindirik orta ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin katılaştıktan sonraki çekintileri içeren görüntüsü ve benzeşim programından alınan çekinti verileri..... | 43 |
| Şekil 5.6 Konik besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması..... | 46 |
| Şekil 5.7 Konik besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (Şekil 5.6 A bölgesi)..... | 47 |
| Şekil 5.8 Konik besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (Şekil 5.6 B bölgesi) | 47 |

| | |
|--|----|
| Şekil 5.9 Kapalı silindirik besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması..... | 50 |
| Şekil 5.10 Kapalı silindirik besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (Şekil 5.9 A Bölgesi)..... | 50 |
| Şekil 5.11 Kapalı silindirik besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (Şekil 5.9 B Bölgesi) | 51 |
| Şekil 5.12 Açık silindirik orta ve yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması..... | 52 |
| Şekil 5.13 Açık silindirik orta ve yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (5.11 A Bölgesi)..... | 53 |
| Şekil 5.14 Açık silindirik orta ve yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (5.11 B Bölgesi)..... | 54 |
| Şekil 5.15 Açık silindirik yüksek ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması | 56 |
| Şekil 5.16 Açık silindirik yüksek ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (Şekil 5.15 A Bölgesi)..... | 56 |
| Şekil 5.17 Açık silindirik yüksek ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (Şekil 5.15 B Bölgesi) | 57 |
| Şekil 5.18 Açık silindirik orta ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması..... | 58 |
| Şekil 5.19 Açık silindirik orta ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (5.18 A Bölgesi) | 59 |

| | |
|---|----|
| Şekil 5.20 Açık silindirik orta ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (5.18 B Bölgesi)..... | 59 |
| Şekil 5.21 Döküm öncesi besleyici gömlek içeriğinin faz analizi..... | 60 |
| Şekil 5.22 Hava ortamında yakma sonrası besleyici gömlek içeriğinin faz analizi... | 61 |
| Şekil 5.23 Dökümden sonra besleyici gömlekten alınan numunelerin faz analizi | 62 |
| Şekil 5.24 Konik ve kapalı besleyici gömlek bileşiminin DTA-TGA eğrisi..... | 64 |
| Şekil 5.25 Açık silindirik yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek bileşiminin DTA-TGA eğrisi..... | 64 |
| Şekil 5.26 Açık silindirik orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek bileşiminin DTA-TGA eğrisi..... | 65 |
| Şekil 5.27 Açık silindirik düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlek bileşiminin DTA-TGA eğrisi..... | 65 |
| Şekil 5.28 Konik ve kapalı silindirik gömleklere kullanılan gömlek birleşiminin radyasyon pirometresi ve termal çift sıcaklık değişim grafiği..... | 66 |

TABLULAR LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Tablo 2.1 Bazı metallerin katılma sırasındaki hacim değişimleri | 6 |
| Tablo 3.1 Besleyici gömlek tiplerine göre benzeşim ve gerçek döküm uygulamaları sonuçlarının karşılaştırılması | 28 |
| Tablo 3.1 Besleyici gömlek teknik resimleri, boyutları ve kalıp tasarımı üstten görünüşü..... | 37 |
| Tablo 3.2 Dökümü yapılan küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimi | 38 |
| Tablo 5.1: Benzeşim programından alınan besleyici gömleklere ait özellikler (Novacast, 2013) | 41 |
| Tablo 5.2 Besleyici gömleklerin benzeşim çalışmaları sonucundaki çekintilerin karşılaştırması | 42 |
| Tablo 5.3 Konik besleyici gömleklerin deneme dökümlerinden ve benzeşim programından alınan sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırması | 46 |
| Tablo 5.4 Kapalı silindirik besleyici gömleklerin deneme dökümlerinden ve benzeşim programından alınan sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırması..... | 49 |
| Tablo 5.5 Açık silindirik yüksek ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin deneme dökümlerinden ve benzeşim programından alınan sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırması..... | 55 |
| Tablo 5.6 Açık silindirik orta ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin deneme dökümlerinden ve benzeşim programından alınan sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırması..... | 58 |

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Döküm yöntemi insanoğlunun ilk keşfettiği metal üretim yöntemlerinden biridir. Zaman geçtikçe döküm teknoloji üzerine bir dizi yenilik getirilerek dökülebilecek parça gamı ve metal alaşımı çeşitliliği arttırılmıştır. Seri üretime uydurulması ile geniş boyut aralığındaki parçaların çok çeşitli metal alaşımları ile değişik döküm yöntemleri ve kalıp malzemeleri kullanılarak en az döküm hatası ile üretilebilmesi hedeflenmiştir. Döküm teknolojilerinde getirilen yeniliklerinin neredeyse tamamının hedefi metalin kalıba girerken ve girdikten sonraki katılaşma davranışını kontrol etmek üzere ortaya atılmıştır.

Döküm metalinin katılaşmasını kontrol edebilmek, birçok farklı amaca hizmet eden hatasız döküm parçaların üretimini mümkün kılmaktadır. Bilindiği gibi katılaşmada etkin olan mekanizmalar metal alaşımına, kalıp malzemesine ve döküm şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Bu değişkenlerden biri veya tamamında yapılacak değişiklikler döküm sonuçlarını etkilemekte ve dökülebilecek parça geometrisini değiştirebilmektedir. Tüm bunların yanı sıra özellikle demir alaşımlılarının (grafitli yapıları sahip bazı dökme demirler dışında) bilinen yöntemlerle dökümünde kalıp malzemesi ve alaşımda yapılan tüm geliştirmelere rağmen katılaşma ile meydana gelen büzülmenin önüne geçmek mümkün olmamaktadır. Bu nedenle besleyici olarak adlandırılan ve döküm parça katılaşana kadar sıvı metal deposu gibi davranan kalıp bileşenlerinin kullanımı kaçınılmazdır.

Besleyicilerin, sıvı metal kalıbı doldurup katılaşma başladıktan sonra görevi başlar. Besleyici tasarımlarında hedeflenen, besleyicinin en son katılaşması ve katılaşana kadar etki alanı içerisindeki döküm parçanın tüm kısımlarına içerisindeki sıvı metali ulaştırabilmesidir. Bu nedenle besleyici belirlenirken şeklinin, boyut hesabının ve döküm parçaya bağlantı kısımlarının görevini tam yerine getirecek biçimde tasarlanması gerekir. Ayrıca besleyici verimliliğini değiştiren çeşitli ekler

yapılabilir. Bunlardan en çok bilineni ve en sık kullanılanı besleyici gömleklerin kullanımınıdır. Ekzotermik ve yalıtım esaslı bu gömlekler sayesinde besleyici içerisindeki sıvı metal daha geç katılaşmakta ve metalin ulaşabildiği mesafe artmaktadır. Besleyicilere yapılabilecek bu tip etkiler matematiksel yaklaşımlara da yansımaktadır. Besleyici hesabı için yıllar öncesine dayanan ve hala geçerliliğini koruyan birçok matematiksel yaklaşım bulunmaktadır. Günümüzde ise bu teorilerin neredeyse tamamını içerisinde bulunduran ve deneysel çalışmalara da dayanan döküm benzeşim programları kullanılmaktadır.

Döküm teknolojilerindeki en önemli gelişmelerden biri de döküm benzeşim programlarıdır. Bu programların döküm kalıp tasarımında kullanılması ile kısa sürede en az işçilik, kalıplama maliyeti ve sıvı metal harcanarak en verimli dökümler elde edilebilmektedir. Döküm Benzeşim programlarının, en önemli avantajı ve geleneksel yöntemlerle tecrübelerle dayanarak yapılan döküm kalıp tasarımlarından en büyük farkı deneme dökümü sayısını en aza indirmesidir. Bu sayede zamandan tasarruf edilerek hatasız döküm parçalarının en verimli ve ekonomik olarak dökümünün gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Tasarım aşamasında iken döküm sırasında meydana gelebilecek hatalar tahmin edilerek gerekli önlemler alınabilmektedir. Döküm benzeşim programlarına girilmesi gereken verilerin geliştirilmesi ve çeşitlendirilmesi ise gerçek döküm şartlarına uygunluğu arttırılmıştır. Bu programlar ile gerçek uygulamaların uyumunu belirlemenin yollarından biri de belirlenen bölgelerden gerçek dökümler yapılırken ve tamamlanana kadar sıcaklık ölçümleri alınmasıdır.

Sıcaklık ölçümü yapmak kullanılan termal çiftlere, kaydetme yöntemine ve referans sıcaklıklara bağlı olarak değişebilen zor bir işlemdir. Termal çiftlerin çalışma prensibi iki farklı metal arasında sıcaklık değişimi ile değişen mesafenin direnç değişimi olarak okunmasına dayanır. Bu değişimlerin kalibre edilmesi ve uygun tanımlayıcılara bağlanması ile sıcaklık değerleri okunabilir. Sıcaklık ölçümünde, belli sıcaklık aralıklarında farklı termal çiftlerin kullanılması gerekir. Aksi halde ya termal çiftlere zarar verilir ve değer okunamaz ya da yanlış değerlerin okunmasına sebep olur.

Bu çalışmada döküm Benzeşim programlarının içerdiği besleyici kısmı ile döküm uygulamalarındaki uyum araştırılmıştır. Bu amaçla sanayide sıkça kullanılmakta olan üç farklı ekzotermik karaktere sahip besleyici gömleklerin içerisindeki metalin sıcaklık eğrileri çıkarmak üzere deneyler tasarlanmıştır. Metal alaşımı olarak EN-GJS-500 küresel grafitli dökme demir alaşımı seçilmiştir. Döküm yöntemi olarak ise yaş kum kalıplama yöntemi tercih edilmiştir. Öncelikle belirlenen parametreler ile döküm Benzeşim programında denemeler yapılmış ve besleyici içerisinden seçilen noktalardan sıcaklık eğrileri çıkarılmıştır. Benzeşim programından elde edilen bu verilere dayanarak dökümhane ortamında sıcaklık verileri almak üzere Besleyici gömlek üst derecede yatay ve giriş yollukları alt derecede kalacak biçimde kalıp tasarımı yapılmıştır. Besleyici içerisindeki belirlenen bölgelere sıcaklık verilerini almak üzere seramik kaplı termal çiftler yerleştirilmiştir. Termal çiftlerin döküm ve katılma sırasında belirlenen bölgeden kaymalarını ve zarar görmelerini engellemek için kendi kılıflarının üzerine uçları açık kalacak biçimde seramik ve grafit kılıflar geçirilerek sabitlenmiştir. Sıcaklık verileri saniyede dört veri olarak veri kaydediciye aktarılmıştır. Buradan elde edilen veriler sıcaklık eğrilerini çıkarmak üzere kullanılmıştır. Ayrıca mevcut besleyici gömleklerin hava ortamında ne kadar sıcaklığa çıktıkları kızılötesi ışın pirometresi ve seramik kılıflı termal çiftler ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Tüm bu sıcaklık verileri, gömleklerden alınan numunelerin DTA-TGA incelemelerinden elde edilen ısı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Böylece tüm deneysel verilerin benzeşim programından elde edilen sıcaklık verileri ile ne derece örtüştüğü belirlenmeye çalışılmıştır. Tüm bunların yanı sıra besleyici gömleklerden döküm öncesi ve döküm sonrası numuneler alınarak gömleğin görevini tamamladıktan sonra ne gibi yapısal değişikliklere uğradığını belirlemek üzere X-RD ile faz incelemeleri yapılmıştır.

BÖLÜM İKİ

TEORİK

2.1 Katılaşmaya Giriş

2.1.1 Katılaşma Büzülmesi

Metalik parçanın kullanım sırasındaki özelliklerinin kontrolü içyapı ile sağlanır. İçyapı kontrolü ise metal katılaşması sırasında oluşur. Döküm malzemelerin özelliklerinin doğru belirlenebilmesi için katılaşma olayının iyi bilinmesi gerekir. Sıvı metal katılaştıktan sonra ortaya çıkan yapı birincil yapı olarak bilinir. Döküm parçalara daha sonra uygulanacak ısı ve termokimyasal işlemler ile oluşan içyapılara ise ikincil içyapı denir (Aran, 2007).

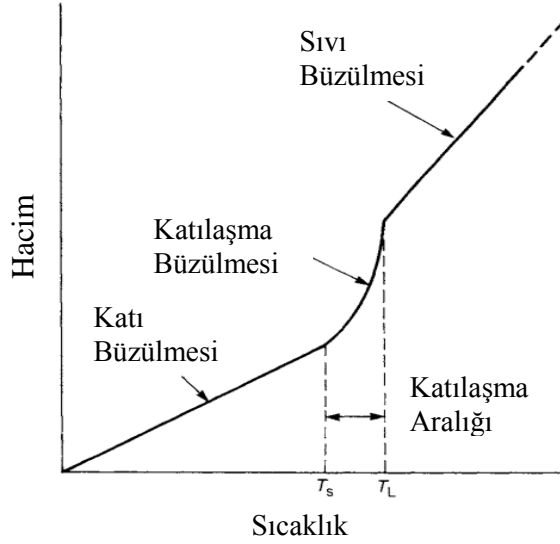
Katılaşma çok küçük tanelerin veya kristallerin çekirdeklenmesi ile başlayarak kristalografik ve ısı koşullarının etkisi altında büyümesi şeklinde gelişerek tamamlanır. Katılaşma sonrası metalin kristal yapısı ve sağlam dökülebilmesi alaşımın yapısal ve fiziksel özelliklerini de barındıran birçok etkene bağlıdır. Örneğin, çelik, bronz ve dökme demir farklı besleme karakterine sahiptir.(Beely, 2001).

Döküm sıcaklığından soğuma sırasında sıvı, sıvı-katı ve katı aşamalarında büzülme meydana gelir (Şekil 2.1). Katılaşma ve soğuma sırasında Tablo 2.1’de gösterildiği gibi bazıları dışında metal alaşımlarının tamamı büzülme gösterir. Bu hacim azalması üç aşamada olur:

Sıvı büzülmesi; sıvı metalin döküm sıcaklığından itibaren katılaşana kadar göstermiş olduğu büzülmedir. Buradaki sıvı metal kaybını karşılayabilmek için sıvı metal kaynağı kullanmak gerekir. Bu, döküm sırasında yolluğa ilave metal dökmek de olabilir, besleyici içerisindeki metalin hareketi ile de sağlanabilir.

Katı-Sıvı Büzülmesi; Sıvı katı geçişi sırasında kristal yapının oluşumu sırasında donma noktasında meydana gelen büzülmedir. Bu sırada sıvı metal en büyük yoğunluğuna sahiptir. Döküm boşluğunun tam dolması için bu bölgede besleme ihtiyacı doğar. Besleme eksiklikleri sonucu büzülme hatalarının meydana gelmesi kaçınılmazdır.

Katı Büzülmesi; Katılaşma tamamlandıktan sonra katı metalde meydana gelen büzülmedir. Model çekmesi olarak da bilinir ve model hazırlanması sırasında hesaba katılarak giderilmeye çalışılır. Burada hazırlanacak modelin dökümden, metalin alaşımına göre belirlenmiş oranlarda daha büyük olması gerekir (Campbell, 2003).



Şekil 2.1 Sıvı fazda, katılaşma sırasında ve katı halde meydana gelen büzülmenin şematik gösterimi (Campbell, 2003)

Böylece metal aşırı ısıyı kaybederken, katı hale dönüşürken ve katı halde oda sıcaklığına soğurken kendini çeker, boyutça büzülür. Bu nedenle döküm katılaşırken dikkate alınması gereken üç önemli husus vardır;

- Katı tanelerin büyümesi
- Isının yayılması ve taşınımı
- Boyutsal değişimler.

Tablo 2.1 Bazı metallerin katılaşma sırasındaki hacim değişimleri (Campbell, 2003)

| Metal | Erime Noktası (°C) | Sıvı yoğunluk (kg/m³) | Katı Yoğunluk (kg/m³) | Hacim Değişimi (%) |
|--------------|---------------------------|---|---|---------------------------|
| Al | 660 | 2368 | 2550 | 7,14 |
| Au | 1063 | 17380 | 18280 | 5,47 |
| Co | 1495 | 7750 | 8180 | 5,26 |
| Cu | 1083 | 7938 | 8382 | 5,3 |
| Ni | 1453 | 7790 | 8210 | 5,11 |
| Pb | 327 | 10665 | 11020 | 3,22 |
| Fe | 1536 | 7035 | 7265 | 3,16 |
| Ti | 303 | 11200 | | 2,2 |
| Mg | 651 | 1590 | 1655 | 4,1 |
| Zn | 420 | 6577 | | 4,08 |
| Bi | 271 | 10034 | 9701 | -3,32 |
| Si | 1410 | 2525 | | -2,9 |

Dökümde katılaşma sürecini karmaşık hale getiren daha birçok değişken vardır. Dökümün yapısı ve sağlamlığı esas olarak katılaşma mekanizmasına bağlı olmasının yanında alaşımın bileşimi ve fiziksel özellikleri gibi birçok faktörden etkilenir.

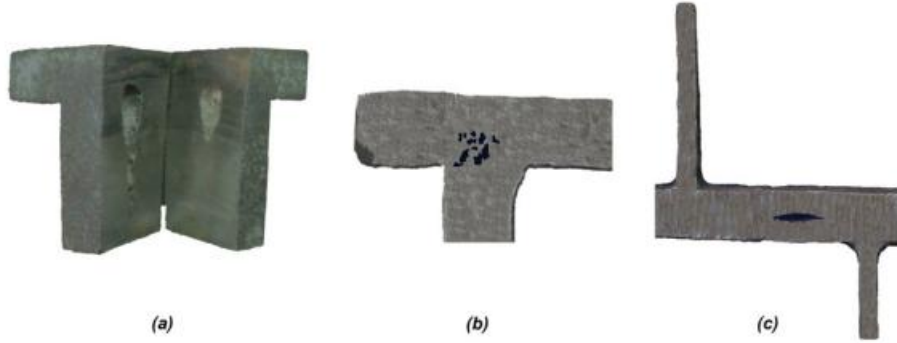
Bunlar;

- Kalıp malzemesi ve kalınlığı
- Kalıbın şekli
- Metal (döküm) kalınlığı
- Metal özellikleri; ısı iletkenliği, ergime ısısı, ısıl genleşme ve katılaşma sıcaklık aralığı
- Kalıptan atmosfere ısı taşınımı
- Aşılama veya titreşim gibi yöntemlerle tane boyutunun kontrolü

gibi hususlardır. Özetlemek gerekirse, dökümün yapısı ve sağlamlığını katılaşan metale ait özellikler, kalıp özellikleri ve ısıl koşullar etkilemektedir. Bu değişkenler tüm katılaşma süreci boyunca etkisini göstereceğinden, büyük dikkat gerektirir. Akışkanlık, sıcak yırtılma eğilimi, gaz sorunu gibi diğer hususların katılaşma ile ilişkileri de ayrıca dikkate alınmalıdır (Beely, 2001).

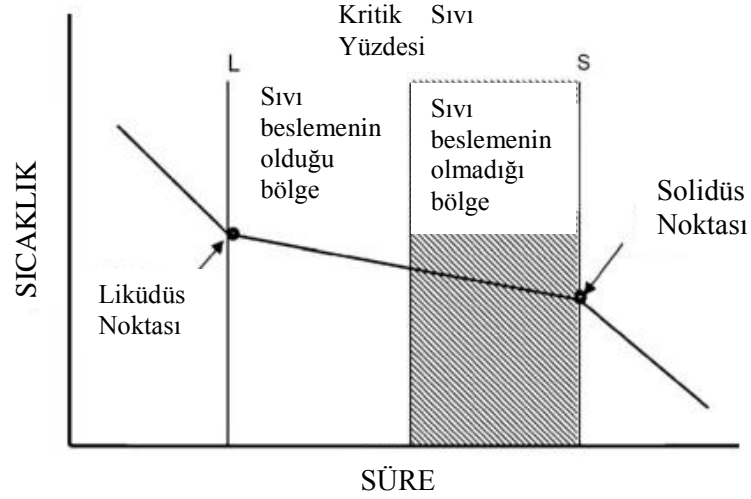
2.1.4 Büzülme Oluşumu

Katılma sırasında etrafında kabuk oluşturarak katılan ve sıcak bölge oluşturan kısımlar oluşabilir. Bu kısımlara katılma tamamlandıktan sonra yeterli sıvı metal iletilmemesinden dolayı büzülme boşluğu olarak kalabilirler (Kayıkçı ve Akar, 2007). Şekil 2.2’te bu hatalardan bazıları gösterilmektedir. Sıcak itibaren katılan bir besleme yolunun uygulanabilmesi ile bu bölgelerin beslenebilmesi mümkün olabilmektedir. Bu da ya önceden bilenen matematiksel hesaplama yöntemleriyle ya da bilgisayar programları ile öngörülerek gerekli besleyici tasarımı ile giderilmektedir (Saturia, Gada, Sharma ve diğer, 2012)

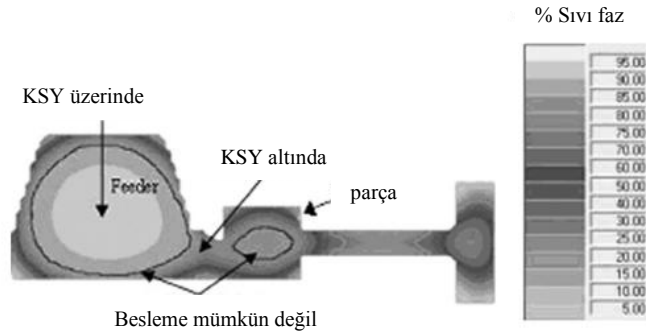


Şekil 2.2 a) Tümlşik boşluk hatası, b) Dağılmış boşluk c) Merkezi çizgisel boşluk hatası (Saturia, Gada, Sharma ve diğer, 2012)

Büzülmeler makro ve mikro olmak üzere iki şekilde meydana gelmektedir. Makro çekintilerin öngörülmesinde bilgisayar programları kullanılırken istenen en temel veri KSY (kritik sıvı yüzdesi) değeridir. KSY değiştirilebilir aralıklarda alınmaktadır. Tam olarak Şekil 2.3’te gösterildiği gibi solidüs noktasının hemen öncesinde bulunmaktadır. Belirtilen aralıktan yüzde aralığından daha düşük sıvı oranlarına sahip bölgelere sıvı metalin ulaşamayacağına ve büzülme hatasının görülme ihtimalinin olduğunu göstermektedir. Şekil 2.4’da görüldüğü gibi bu aralığın altında kalan bölgelerde ise büzülme hatasının görülmeceğini ifade etmektedir (Kumruoğlu ve Özer, 2008).



Şekil 2.3 Alaşımın katılaşma eğrisindeki kritik sıvı yüzdesi (Kumruoğlu ve Özer, 2008)



Şekil 2.4 Kritik sıvı yüzdesi faktörünün büzülme hatasında etkisinin benzeşim programı ile gösterimi (Kumruoğlu ve Özer, 2008)

Makro büzülme hatalarının yanı sıra bir de mikro büzülme hataları bulunmaktadır. Mikro büzülme hataları özellikle çelikler gibi geniş katılaşma aralığına sahip olan katılaşması sırasında görülmektedir. Niyama ve arkadaşları tarafından geliştirilen basit bir eşitlikle mikro büzülme hataları tahmin edilebilmektedir. Niyama kriteri G/\sqrt{R} olarak ifade edilir. G sıcaklık gradyanını, R ise katılaşma sonrası soğuma hızını göstermektedir. Alaşım kompozisyonu fonksiyonu olarak hesaplamaya katılabilen Niyama Kriteri'nin belli bir değerinin altında olması o bölgede mikro porozite oluşabileceğini ifade etmektedir (Tavakoli ve Davami, 2008).

2.2 Besleme Mekanizmaları

Metal katılaşması sırasında döküm içerisinde meydana gelecek olan negatif basınç farkları ve hidrostatik çekmeler beslemeyi güçleştiren etmenlerdir. Bu etkileri azaltabilecek 5 mekanizma vardır. Bu mekanizmalardan biri veya birkaçının devreye girmesi ile sıvı metaldeki gerilmeler giderilerek, döküm hatalarının önüne geçilmiş olur.

2.2.1 Sıvı Beslemesi

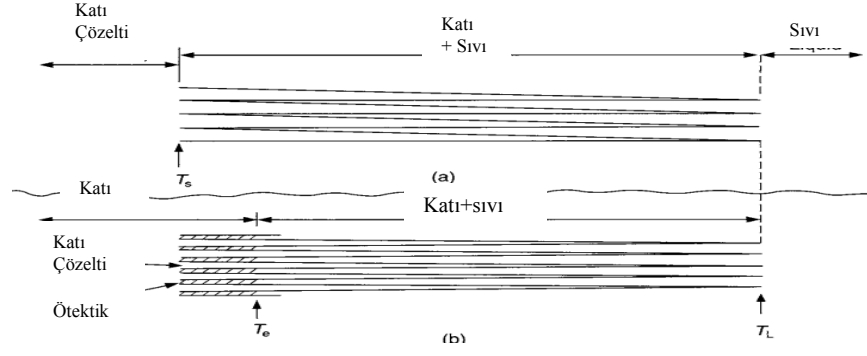
Beslenmesi gereken bölgede oluşan basınç farkı besleyici içerisindeki sıvı metal ile giderilebilir. Besleyici tasarımı ve özellikleri yeterli basıncı oluşturma için önemlidir.

2.2.2 Kütle Beslemesi

Katılaşan metal ile sıvı haldeki metal karışımının hareketine dayanır. Kütle beslemesi sıvı metal içerisinde eş eksenli tanelerin bulunması ile söz konusu olur. Bu aşamada yapılacak tane küçültücü etkiler kütle hareketini kolaylaştıracağından besleme mesafesini artırabilir. Fakat oluşan katı tanelerin birbirine tutunması besleme engellerinin oluşmasına neden olabilir.

2.2.3 Dentritler Arası Besleme

Sıvı-katı metal karışımında katı tanelerin ağırlıklı olduğu hamurumsu sıvının hareketine dayanan besleme mekanizmasıdır. Katılaşmaya başlayan metaldeki dentritler arasında hareket etmeye çalışan hamurumsu yapının hareketi kılcal borudaki sıvı akışına benzetilebilir. Gerek kılcal boru etkisi ve gerekse dentritler arası sıvı metal hareketinin katılaşmanın sonuna doğru giderek zorlaşması nedeniyle de dentritler veya taneler arasında gözeneklerin oluşması kaçınılmazdır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 (a) Dendritler arası beslemenin son aşamasında nasıl zorlaştığının ve (b) az miktardaki ötektik beslemenin bu son kademesini kolaylaştırmasının şematik gösterimi (Campbel, 2003)

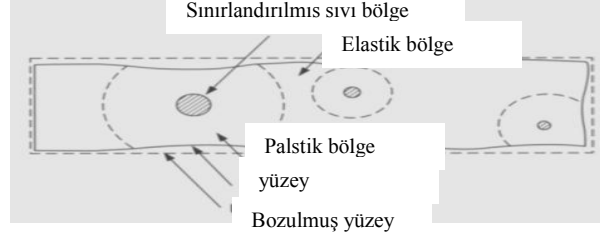
Viskozite, katılaşıma büzülmesi, katılaşıma hızı, dendritler arası mesafe, hamurumsu bölgenin uzunluğu gibi parametreler bu bölgedeki basıncı kontrol eder. Ötektik sıvılardaki ötektik miktarı akış mesafesini arttırmaktadır. Bu nedenle ötektik alaşımların dökümü daha kolay olabilmektedir.

2.2.4 Patlatma Beslemesi

Özellikle kütle beslemesinde veya dendritler arası beslemede katılaşılan kolların birleşmesi sıvı metal akışı için engel teşkil etmektedir. Katılaşıma sırasında oluşan gerilmeler bu engellerin dayanımını aşacak seviyeye gelmesiyle engeller yıkılarak arkasında bulunan ve beslenemeyen bölgelerin beslenmesi söz konusu olur.

2.2.5 Kıatı Besleme

Katılaşımanın son evrelerinde bazı kısımların hızlı katılaşıması izole bölgelerin oluşmasına neden olur. Bu şartlarla ayrılan bölgedeki sıvıda yüksek hidrostatik basınçların meydana gelir. Bu gerilmeler de, sıvıyı çevreleyen kabuğun plastik olarak içe doğru deforme olmasına neden olurken gözenek oluşumunu kısmen de olsa önlenir.



Şekil 2.6 Katı besleme ve bir döküm içindeki artık sıvının çevresinde oluşan plastik bölgeler (Campbel, 2003)

Dökümlerde katılma ve besleme mekanizmaları birlikte dikkate alındığında özellikle katılma sırasında ortaya çıkan büzülme sonucu taneler ve dentritler arasında oluşabilecek hataların giderilmesi için besleyici kullanımı gerekli hale gelmektedir (Campbell, 2003).

2.3. Besleyici Tasarımı

Besleyicilerin işlevlerini yerine getirebilmesi için gerek tasarımında gerekse de uygulamalarında aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır;

1. Besleyici, dökümle aynı zamanda veya daha sonra katılmalıdır. Bu “ısı iletimi” veya “katılma süresi” ölçütüdür.
2. Besleyici dökümün hacimsel büzülme gereksinimlerini karşılamaya yetecek kadar sıvı metal sağlamalıdır. Bu da genellikle “hacim” veya “besleme kapasitesi” ölçütü olarak bilinir. Bu iki ölçüte ilave olarak termal, geometrik ve basınç gibi dökümün sağlıklı katılması için mutlaka gerekli olan ölçütler de dikkate alınmalıdır. Bu ölçütlere ait kurallar aşağıdaki gibi özetlenebilir:
3. Döküm ile besleyici arasındaki bağlantı (boyun) sıcak nokta oluşturmamalıdır. Kısacası, boyun besleyiciden daha uzun katılma süresine sahip olmamalıdır. Bu oldukça sık göz ardı edilen bir gereksinimdir. Bu durum göz önüne alınmadığında “besleyici altı büzülme gözeneklerinin” oluşumuna yol açmaktadır. Bir başka ifade ile besleyici içinde oluşan boşluk daima dökümün en üst noktasından daha üst seviyede olmalıdır.
4. Besleme metalinin, gereksinilen bölgeye ulaşmasını sağlayacak bir yol bulunmalıdır. Besleme yolu gereksinimleri:
 - Katılma besleyiciye doğru yönelmiş olmalıdır,
 - Minimum sıcaklık gradyanı şartı sağlanmalıdır,

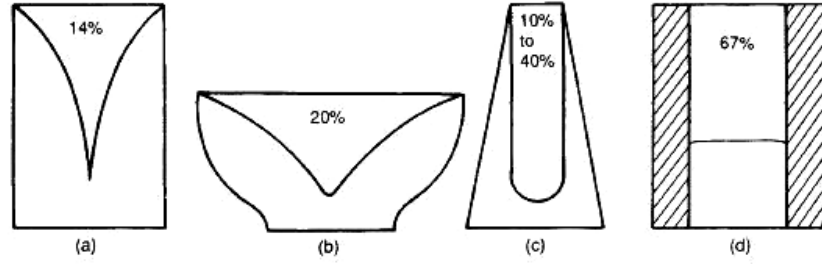
- Besleme mesafesi yeterli olmalıdır,
 - Çil kullanımı ile çubuk ve plakalarda besleme mesafesi düzenlenmelidir.
5. Sıvı metalin akışı doğru yönde olmalıdır ve besleme malzemesinin akmasına yetecek kadar yeterli basınç farkı olmalıdır.
 6. Döküm içindeki tüm noktalarda boşlukların oluşumunu ve büyümesini bastırmaya yetecek basınç olmalıdır.

Dökümün katılaşması sırasında besleyicinin işlevini yerine getirebilmesi için aşağıdaki değişkenler göz önünde bulundurulmalıdır.

- 1-Besleyicinin şekli
- 2-Besleyicinin boyutu
- 3-Besleyicinin konumu
- 4-Dökümlerin birleştirilmesi,
- 5-Besleyicinin döküme birleştirilmesi
- 6-Soğutma elemanı kullanımı
- 7-Yalıtkan ve ekzotermik bileşiklerin kullanımı
- 8-Bağlantı kesitlerinin durumu (Beely, 2001)

2.3.1 Besleyici Şekli

En iyi besleyici özellikleri küre biçimdeki besleyiciler ile sağlanabilir. Fakat kürenin son katılaşılan kısmının merkezinin olması ve kalıplama zorlukları kullanılabilirliğini engellemektedir. Bu nedenle silindirik şekle en yakın olan tasarımlar kullanılmaya çalışılmaktadır. Şekil 2.7'de kullanılan besleyici şekillerinden bazıları görülmektedir. Besleyici şeklinin değişmesi verimliliği değiştirmektedir. Fakat döküm parçaya bağlantı durumuna göre en uygun besleyici şekli seçimi yapılmaktadır.



Şekil 2.7 Besleyici şekilleri ve metal verimleri, (a) silindirik, (b) yarım küre, (c) kesik koni ve (d) ekzotermik (Beely, 2001)

2.3.2 Besleyicilerin Boyutlandırılması

Uygun besleyici boyutlarını belirlemek üzere çeşitli teoremler ortaya atılmıştır. 1920’de Fugar tarafından katılaşmanın soğumaya açık yüzeylerden başlayacağı ve yüzey hacim oranının önemli olduğunu savunan teorimi ortaya atılmıştır.

1930’larda Chvorinov Fugarın yaklaşımını katılaşma hızı üzerinden yorumlayarak besleyici tasarımında halen kullanılan en temel bağıntıyı ortaya koymuştur (Candeğer, 2001).

$$t=k(V/A)^2$$

t=katılaşma süresi (s)

V=Katılaşan dökümün hacmi (mm³)

A=Katılaşan dökümün yüzey alanı (mm²)

K=Kalıp malzemesi, metal ve sıcaklığa bağlı sabitler (s/mm)

1940’larda geliştirilen NRL metodu kullanılarak besleyici tasarımı için besleyici ve döküm arasında uygun hacim oranları grafiklerinden de boyut tayini yapılmaktadır (Candeğer, 2001).

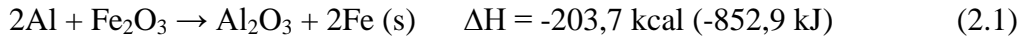
1950’lerde Wlodawer, Chvorinov yaklaşımını geliştirerek ekzotermik ve yalıtım özellikli besleyici gömleklerinin de hesaplama katılmasını sağlamıştır (Candeğer, 2001).

2.3.3 Besleyici Veriminin Arttırılması

Besleyici verimini arttırmak üzere genel olarak üç yöntem kullanılır;

- Elektrik arkı ile ısıtma (genellikle ingot döküm için kullanılır)
- Dökümden sonra aralıklarla sıvı metal ilave edilmesi (dökümcüler tarafından gerek döküm ağzından gerekse besleyici üzerinden sıklıkla uygulanan işlemdir.)
- Ekzotermik ve yalıtım özellikli gömleklerin kullanımı.

Ekzotermik beslemenin esası tipik termit reaksiyonu ile sağlanmaktadır. İnce toz alüminyum ve uygun metal oksit bileşimi ile sağlanır. Ekzotermik özellikli gömleklerin kullanımı besleyici verimini %80'e kadar artırabilmektedir (Sorelmetal, 2000).



Ekzotermik bileşikler iki yolla metale uygulanır;

- Bu bileşikler doğrudan besleyiciye katılır. Burada besleyicinin ve dökümün boyutu ile katkı kontrolü ile besleme hareketi kontrol edilir. Aşırı ısınmış reaksiyon ürününün döküm metaliyle uyumlu olması ile bu yolla da metal kazanılır.
- Besleyicilerin üretiminde doğrudan egzotermik katkı malzemelerinin kullanılması

2.4 Besleyici Gömlek Özellikleri ve İşlevi

Besleyici gömlekler özellikle çelik dökümlerde sıkça kullanılan kalıp elemanlarıdır. Ön şekillendirilmiş olmaları besleyici tasarımı ve kalıplanmasında dökümcülere büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Tercih edilecek döküm modülüne ve bağlantı şekline çok çeşitli şekil ve boyutta besleyici gömlekler üretilebilmektedir.

Besleyici gömlekler işlevlerine göre sınıflandırılmakta ve bileşimleri buna göre belirlenmektedir. Besleyici gömlekler 3 ana karakteristik özellik altında toplanmaktadır.

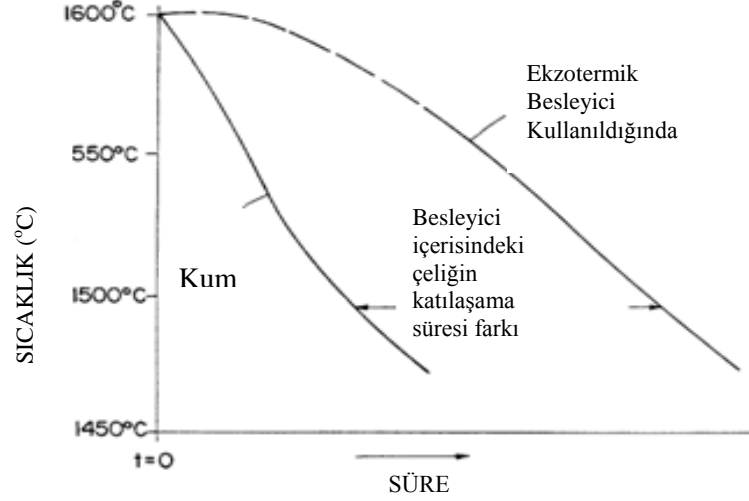
- Yalıtım özellikli besleyici gömlekler
- Ekzotermik özellikli besleyici gömlek
- Hem yalıtım hem de ekzotermik özellikli besleyici gömlekler.

Yalıtım özellikli besleyici gömleklerin temel bileşeni yalıtım özelliği olan seramik yün ve liflerdir. Ayrıca gömlek yoğunluğunu ayarlamak üzere kullanılan dolgu ve bağlayıcılardan oluşmaktadır (Twardowska ve Aufderheide, 2002).

Ekzotermik özellikli besleyici gömleklerde ise enerji kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Ekzotermik özellikli gömleklerde enerji kaynağı olarak metalotermik tepkimelere başvurulur. Tepkime 2.1 ve 2.2’de belirtildiği gibi alüminyum ve demir oksit arasında gerçekleşen tepkime metalotermik tepkimeler arasında en çok bilinenidir. Bu nedenle ekzotermik özellikli gömleklerin içeriğinde değişik oranlarda, boyutlarda ve şekillerde alüminyum tozu enerji kaynağı olarak kullanılır. Demir oksit ve mangan oksit gibi çeşitli oksitler oksitleyici olarak kullanılır. Bu iki bileşen arasındaki tepkimeyi başlatmak ve/veya daha düşük sıcaklıklarda oluşmasını sağlamak için de flor esaslı ateşleyiciler kullanılmaktadır. Flor, florakarbon polimerler gibi organik olarak veya sodyum florür, alüminyum florür, potasyum florür ve sodyum alüminyum florür gibi inorganik halde kullanılmaktadır (Neu ve Gough, 1993).

Bütün besleyici gömlek tiplerinin asıl amacı, gömleksiz kullanımdan daha az metali daha uzun süre sıvı tutabilecek besleme sistemini sağlamaktır. Şekil 2.8’de ekzotermik gömlek içerisindeki ve kumdaki karbon çeliğinin soğuma rejimi verilmektedir. Sıvı metal hareketinin en kolay olduğu, soğuma eğrisinin düzleşmeye başlamadan hemen önceki kısma kum içerisindeki sıvı çelik daha hızlı ulaşırken gömlek içerisindeki sıvı metal nispeten daha uzun sürede ulaşmaktadır. Bu da katılaşma tamamlanana kadar döküm parça için sıvı metal deposu olarak kullanılan besleyicinin daha geç katılaşmasını sağlamaktadır. Ayrıca besleyici gömlekler sahip oldukları ısıtma ve yalıtım özelliği sayesinde daha az metalle daha uzun mesafeyi

besleyebilmektedir. Böylece bilinen tüm yöntemlerle yapılan besleyici hesaplarında bu gömlekler sayesinde belirgin bir etkin besleme mesafesi artışı olmuştur (Menon, 1997).



Şekil 2.8 Ekzotermik besleyici kullanımının sıvı çeliğin soğumasına etkisi (Menon, 1997)

2.5 Döküm Benzeşim Programı

Karmaşık geometri ve farklı kesit kalınlıklarına sahip döküm parçaların yolluk besleyici tasarımı oldukça zordur ve yoğun mühendislik bilgi ve becerisi gerektirmektedir. Fakat bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmelere bağlı olarak döküm süreçlerinin modellenmesi, döküm mikro ve makro yapılarının önemli ölçüde ön görülmesi döküm benzeşim programları sayesinde sağlanmaktadır. Döküm süreçlerinin modellenmesi, program kullanıcısının sanal ortamda kalıp doldurulurken ve doldurma yapıldıktan sonra kalıp içerisinde neler olduğu hakkında hızlı ve doğru öngörülebilmesi için gerekli bir matematiksel yöntemdir. Piyasada birçok döküm benzeşim programı mevcuttur, MagmaSoft, SolidCast, ProCast, Pam-Quick Cast, Nova Flow&Solid ve Vulcan döküm benzeşim programları bunlar arasında yaygın olarak bilinen programlardır. Döküm Benzeşim programları; yeni bir teknoloji olarak döküm kalıplama tasarımını kolay, ekonomik ve doğru yapabilmeye olanak sağlayarak deneme ve yanılma maliyetini ortadan kaldırmaktadır. Bütün tasarım ve analizlerin bilgisayar ortamında yapılması ile model ve kalıp hazırlama ve boşuna hurda malzeme üretmeye gerek kalmaksızın dökümhane ortamında deneme-yanılma

yapmayı ve gereksiz sakat ve hurda döküm üretmeyi ortadan kaldırmaktadır. Benzeşim programlarını kullanarak 3 boyutlu katı model üzerinde, kaç tane ve hangi ebatta besleyicinin gerekli olduğunu ve nereye yerleştirileceği belirlenerek, yolluk-besleyici tasarımı bilgisayar üzerinde yapılabilir. Tasarımı tamamlanan parçanın benzeşim programında uygulamaları yapılarak doldurma, katılma ve çekinti oluşumu gibi birçok sonuç görülebilir. Bu sonuçlardan faydalanarak gerekiyorsa tasarımda mümkün olan en iyi ve en ekonomik döküm için revizyon yapılabilir. Ayrıca parça tasarımında optimizasyon sistem tarafından optimum kalite ve verim elde edilecek şekilde otomatik olarak yapılabilir. Tüm bunların hepsi çok kısa zamanda yapılabilir. Yani model, kalıp ve ilk döküm yapıldığında yüksek oranda başarı ve yüksek oranda verim elde edilir. Böylece zamanında teslimat, tek seferde başarılı üretim ve döküm parça kullanım süresinin uzamasıyla daha yüksek kalite ve daha düşük maliyet sağlanabilir (Çolak ve Kayıkçı, 2002).

Döküm benzeşim programı; dökümle ilgili kişiler için yüksek kaliteli döküm parçaları üretmek konusunda başarının anahtarı durumundadır. Günümüz yoğun rekabet ortamında, döküm üreticileri kaliteyi arttırmak, maliyeti düşürmek ve teslimat gecikmelerini önlemek zorundadır. Bu sebeplerden dolayı özellikle yüksek kaliteli parça üreten dökümhanelerde benzeşim programlarının kullanımı her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Literatürde döküm benzeşim programlarıyla tasarımı yapılarak çok iyi sonuçlar alınmış birçok çalışma mevcuttur. Döküm süreç modellemesini yapmak için gerekli işlem basamaklarını sıralamak gerekirse sırasıyla;

- Malzeme ve özelliklerinin seçimi
- Döküm ve kalıp modeli oluşturma
- Modelin hücrelere ayrılması ve benzeşim
- Sonuçların değerlendirilmesi şeklindedir.

Sonuçları inceledikten sonra isteğe bağlı olarak veya gerekiyorsa yeniden gözden geçirme ve tekrar benzeşim yapılabilir. Benzeşim uygulamaları denemeleri kolay tekrarlanabilen bir işlem olduğundan istediğimiz parametreyi değiştirerek benzeşim

programı uygulamalarına devam edebiliriz ve optimum tasarımı kısa zamanda maliyetsiz belirlenebilir (Çolak ve Kayıkçı, 2002).

2.4.1 Sayısal Yöntemler

Teorik kesin sonucun elde edilemediği pratikte bir çok mühendislik problemi vardır. Bu durum ya sistemi temsil eden diferansiyel denklemlerin karmaşıklığı ya da sınır ve başlangıç koşullarının uygulanabilirliğinin güçlüğünden kaynaklanmaktadır. Bu tür sorunların üstesinden gelmek için sayısal yöntemlerden faydalanılmaktadır. Analitik yöntemin tersine bu yöntemler sadece ayırık düğüm noktalarında teorik kesin sonuca yaklaşım gösterebilmektedir. Her hangi bir sayısal yöntemin uygulanma aşamalarındaki ilk adım sürekli ortamın ayrıklaştırılması yani elemanlara bölünmesidir. Bu durum analizi yapılacak bölgenin küçük elemanlara ve bunları birleştiren düğüm noktalarına bölünmesidir. Sayısal yöntemler için, sonlu elemanlar, sonlu farklar ve sınır elemanlar gibi sınıflandırmalar yapılmaktadır (Arıkan ve Sahir, 2013).

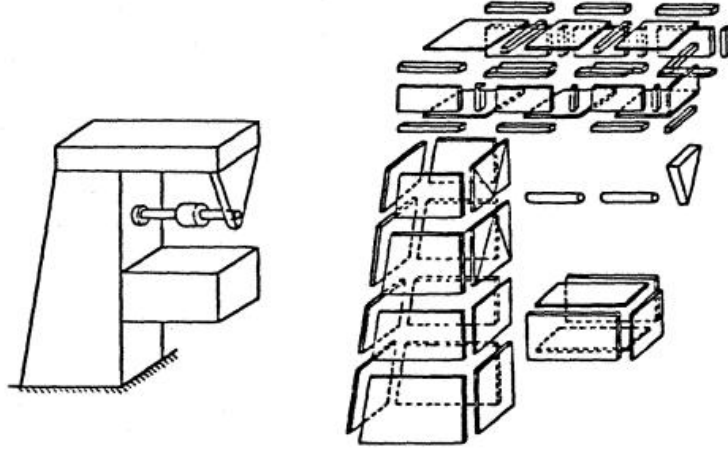
2.4.1.1 Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodu, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde etkin olarak kullanılan bir sayısal yöntemdir. İlk defa 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilmiş olan bu metodun, daha sonraki on yıl içerisinde uygulamalı bilimler ve mühendislik problemlerinin çözümünde de kullanılabileceği anlaşılmıştır. Daha sonraki yıllarda ise sonlu elemanlar metodu ve çözüm teknikleri hızlı gelişmeler kaydetmiş ve günümüzde birçok pratik problemin çözümü için kullanılan en iyi yöntemlerden birisi olmuştur. Metodun değişik mühendislik alanları için bu kadar popüler olmasının ana nedenlerinden birisi genel bir bilgisayar programının yalnız giriş verilerini değiştirerek herhangi bir özel problemin çözümü için kullanılabilmesidir.

Sonlu elemanlar metodundaki temel düşünce, karmaşık bir probleme, problemi basite indirgeyerek bir çözüm bulmaktır. Esas problemin daha basit bir probleme

indirgenmiş olması nedeni ile kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmekte, ancak bu sonucun çözüm için daha fazla çaba harcayarak iyileştirilmesi ve kesin sonuca çok yaklaşılması, hatta kesin sonuca ulaşılması mümkün olmaktadır. Elde bulunan konvansiyonel matematiksel araçların kesin sonucu, hatta yaklaşık bir sonucu dahi bulmakta yetersiz kalması durumunda ise sonlu elemanlar metodu kullanılabilir tek metot olmaktadır.

Sonlu elemanlar metodunda, çözüm bölgesi, çok sayıda, basit, küçük, birbirine bağlı, sonlu eleman adı verilen alt bölgelere ayrılmaktadır. Bu metodun, freze tezgahı gibi karmaşık bir geometrik şekli modellemek için nasıl kullanılacağı Şekil 2.9'de verilmiştir. Böyle bir tezgahın çalışması esnasında oluşacak olan yorulmalar, gerilmeleri kesin olarak bulmak hemen hemen imkansız olduğundan, tezgah şekilde görülen parçalara ayrılarak modellenmiştir (Arıkan ve Sahir, 2013).



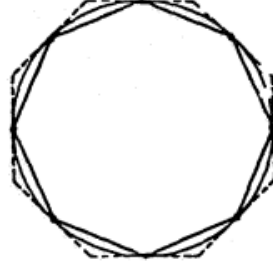
Şekil 2.9 Freze tezgahının sonlu elemanlar ile modellenmesi

Metoda sonlu elemanlar isminin verilmesi yeni ise de, sonlu elemanlar düşüncesi gerçekte günümüzden birkaç yüzyıl önce kullanılmıştır. İlk matematikçiler bir dairenin çevresini, Şekil 2.10'da görüldüğü gibi, daireyi çokgene indirgeyerek (problemi basitleştirerek) hesaplamışlardır. Bu çokgenin her kenarı bir sonlu elemandır. Bu basit çözümün incelenmesi sonucunda genel sonlu eleman uygulamaları için de geçerli olan iki özellik ortaya çıkmaktadır.

- Dairenin dışındaki ve içindeki çokgenlerin çevreleri, dairenin çevresinin üst ve alt sınırlarını belirler.

- Çokgenin kenar sayısının artırılmasıyla, bu yöntemle bulunacak olan yaklaşık çözüm

İki özellikten biri kullanılarak gerçek çözüme ulaşacaktır (Arıkan ve Sahir, 2013) .



Şekil 2.10 Dairenin çevresinin sonlu elemanlar yaklaşımı ile bulunması

Sınır integral eşitliklerinin çözümünde sınır değer uygulamalarında kısmi diferansiyel denklemler kullanan klasik yöntemlerdir. “Sınırlı Elemanlar Metodu”(SEM) sınırlı integral uygulamalarının herhangi bir nümerik çözümlemenin yaklaşımında sıklıkla kullanılmaktadır

Sınırlı değerler problemlerinin SEM ile yaklaşık çözümlerinde ayırt edici özelliği bu yöntemle diferansiyel denklemlerin daha doğru çözüldüğü ve sınır parametrelerinin kesin olarak belirlenebilmesidir.

Sınırlı elemanlar metodunun sonlu elemanlar metodu gibi diğer nümerik metotlara göre bazı avantajları bulunmaktadır. Bunlar

- Problem alanı içerisinde sadece sınırları tanımlamak gerekmektedir. Özellikle iki boyutlu uygulamalarda tanımlı eğriler ile sınır bölgelerini belirlemek mümkün olmaktadır
- Sınır bölgeler dışında kalan belirlenmemiş bölgelerin yaklaşımda, sınırlı bölgelerden elde edilen verilerden yararlanılabilmektedir.
- Bazı uygulamalarda, fiziksel verilerin problem alanı içerisindeki çözümlenmesi mümkün olmayabilir. Bu gibi durumlarda sınır değerleri

çözümü, onların türevi ile gerçekleştirilir. Sınır değerlerin integral çözümünden elde edilen bu verilerde daha çok SEM yaklaşımlarında kullanılır.

- Problem alanı içerisindeki yaklaşımlar diğer çözümlere göre daha yakın veriler sunmaktadır. Sınırlandırılmayan durumlarda bu yaklaşımlar çözümden uzaklaşabilmektedir (Costabel, 1986).

2.4.1.2 Sonlu Farklar Metodu

Sonlu farklar metodunda her bir düğüm noktası için diferansiyel denklemler ya ilgili diğer fiziksel büyüklükler ilgili fiziksel büyüklüklerle ilişkilendirilir. Daha sonra türevler fark denklemleri sayısal anlamdaki analizleri, ilgilenilen bölge ile yer değiştirilmektedir. Sonlu elemanlar yönteminde ise cebirsel denklem sisteminin elde edilmesi için fark denklemleri yerine integral formülasyonları kullanılmaktadır.

2.4.1.3 Hacim Kontrol Sonlu Farklar Metodu

20. yüzyılın ortalarında dijital bilgisayar teknolojilerinin gelişimi, katı ve sıvıların davranışlarının nümerik olarak çözümünü arttırmıştır. İki tip en çok bilinen metot bulunmaktadır. Bunlar;

- Sonlu farklar metodu (SFM)
- Sonlu elemanlar metodu (SEM)

Eskiden, problem alanı düğüm noktaları ve Taylor serilerine yakın olan ana eşitlik bileşenleri tarafından belirlenmekteydi. Sonradan, alan köşelerine ve diğer önemli noktalara yerleştirilmiş geometrik şekillerle tanımlanan hücre elemanları ile belirlendi ve ana eşitlikteki terimler düğüm noktalarındaki elementlerin değeri ile tanımlandı. Düğüm noktalarının bulunma yerleri ve seçilme biçimleri metotlar arasındaki farkı oluşturmaktadır. Sınırlandırılmış farklar metodunda koordinat doğrultuları ile yerleri eşit olarak belirlenmiş düğümlerle karşılaşılır. Sonlu elemanlar metodunda ise sınırlama yoktur ve rastgele seçilmiş noktaların birbirleri ile uyumu üzerinde durulur. Böylece geometrik olarak sınırlandırılmış bölgelerin

bilgisayar destekli hesaplanması için sonlu farklar metoduna başvurmak, sonlu elemanlar metodunu kullanmakta daha uygun görülmektedir.

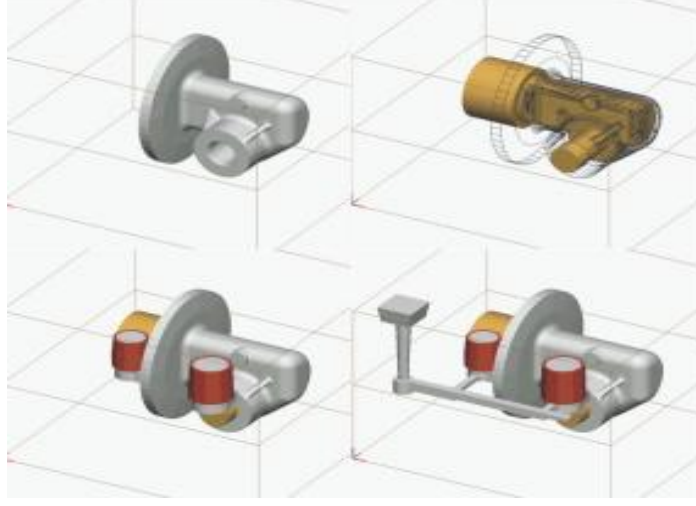
Sonlu farklar metodunun akışkanlar mekaniği problemlerinin çözümünde uygulanması hacim kontrol sonlu farklar metodu (HKSFM) olarak isimlendirilir. Bu yaklaşımda, kontrol edilen hacim belirlenen düğüm noktaları etrafında kalan hücrelerin hacmidir. Taylor serilerinde her biri ayrı olarak ele alınan denklem ile farklı hücrelerin hacim kontrolleri ile yaklaşımları yapılır. Bu metodun dikkat çeken özelliği sistemin fiziği ile doğrudan bağlantı kurmasıdır. Sıvı ve katıların ana başlangıç noktasındaki denklemleri yüzey ve hacim oranındaki değişimi ortaya koymasından görülebilir. Fiziksel özelliklere uyumunun iyi olmasında rağmen, HKSFM'nin sonlu farklardan kaynaklanan bazı basit geometrik kısıtlamaları bulunmaktadır. Bu eksikliğin üstesinden gelmek için öncü çalışmalar 1966 yılında Winslow tarafından Hacim Kontrol Sonlu Elemanlar Metodu (HKSEM) adı altında yapılmıştır. Bu yöntemin önemli özelliği, düğüm noktaları etrafındaki hacmi kontrol etmek üzere kurulacak olan hücrelerin serbest şekilli ve geometrik sınırlardan bağımsız olarak rastgele seçilebilmesidir. Bu yapılar sayesinde, sonlu eleman eklemeleri ile hücreler yüzeyleri arasında hacim kontrolü yapılabilmektedir. Bu dengenin kontrolünde fiziksel denklemlerin kullanılması ve düğüm noktalarının tanımlanmasının kontrolü önem kazanmaktadır. Hacim kontrol sonlu elemanlar metodunun elektromanyetik alan problemleri, ısı akışı ve akışkanlar mekaniği ile katı mekanik problemlerinde uygulanması mümkündür (Voller, 2009).

2.4.2 Benzeşim Programı Girdileri ve Program Çıktılarının Değerlendirilmesi

Benzeşim programlarının ana girdisi döküm boşluğunu modelleyen 3 boyutlu bilgisayar destekli katı modelin elde edilmesidir. Bu modelde öncelikle döküm parçanın tüm ayrıntıları çekme, talaşlı imalat ve çarpılma payları göz önüne bulundurulurken modellenir. Bu katı modele maça, besleyici ve yolluk sistemleri ile diğer kalıplama yardımcı elemanları bağlanır (Şekil 2.11).

Benzeşim programlarının diğer girdileri ise kullanılacak malzeme özelliklerini (döküm alaşımı, kalıp, maça, besleyici gömlekler, soğutma elemanları, kalıp

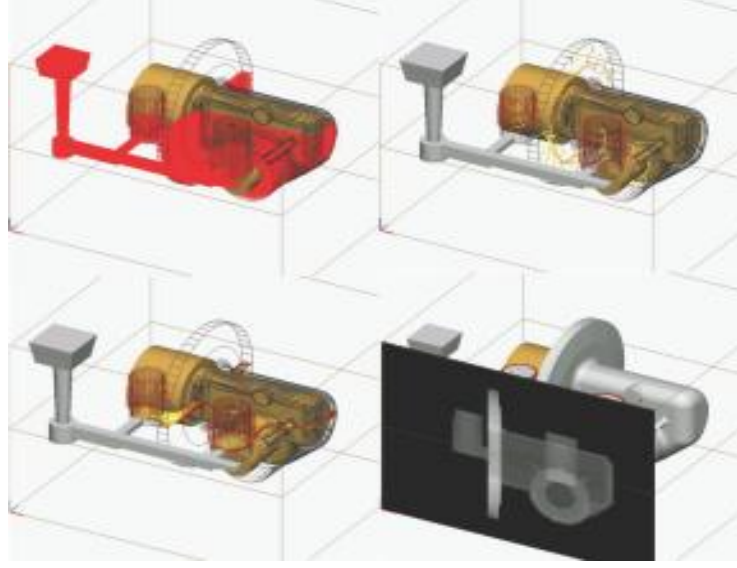
boşluğunun durumu, kalıp kaplamaları gibi.) ve işlem parametrelerini (kalıplama yöntemi, metal-kalıp arası ısı akış sabiti, döküm sıcaklığı, tüm bileşenlerin ilk sıcaklığı, döküm şekli gibi) kapsar.



Şekil 2.11 Döküm parçanın, besleyici gömleklerin ve yolluk sisteminin programa tanıtılması (Ravi, 2008)

Benzeşim programlarının temel çıktıları dökümün, katılaşmanın ve oda sıcaklığına kadar olan soğumanın görsel akışıdır (Şekil 2.12). Kalıp dolum benzeşimleri, toplam dolma süresi, kum hatalarına neden olan kalıp erozyonlarının, tamamlanmamış dolma ve hava sıkışması gibi durumların ön görülmesine yardımcı olur.

Gaz sıkışmalarından dolayı gaz hataları yetersiz gaz çıkışı nedeniyle meydana gelir ve ön görülmesi güçtür. Döküm benzeşim programları sıcaklık gradyanı ve soğuma hızını gösterir. Bu sayede Niyama veya diğer kriterlere bağlı olan çekintileri ön görmek mümkün olur. Oda sıcaklığına kadar olan katılaşmanın benzeşim programı mümkündür. Bu da mikro yapının, mekanik özelliklerin, artık gerilmelerin ve çarpılmaların öngörülmesini sağlar. Çoklu fiziksel modellerin kullanılması döküm sırasında, katılaşma ve gerilmeler için anlık yaklaşımların ortaya konmasını sağlar. Bu da özellikle ince kesitli metal dökümlerin elde edildiği yüksek basınçlı metal kalıba döküm uygulamalarında oldukça kullanışlı olmaktadır (Ravi, 2008).



Şekil 2.12 Döküm, besleme aşamaları, katılaşma ve radyografik incelemenin görsel akışı (Ravi, 2008)

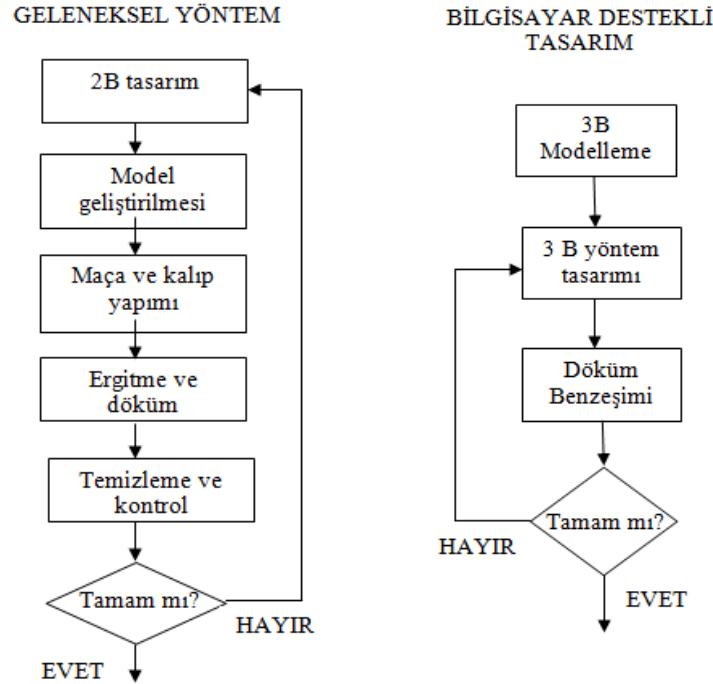
Benzeşim programlarının uygulanmasında, sadece girilen tasarım yöntemine göre döküm kalitesini ve verimliliğini vermektedir. Bu da deneme dökümleri sonucu elde edilecek sonuçlardan daha aydınlatıcı verilere ulaşılmasını sağlar. Fakat programlar sonuca göre yeni metotlar geliştiremez. Sonuçların tecrübeli elemanlar tarafından yorumlanması kullanılabilirliği ve sürdürülebilir iyileşmenin sağlanması açısından gereklidir. Benzeşim programları döküm mühendislerinin üretebilme kabiliyetlerini artırma ve başarı oranlarını arttırmaktadır, fakat kesinlikle tecrübeli mühendislerin yerine geçemez. Aşağıda kısaca döküm benzeşim programlarının üç önemli uygulaması bulunmaktadır.

Döküm sırasındaki sorunları analiz etme; Dökümde, beklenmedik ya da bilenenden çok farklı hataları (gaz boşlukları, büzülme hataları, soğuk katlanmalar, sıcak yırtılmalar, artık gerilmeler, erken katılaşma gibi) önlemek için veya döküm verimini arttırmak için gereklidir. Bu yöntem dökümhanelerde parçanın modellenmesi ve benzeşim programında kullanılır. Benzeşim programındaki ile gerçek dökümde meydana gelen hataların yerleri ve büyüklükleri karşılaştırılarak, program parametrelerinin doğrulanması gerekebilir. Birçok döküm hatasının nedeni açıkça ortaya konabilir. Örneğin, yetersiz besleyici kullanımı ve yanlış yolluk tasarımında nelerle karşılaşılacağını gösterir. Benzeşim, genellikle denemeler sırasında incelemesi zor bölgelerdeki hataları ortaya koyar. Tersine, çok fazla sayıda

veya büyüklükte besleyici kullanımının döküm verimini nasıl düşüreceği de benzeşimler ile görülebilir.

Yöntem Optimizasyonu; Yeni parçaların dökümünde ve var olan parçaların üretiminin deneme dökümleri yapılmadan geliştirilmesinde tercih edilir. Yöntem geliştirilmesinde (parçanın kalıptaki duruşunun belirlenmesinde, kalıp tasarımında, besleyici, besleme yardımcıları, soğutma elemanları, kalıp kaplamaları ve yolluklarda) oluşabilecek hataların bilgisayar üzerinde denenerek giderilmesidir. İstenen kalite ve verim elde edilene kadar denemeler gerçekleştirilebilir. Mevcut dökümlerde yapılacak küçük iyileştirmeler, büyük miktardaki üretimlerde belirgin malzeme, enerji, donanım ve iş gücü kaynağı tasarrufu sağlar (Şekil 2.13).

Benzeşim büyük ağırlıktaki parçaların geliştirilmesinde deneme ve tamir maliyetleri göz önüne alındığında kritik öneme sahiptir. Çok az program yolluk ve besleyicilerin döküme bağlanması algoritmasını otomatik olarak çözer (Ravi, 2008).



Şekil 2.13 Geleneksel ve bilgisayar destekli tasarımların karşılaştırılması (Ravi, 2008)

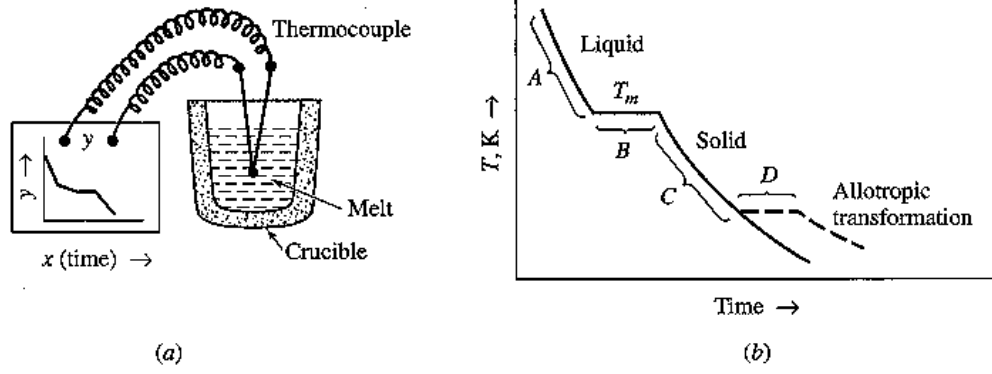
Parça tasarımının geliştirilmesi; parçaların büyük oranda dökülebilirliğini arttırmak ve sonuçta parçada meydana gelecek boyut değişiminin etkilerinin ön görülmesine yardımcı olur. Parçaların, üretim tasarımı sırasındaki döküm

benzeşiminde yüzeysel hataların önceden tespit edilmesini sağlar. Örneğin, çekinti ve soğuk katlanma hatalarına yatkın olan, çok ince ve kalın kesitlerin birleştiği bölgeler sahip olan parçaların analizinde kullanılır. Döküm aşamasında, verimi düşüren ek besleyici kullanımı ve fazladan işleme gibi pahalı önlemlere gerek kalmadan üretimin sağlanabilmesi için kullanılır. Parça tasarımında malzeme özelliklerini değiştirmeyecek küçük değişikliklerin yapılması üretilebilirliği artırmaktadır. (Ravi, 2008)

2.5 Sıcaklık Ölçümü ve Katılma Eğrileri

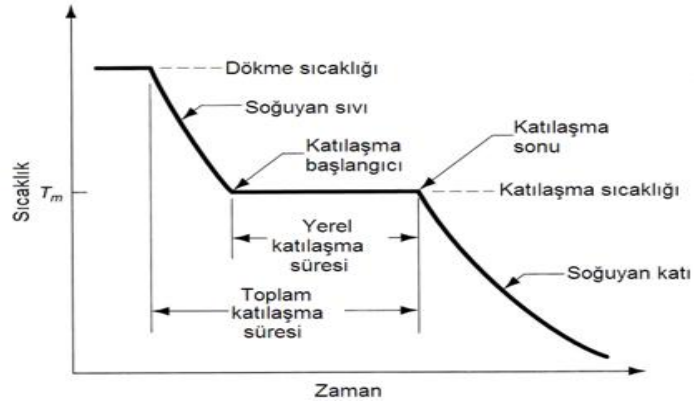
Alaşımın bir sıcaklık aralığında soğumaları sıvı ile katı arasında, saf metal durumunda olduğu gibi belirli bir sınır olmadığını gösterir. Alaşımın katılma kalıp yüzeylerinde başlar ve saf metallerdeki gibi içeriye doğru büyür. Saf metal ve alaşımların katılmaları arasındaki benzerlik burada biter. Alaşımın donma başlaması merkeze doğru ilerler. Dendrit büyümeleri devam ederken arkalarında sıvı odacıklar bırakır ki bu sıvılar daha fazla ısı ortamdan uzaklaştırıldıktan sonra katılırlar. Alaşımın katılması saf metallerden farklı olarak katı ve sıvı metallerin bir arada bulunduğu bir bandın merkeze doğru ilerlemesi şeklinde gelişir.

Dengeli soğuma sırasında sıvı iç enerjisini azaltacak şekilde yavaşça ısı verir, Şekil 2.14 (b-A). Bu T_E sıcaklığına kadar devam eder. ΔT kadar soğumaya **aşırı (alt) soğuma** denir ve sıvı metalin çeşitli yerlerinde çekirdeklerin oluşması için gereklidir. Aynı kristalografik oryantasyonda çok sayıda atomun toplanması ile çekirdek büyürken ve katı-sıvı dönüşümü ile ergime ısıyı açığa çıktığından bu sırada sıcaklık sabit kalır, Şekil 2.14 (b-B). Tüm sıvı katıldığında sıcaklık yeniden düşmeye başlar ve katının ısı enerjisi serbest kalır, Şekil 2.14 (b-C)).



Şekil 2.14 a) Termal çift ile soğuma eğrisi çıkarılması, b) Soğuma eğrisi bölgeleri

Katılaşmanın herhangi bir anında dökümün bir bölümünde sıvı ve katı birlikte yer almaktadır (Şekil 2.15). Buna göre alaşımlar soğurken donmanın başlama noktası dalgalar halinde merkeze doğru ilerler. Katılaşmanın sonu ise daima belli bir zaman aralığı ile soğuma başlamasının arkasından gelir. Yani katılaşma bir yerde başlayıp bittiğinde soğumanın başlamadığı yerler vardır ve sonlanması daha uzun sürer.



Şekil 2.15 Saf metallerin katılaşması (Aran, 2007)

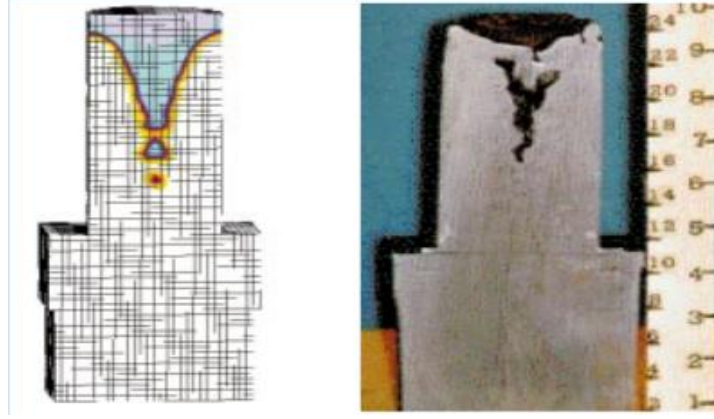
BÖLÜM ÜÇ

LİTERATÜR ÖZETİ

2000 yılında besleyici gömlek üreticisi bir firma tarafından yapılan çalışmada, yalıtım ve/veya ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin yüzeyler arası ısı geçiş sabiti, ısıl iletkenlik, özgül ısı ve yoğunluğu gibi termofiziksel sıvı metal testleri, DT-TG analizleri, DSC analizleri ve “Laser Holometrix and Guarded Hot Plate” testi ile belirlenmiştir. Sıvı metal denemeleri sırasında döküm kalıbının çeşitli bölgelerine yerleştirilen termal çiftlerden sıcaklık ölçümü alınarak yapılmıştır. Bu testler sonucunda elde edilen veriler matematiksel yaklaşımlar olarak döküm benzeşim programına aktarılmıştır. Daha sonra bu program kullanılarak besleyici tasarımları yapılmış ve benzeşim-gerçek döküm şartları karşılaştırılması yapılmıştır. Deneysel çalışmalar düşük yoğunluklu yalıtım özellikli, orta yoğunluklu ekzotermik-yalıtım özellikli ve düşük yoğunluklu yalıtım-ekzotermik özellikli besleyici gömlekler ile yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 3.1’de verilmiştir. En yakın sonuç %8’lik bir hata ile düşük yoğunluklu ekzotermik-yalıtım özellikli besleyici gömlek döküm denemesinden elde edilmiştir. Şekil 3.1’de düşük yoğunluklu ekzotermik-yalıtım özellikli besleyici gömleğin gerçek döküm şartları ve benzeşim programı karşılaştırması bulunmaktadır (Foseco Foundry, 2000).

Tablo 3.1 Besleyici gömlek tiplerine göre benzeşim ve gerçek döküm uygulamaları sonuçlarının karşılaştırılması (Foseco Foundry, 2000)

| Gömlek Tipi | Benzeşim Programı ile Öngörülen Çekinti (%) | Gerçek dökümler Sonucunda Oluşan Çekinti (%) |
|---|--|---|
| Düşük yoğunluklu yalıtım özellikli | 32 | 36 |
| Orta yoğunluklu ekzotermik-yalıtım özellikli | 19 | 22 |
| Düşük yoğunluklu yalıtım-ekzotermik özellikli | 37 | 40 |



Şekil 3.1 Düşük yoğunluklu ekzotermik-yalıtım özellikli besleyici gömleğin gerçek döküm şartları ve benzeşim programı sonuçlarının karşılaştırması (Foseco Foundry, 2000)

Kumruoğlu ve Özer, 2008 yılında yayınladıkları çalışmada döküm benzeşim programlarında besleyici tasarımı için önemli bir değişken olan KSY (kritik sıvı yüzdesi) “CLF (critical liquid fraction)” etkisi üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarını GGG 50 küresel grafitli dökme demir üzerinde yapmışlardır. KSY değeri küresel grafitli dökme demirler için 20 ile 80 aralığında değişmektedir. Bu aralıkta en uygun değer seçilmesi en verimli besleyici tasarımı yapabilmek için büyük önem taşımaktadır. Dökümhane şartlarında nem, sıcaklık, kalıp kumu kalitesi, eritme koşulları gibi birçok değişken bulunmaktadır. Bu değişkenlerin her dökümhane için farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle KSY değerinin her dökümhane kendi içinde yapılacak uygulamalar ile belirlenmesi doğru besleyici tasarımı, uygun besleyici gömlek seçimi için gereklidir. Döküm benzeşim programında KSY değerinin düşük değerlere doğru çekilmesi katılaşmayı kolaylaştırmakta ve besleyici gömlek kullanımı ile verim artışı ortaya çıkarmaktadır. Besleyici gömleklerin benzeşim programları ile doğru kullanımını sağlayabilmek için doğru KSY değerleri ile çalışmak gerekmektedir. Araştırmacılar SOLIDCAST ve NOVACAST olmak üzere iki farklı program üzerinde KSY değerini hesaplayan matematiksel bağıntılar ile çalışmışlardır. Sonuç olarak verimli besleyici tasarımı için benzeşim programı üzerinden uygun hücre sayısı ile en az % 10 tolerans içeren bir KSY değeri ile çalışmanın doğru sonuçlar çıkaracağı sonucuna varmışlardır (Kumruoğlu ve Özer, 2008)

BÖLÜM DÖRT

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmanın amacı NovaCast Flow&Solid döküm benzeşim programında kayıtlı bulunan besleyici gömleklere ait verilerin yapılan deney tasarımları ve karakterizasyon çalışmaları ile gerçek döküm şartlarına uygunluğunu tespit etmektir. Bölüm İki ve Bölüm Üç'te açıklandığı gibi yapılan çalışma ile benzer çalışmalara literatürde karşılaşılmamıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda genellikle döküm benzeşim programının katılma analizinde gerçek döküm çalışmalarına benzerliği incelenmiştir. Bu nedenle çalışılan konu ile ilgili yakın çalışmalar göz önünde bulundurularak deney tasarımları yapılmaya çalışılmıştır.

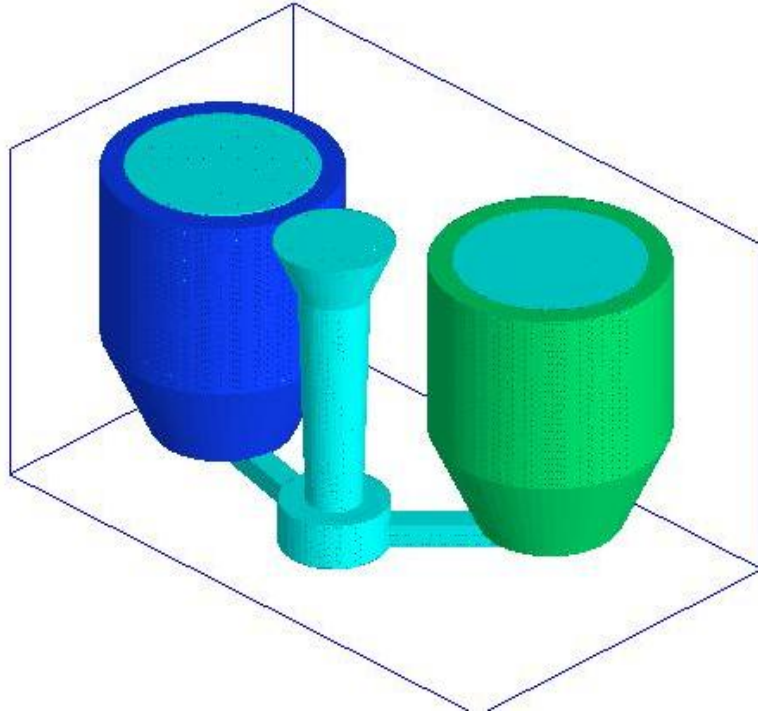
Bu amaçla öncelikle döküm benzeşim programı çalışmaları için sanal ortamda kalıp çalışmaları yapılmış ve çalışmaların benzeşim uygulamaları yapılmıştır. Döküm benzeşim programı çalışmaları Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Simülasyon Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Ardından programda kayıtlı bulunan ve benzeşim çalışmaları sonucunda elde edilen veriler gerçek uygulamalarla karşılaştırılmıştır. Besleyici gömleklerin üretimi ve radyasyon pirometresi çalışmaları Çukurova Kimya Endüstrisi A.Ş. Ar-Ge laboratuvarlarında yapılmıştır. Sıvı metal döküm çalışmaları Medöksan Döküm Sanayi Ltd. Şti. firmasında yürütülmüştür. X ışınları kırınım ve DT-TG analizleri için de Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarından yararlanılmıştır.

4.1 Kalıp Tasarımı ve 3 Boyutlu Çizimi

Kalıp tasarımları bilgisayar ortamında iki farklı katı modelleme programı kullanılarak yapılmıştır. Her kalıpta iki farklı firmaya ait besleyici gömlek birlikte dökülecek biçimde tasarım yapılmıştır. Besleyici içerisinde bulunan metal, besleyici gömleklere, yatay ve düşey yolluklar ayrı ayrı modellenmiştir. Daha sonra oluşturulan bu modellerin tamamı birleştirilerek kalıp boşluğu oluşturulmuştur.

Oluşturulan model benzeşim programı tarafından algılanabilecek “.stl” (stereolitografi) uzantılı olarak kaydedilmiştir.

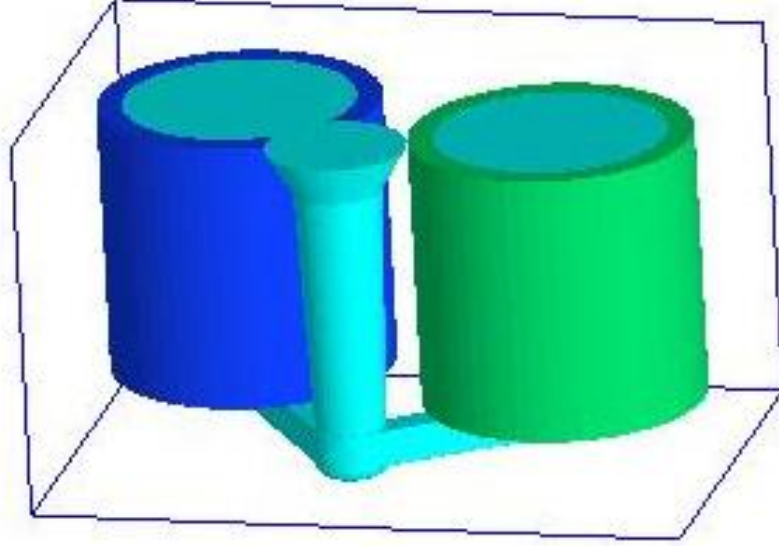
Konik, kapalı silindirik ve açık silindirik olmak üzere üç farklı şekil ve boyuttaki besleyicinin modellemeleri yapılmıştır. Şekil 4.1’de konik besleyiciye ait olan kalıp tasarımı modellenmesi görülmektedir.



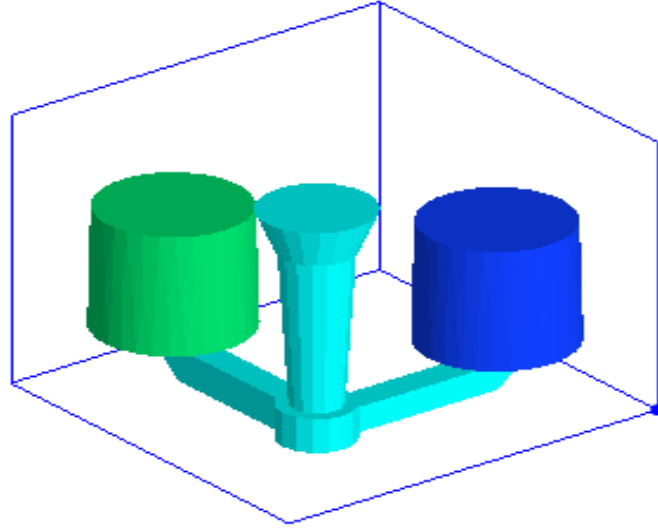
Şekil 4.1 Konik besleyici gömleklerin deneme dökümleri için yapılan 3 boyutlu kalıp tasarımı

Açık silindirik besleyici gömleğin üç boyutlu modellemeleri Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Açık silindirik besleyici gömlekler yüksek, orta ve düşük olmak üzere üç farklı ekzotermik özelliği karşılaştırmak için yapılan deney tasarımlarında kullanılmıştır. Yüksek-orta, orta-düşük ve yüksek-düşük ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin karşılaştırmalı benzeşim çalışmaları Şekil 4.2’deki kalıp tasarımı kullanılarak yapılmıştır. Yapılan kalıp tasarımları daha sonra sıvı metal denemelerinde de kullanılmıştır.

Kapalı silindirik besleyici gömleğin kalıp tasarımı da Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Açık silindirik besleyici gömlelerin deneme dökümleri için yapılan 3 boyutlu kalıp tasarımı



Şekil 4.3 Kapalı silindirik besleyici gömlelerin deneme dökümleri için yapılan 3 boyutlu kalıp tasarımı

4.2 Benzeşim Programına Tanıtılması

4.2.1 Katı Modelin Benzeşim Programına Aktarılması

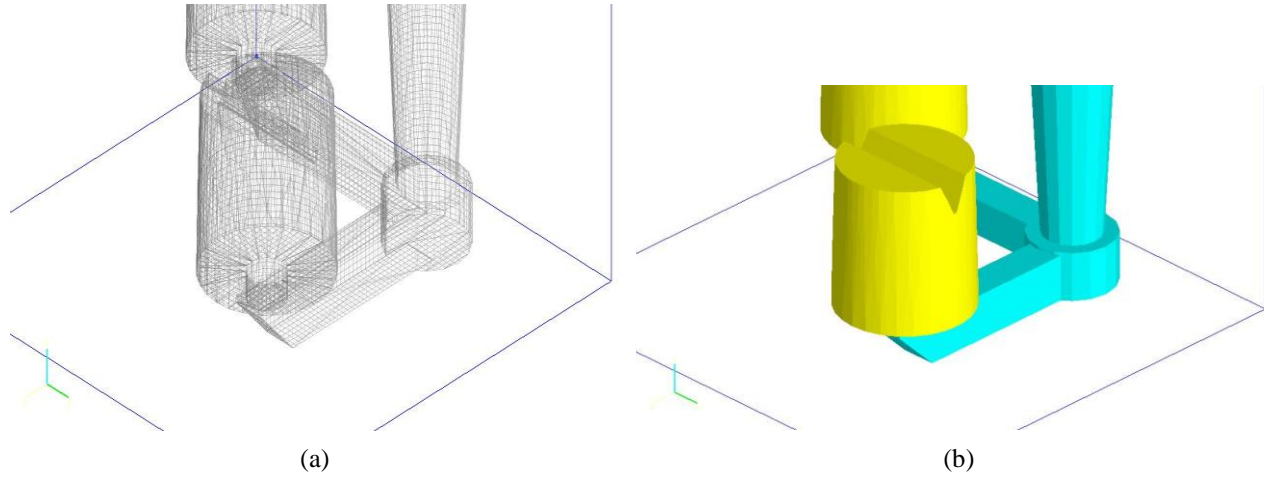
3 boyutlu olarak katı modelleme programları ile çizilen kalıp boşluğu “.stl” uzantılı olarak ile benzeşim programına aktarılır. Bu sırada birleştirilen kalıp boşluğu bileşenleri programa ayrı ayrı tanıtılır. Tanıtılan bileşenlerin tamamı daha önce katı modelleme programında yüzey teması halinde olan kısımlara kendiliğinden bağlanır. Şekil 4.4’te kapalı besleyici gömlek iç kısmının ve yolluklarının programa tanıtılması gösterilmiştir. Katı modelleme programından, benzeşim programına aktarma yapılırken modeller Şekil 4.4a’da gösterildiği gibi hücrelere ayrılır. Bu hücrelerin birbirleriyle ilişkisi program tarafından algılanır. Böylece model eksiksiz olarak programa aktarılmış olur.

Benzeşim programına katı modeller tanıtılırken, kalıp bileşenlerinin görev ve özellikleri dikkate alınmalıdır. Bu sayede yapılacak benzeşim sırasında kalıp elemanları program tarafından doğru algılanır ve işlevlerini doğru olarak yerine getirmesi sağlanmış olur. Besleyici gömlek diğer kalıp bileşenlerinden farklı olarak “gömlek-sleeve” kısmından programa tanıtılır. Ardından kalıp boşluğu olması gereken koordinatlara ve pozisyona getirilerek “.cvg” uzantılı olarak kaydedilir (Şekil 4.4 b).

4.2.2 Benzeşim ve Döküm Parametrelerinin Belirlenmesi

Benzeşim yapılmadan önce kalıp, metal ve döküm şartlarının doğru olarak belirlenmesi gerçekliğe yakınlığı artırmaktadır. Öncelikle programa “.cvg” uzantılı kaydedilen döküm boşluğu ve kalıp bileşenlerinin etrafında kalıbı oluşturmak için hücre sayısı ve döküm boşluğu ile kalıp yüzeyi arasındaki en yakın mesafe girilir. Katılaşmanın en soğuk yüzeyden başlayacağı göz önüne alındığında girilecek mesafeler daha önemli hale gelmektedir. Bu aşamada en yakın mesafe olarak genellikle 25 mm alınır. Bu mesafeden sonra ısıl özelliklerin değişmediği kabul edilmektedir. Hesaplamalarda kullanılacak hücre sayısı ise optimum olarak belirlenmelidir. Hücre sayısının fazla belirlenmesi yapılan benzeşimin gerçeğe

yakınlığını arttırmaktadır. Fakat hesaplama süresini arttırarak kullanılan bilgisayar sisteminin yaptığı işlem sayısını oldukça fazla arttırmaktadır. Hücre sayısının az seçilmesi ise hesaplama süresini azaltmak ta fakat gerçeklikten uzaklaşılmasına neden olmaktadır. Yapılan benzeşimlerde kalıp toplam boyutu ile değişmekle birlikte ortalama 1.100.000 hücre sayısı optimum kabul edilerek benzeşim çalışmaları yapılmıştır.



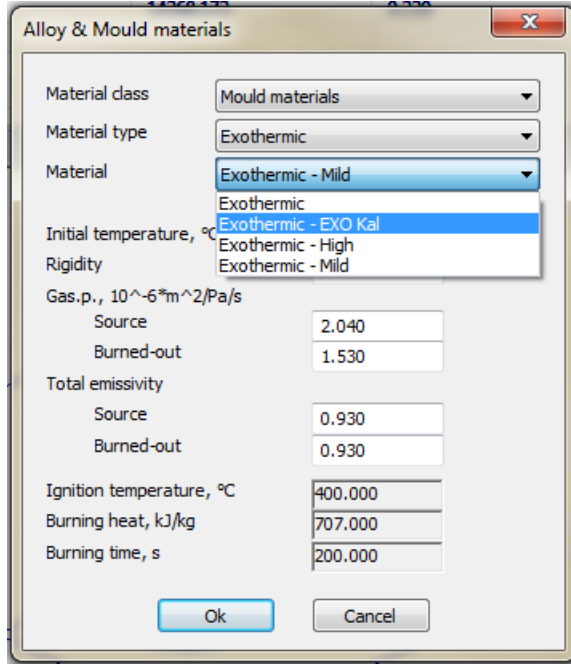
Şekil 4.4 a) Kapalı silindirik besleyici gömleğin iç kısmının benzeşim programına tanıtılırken hücelere ayrılmış olan yüzey görüntüsü, b) Kapalı silindirik besleyici gömleğin iç kısmının benzeşim programına tanıtıldıktan sonraki katı görüntüsü

Döküm metali olarak EN-GJL 500 küresel grafitli dökme demir seçilmiştir. Döküm sıcaklığı 1400 °C olarak sabit tutulmuştur. Yaş kum kalıplama yöntemi seçilmiş ve döküm yapılmadan önce kalıp boşluğunda hava bulunduğu kabul edilmiştir. Hem kalıp, hem de kalıp boşluğunun ilk sıcaklığı oda sıcaklığı (20 °C) olarak belirlenmiştir. NovaCast Flow&Solid döküm benzeşim programında kullanılan döküm kalıp bileşenlerinin özelliklerinin programa tanıtım şekline göre ikiye ayrılmaktadır. Bazı veriler deneysel olarak ispatlanmış olan verilerdir. Bazıları ise aynı işlevi yapan deneysel olarak ispatlanmış bileşenin sahip olduğu verilerden yola çıkarak dış kesim (ekstrapolasyon) gibi matematiksel yaklaşımlarla elde edilen verilerdir. Yapılan benzeşim uygulamalarında özellikleri deneysel olarak ispatlanmış döküm metali ve kalıp malzemesi kullanılmıştır. Bu nedenle sonuçların gerçeğe yakınlığının nispeten fazla olması beklenmektedir.

Kalıp malzemesi ve döküm metali seçimi yapıldıktan sonra besleyici gömlek özellikleri seçilir. Besleyici gömlek kısmında benzeşim programına kayıtlı toplam 4 farklı özellik bulunmaktadır. Bunlar (Şekil 4.5);

- Düşük ekzotermik
- Orta ekzotermik
- Yüksek ekzotermik
- EXO

Bu özelliklerin her biri için benzeşim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.5 Programa kayıtlı besleyici gömlekler

Her kalıp tasarımı benzeşim programındaki kalıp doldurma, katılma ve katılma-kalıp doldurma benzeşimlerinden, gerçek uygulamaya yakınlığı arttırmak için katılma-kalıp doldurma benzeşimi seçilmiştir. Böylece programın hem sıvı metalin kalıba dolma şartlarını hem de katılma şartlarını aynı anda hesaplaması sağlanmıştır.

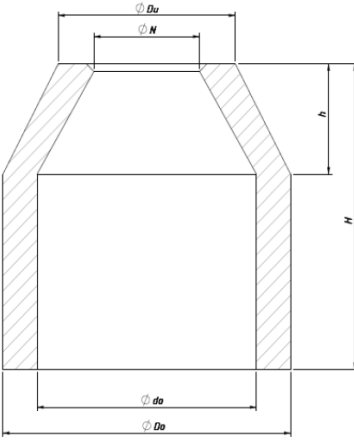
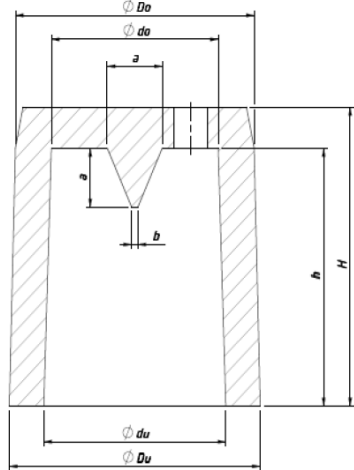
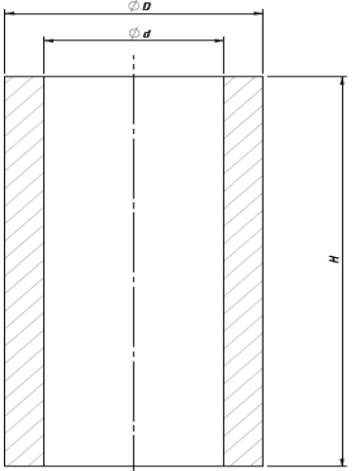
4.4 Dökümlerin Gerçekleştirilmesi ve Sıcaklık Ölçümleri

Dökümler Medöksan Döküm Sanayi Ltd. Şti'de gerçekleştirilmiştir. Benzeşim programı ile belirlenen döküm şartlarına uygun olarak hazırlanan kalıp ve sıvı metal ile deneme dökümleri gerçekleştirilmiştir. Her kalıpta karşılaştırmalı olarak farklı ekzotermik karaktere sahip aynı şekil ve boyuttaki besleyiciler kalıplanmıştır. Tablo 3.1'de deneysel çalışmalarda kullanılan besleyici gömleklerin şekil ve boyutları ile ısı ve geometrik modülleri verilmiştir. Besleyici gömleklerin kalıp dış yüzeyine olan mesafeleri eşit olarak ayarlanmıştır. Önce alt derece kalıplanmıştır. Alt derece kalıplanırken besleyicilerin oturacağı yerler belirlenmiş ve buralara yatay ve giriş yollukları açılmıştır. Aynı derecede kalıplanan besleyici gömleklere aynı zamanda sıvı metal dolmasını sağlamak için giriş yolluklarının kesitleri aynı olacak şekilde yapılmıştır. Besleyici gömlekler belirlenen yerlere yerleştirildikten sonra etraflarına üst derece geçirilmiş ve üst derece kalıplanmıştır. Üst derece kalıplanırken düşey yolluk oluşturulmuştur.

Döküm metali olarak EN-GJL 500 (DDK 50) küresel grafitli dökme demir kullanılmıştır. Bu dökme demire ait kimyasal bileşim Tablo 3.2'de verilmiştir. Sıvı metal yüksek frekanslı indüksiyon ocağında hurdalar ergitilerek elde edilmiştir. Ocak sıvı metal çıkış sıcaklığı 1500-1550 °C olarak ölçülmüştür.

Besleyici gömlekler kalıplanmadan önce yan orta kısımları delinerek termal çiftler yerleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümlerinde %10 rutenyum katkılı platin tel çiftinden oluşan S tipi seramik kaplı termal çiftler kullanılmıştır. Termal çiftlerin döküm sırasında sıvı metal hareketinden ve katılaşma büzülmesinden etkilenmesini önlemek için ayrıca seramik veya çelik kılıflar kullanılmıştır.

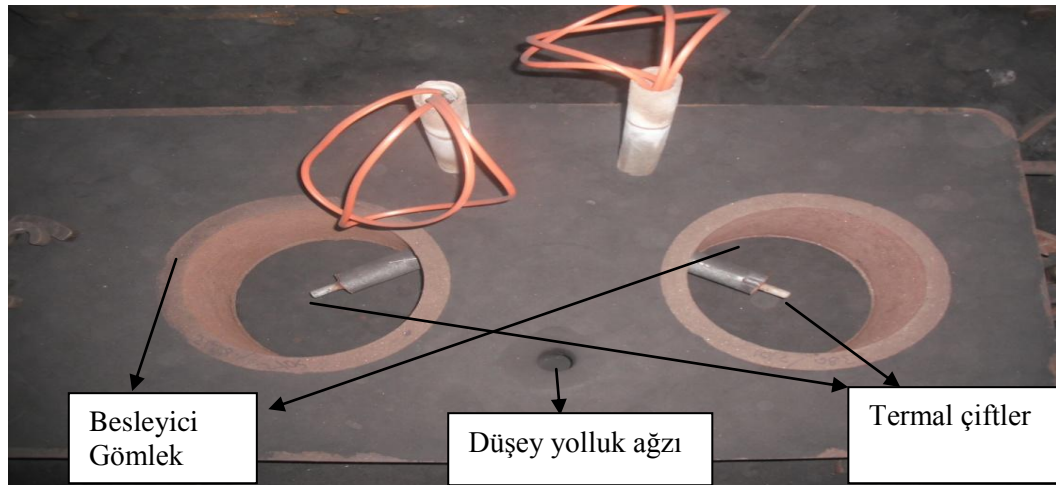
Tablo 3.1 Besleyici gömlek teknik resimleri, boyutları ve kalıp tasarımı üstten görünüşü

|  | <p>GEOM: Geometrik modül $GEOM=V/A$ V: Besleyici hacmi (cm^3) A: Besleyici yüzey alanı (cm^2)</p> <table border="1" data-bbox="711 474 1329 584"> <thead> <tr> <th>Modül (cm)</th> <th colspan="7">BOYUTLAR (mm)</th> <th>Hacim</th> </tr> <tr> <th>BG</th> <th>GEOM</th> <th>$\varnothing N$</th> <th>$\varnothing Du$</th> <th>$\varnothing do$</th> <th>$\varnothing Do$</th> <th>h</th> <th>H</th> <th>dm3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4,80</td> <td>3,20</td> <td>87</td> <td>132</td> <td>175</td> <td>222</td> <td>90</td> <td>250</td> <td>5,10</td> </tr> </tbody> </table> <p>BG: Besleyici gömlek ısı modülü $BG=GEOM*k$ k= Besleyici gömlek ısı düzeltme katsayısı</p> | Modül (cm) | BOYUTLAR (mm) | | | | | | | Hacim | BG | GEOM | $\varnothing N$ | $\varnothing Du$ | $\varnothing do$ | $\varnothing Do$ | h | H | dm3 | 4,80 | 3,20 | 87 | 132 | 175 | 222 | 90 | 250 | 5,10 | <p>(A) Konik Besleyici Gömlek</p> |
|---|--|------------------|------------------|------------------|------------------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|----|------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----|------|---|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|---|
| Modül (cm) | BOYUTLAR (mm) | | | | | | | Hacim | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BG | GEOM | $\varnothing N$ | $\varnothing Du$ | $\varnothing do$ | $\varnothing Do$ | h | H | dm3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4,80 | 3,20 | 87 | 132 | 175 | 222 | 90 | 250 | 5,10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | <table border="1" data-bbox="719 904 1329 1014"> <thead> <tr> <th>Modül (cm)</th> <th colspan="7">BOYUTLAR (mm)</th> <th>Hacim</th> </tr> <tr> <th>BG</th> <th>GEOM</th> <th>$\varnothing du$</th> <th>$\varnothing Du$</th> <th>$\varnothing do$</th> <th>$\varnothing Do$</th> <th>h</th> <th>H</th> <th>dm3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3,20</td> <td>2,00</td> <td>118,0</td> <td>154,5</td> <td>112,0</td> <td>148,0</td> <td>130,0</td> <td>150,0</td> <td>1,35</td> </tr> </tbody> </table> | Modül (cm) | BOYUTLAR (mm) | | | | | | | Hacim | BG | GEOM | $\varnothing du$ | $\varnothing Du$ | $\varnothing do$ | $\varnothing Do$ | h | H | dm3 | 3,20 | 2,00 | 118,0 | 154,5 | 112,0 | 148,0 | 130,0 | 150,0 | 1,35 | <p>(B) Kapalı Silindirik Besleyici Gömlek</p> |
| Modül (cm) | BOYUTLAR (mm) | | | | | | | Hacim | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BG | GEOM | $\varnothing du$ | $\varnothing Du$ | $\varnothing do$ | $\varnothing Do$ | h | H | dm3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3,20 | 2,00 | 118,0 | 154,5 | 112,0 | 148,0 | 130,0 | 150,0 | 1,35 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | <table border="1" data-bbox="719 1368 1254 1496"> <thead> <tr> <th>Modül (cm)</th> <th colspan="3">BOYUTLAR (mm)</th> <th>Hacim</th> </tr> <tr> <th>BG</th> <th>GEOM</th> <th>$\varnothing d$</th> <th>$\varnothing D$</th> <th>H</th> <th>dm3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5,60</td> <td>3,85</td> <td>250</td> <td>305</td> <td>200</td> <td>9,80</td> </tr> </tbody> </table> | Modül (cm) | BOYUTLAR (mm) | | | Hacim | BG | GEOM | $\varnothing d$ | $\varnothing D$ | H | dm3 | 5,60 | 3,85 | 250 | 305 | 200 | 9,80 | <p>(C) Açık Silindirik Besleyici Gömlek</p> | | | | | | | | | | |
| Modül (cm) | BOYUTLAR (mm) | | | Hacim | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BG | GEOM | $\varnothing d$ | $\varnothing D$ | H | dm3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5,60 | 3,85 | 250 | 305 | 200 | 9,80 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tablo 3.2 Dökümü yapılan küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimi

| C | Si | S | P | Mg | Mn | Cr | Ni | Mo | V | |
|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|
| >4.03 | 1,53 | 0,012 | 0,054 | 0,007 | 0,185 | 0,041 | 0,018 | 0,002 | 0,007 | |
| >4.08 | 2,9 | 0,013 | 0,055 | 0,055 | 0,205 | 0,043 | 0,018 | <0.001 | 0,011 | |
| Cu | Sn | Ce | Al | Ca | Co | Nb | Ti | B | Zn | Pb |
| 0,053 | 0,003 | <0.001 | 0,005 | <0.001 | 0,003 | 0,005 | 0,01 | <0.0005 | 0,004 | 0,004 |
| 0,054 | <0.001 | <0.001 | 0,013 | <0.001 | 0,004 | 0,006 | 0,012 | <0.0005 | 0,003 | 0,003 |

Döküm yapılan kalıplardan birinin üstten fotoğrafı Şekil 4.9’da gösterilmektedir. Sıcaklık ölçümleri saniyede 4 veri olarak Datataker DT85 Series 2 cihazında kaydedilmiştir. Termal çiftler, cihaza silikon kaplı ve 2.5 m uzunluğundaki bakır kablolar ile bağlanmıştır. Referans sıcaklık olarak hem cihazın içerisindeki termal çiftten hem de kalıbın dökümden gelen sıcaklıktan etkilenemeyecek bir bölgesine yerleştirilen K tipi termal çiftten alınan ölçümler kullanılmıştır.



Şekil 4.6 Kalıplanmış besleyici gömleklere sıcaklık ölçüm düzeneği

4.6 Döküm Öncesi ve Sonrası Gömlek Bileşiminin Belirlenmesi

Sıvı metal uygulamaları gerçekleştirilen besleyici gömleklere döküm öncesinde ve sonrasında numuneler çıkartılarak öğütülmüş ve elde edilen tozlar Rigaku D Max 2200 X ışınları kırınım cihazında analiz edilmiştir. Elde edilen kırınım desenleri karşılaştırılarak reaksiyon öncesi ve sonrası faz farklılıkları incelenmiştir.

4.7 Besleyici Gömlek Isıl Özelliklerinin Karakterizasyonu

Besleyici gömleklerin ısıl karakterizasyonları için iki yöntem kullanılmıştır. Çukurova Kimya Endüstrisi A.Ş. Ar-Ge laboratuvarlarında besleyici gömleklere yakma testi uygulanmıştır. Bu test için konik ve kapalı besleyicilerde kullanılan bileşim ile hazırlanmış küçük boyutlardaki kapalı besleyiciler kullanılır. Besleyici gömleklerden aynı anda hem radyasyon pirometresi hem de KER 610 seramik kaplı S tipi termal çiftler ile sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Sıcaklık ölçümü yapılmadan önce besleyici gömlek 900 °C'de kül fırınında ısıtılarak yanma reaksiyonunun başlaması sağlanır. Yanma reaksiyonu başladıktan sonra besleyici gömlek altındaki delikten termal çift besleyicinin merkezine yerleştirilir. Aynı zamanda radyasyon pirometresinin sıcaklık ölçümü alacağı bölge olarak termal çiftin hemen ucundaki bölge seçilir. Radyasyon pirometreden kaydedilen ve termal çift ile alınan ısınma ve soğuma eğrileri karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.7 Radyasyon pirometre ve termal çift ile alınan sıcaklık ölçümü düzeneği

Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Seramik Laboratuvarı'nda besleyici gömleklerin görevini yerine getirebilmesi için en önemli özelliği olan ekzotermik reaksiyonların başlama sıcaklıkları ve süreleri ile bu reaksiyona bağlı olarak gömlekte meydana gelen ağırlık değişimlerinin tespiti için DT-TG analizi yapılmıştır. DT-TG analizleri Shimadzu DTG 60H cihazında alumina panlar kullanılarak yapılmıştır. Oda sıcaklığı ile 1600 °C arasında dakikada 10 °C artışla tarama yapılmıştır.

BÖLÜM BEŞ

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalar sonucunda besleyici gömleklerin işlevselliğini belirleyici parametreler yanma sıcaklığı, yanma süresi, erişilen en yüksek sıcaklık ve soğuma rejimi davranışı benzeşim sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Veri tabanına kayıtlı ve besleyici gömleğin döküm sırasındaki işlevini kontrol eden bu özellikler, gömlek bileşimi ile belirlenmekle birlikte gömlek geometrisine göre de farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle 3 farklı şekil ve aynı şekle ait 3 farklı besleyici bileşimi üzerinden deneyler gerçekleştirilmiştir.

Benzeşim programındaki besleyici gömleklere ait özellikler farklı karakterizasyon yöntemleri ve deneysel tasarımlar ile doğrulanmaya çalışılmıştır. Yanma süresi deneme dökümleri sırasında, DT-TG analizleri ile ve radyasyon pirometresi-termal çift sıcaklık ölçümleri sonucunda belirlenmiştir. Yanma sıcaklığı DT-TG analizleri sonucunda ve deneme dökümleri sırasında karşılaştırmalı olarak belirlenmiştir. Soğuma rejimi ve görülen en yüksek sıcaklık; radyasyon pirometresi- termal çift ölçümleri ve deneme dökümleriyle doğrulanmaya çalışılmıştır.

Tüm analizlerin ve sıcaklık ölçümleri için yapılan deneysel tasarımların sonuçları karşılaştırmalı grafikler olarak verilmiştir. Benzeşim programındaki besleyici gömleklere ait verilerin gerçek çalışmalarla uyumu irdelenmiştir.

Ayrıca dökümler öncesinde ve sonrasında besleyici gömleklerin yapılarında mevcut fazlar X ışınları kırınımı ile belirlenmiştir. Böylece besleyici gömleklerin çalışma esasını oluşturan ekzotermik tepkimeler sonucunda bileşiminde oluşan değişimler ortaya konmuştur. TG analizleri ile ağırlık kaybı yaşanan sıcaklık aralıkları tespit edilmiştir. Böylece besleyici yoğunluğunda meydana gelen değişimler analiz edilmiştir.

5.1 Benzeşim Programından Sıcaklık Verilerinin Alınması

Döküm sırasında kalıbın dolmaya başlamasından itibaren program üzerinden sıcaklık verileri kaydedilmeye başlamıştır. Bu veriler daha önce programda belirlenen besleyici içerisindeki sıcaklık ölçüm noktalarından alınmıştır. Çıkan sonuçlar gerçek şartlarla karşılaştırılmalı grafik olarak verilmiştir. Tüm besleyici gömlekler bileşimleri için ısıl özellikler Tablo 5.1’de verilmiştir. Bu değerler benzeşim programındaki besleyici gömleklere ait özelliklerdir. Program bu verileri kullanarak hacim kontrollü sonlu elemanlar metodunu kullanarak besleyicinin çalışmasına ait benzeşimleri yapmaktadır.

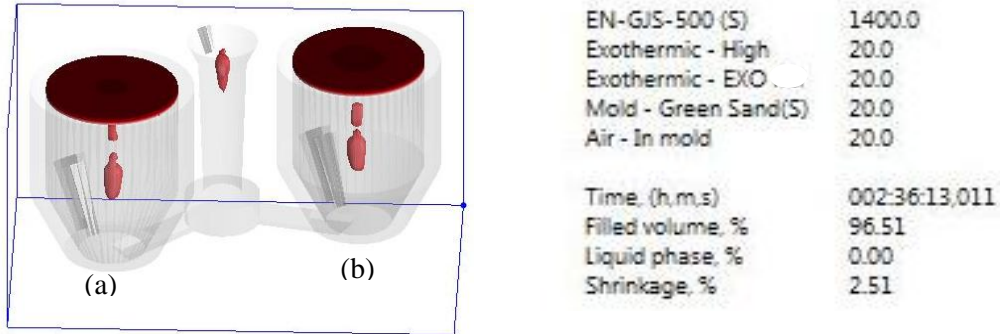
Tablo 5.1 Benzeşim programından alınan besleyici gömleklere ait özellikler (Novacast, 2013)

| Gömlek Bileşimi | Yanma Süresi (s) | Ateşleme Sıcaklığı (°C) | Yanma Isısı (kJ/kg) |
|-------------------|------------------|-------------------------|---------------------|
| EXO | 30 | 400 | 2200 |
| Yüksek Ekzotermik | 100 | 400 | 1230 |
| Orta Ekzotermik | 100 | 1000 | 2000 |
| Düşük Ekzotermik | 200 | 404 | 707 |

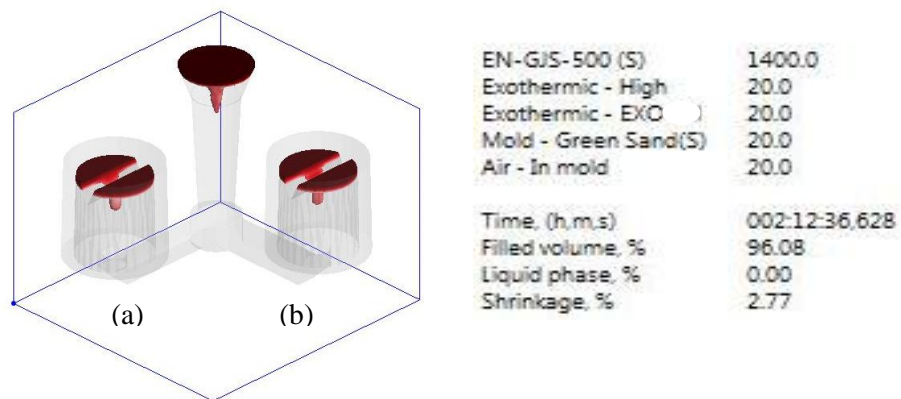
Döküm sonrası besleyici gömlekler içerisindeki metallerin durumu Şekil 5.1, 5.2, 5.3 ve 5.4’te gösterilmiştir. Benzeşim çalışmaları sonuçlarına göre besleyici gömlek içerisindeki çekinti miktarları Tablo 5.2’de verilmiştir. Çekinti miktarları birbirine çok yakın gerçekleşmiştir. Hacimde değişim olmadığı bilindiğinden çekinti miktarları döküm metalinin özelliklerine bağlı olarak aynı kabul edilebilir. Çekinti miktarlarında meydana gelen bu farkın kullanılan döküm dökme demirin grafitleşme davranışından kaynaklandığı düşünülmektedir.. En iyi ısıtma özelliğine sahip olan EXO özellikli besleyici gömleğin kullanıldığı kalıplarda ısıtma özelliğinin iyi olmasından dolayı daha az çekinti olmuştur. Benzer şekilde ısıtma özelliği iyi olmayan düşük ekzotermik özellikli besleyici gömleğin kullanıldığı kalıplarda katılma sonrası çekinti miktarları en fazladır.

Tablo 5.2 Besleyici gömleklerin benzeşim çalışmaları sonucundaki çekintilerin karşılaştırması

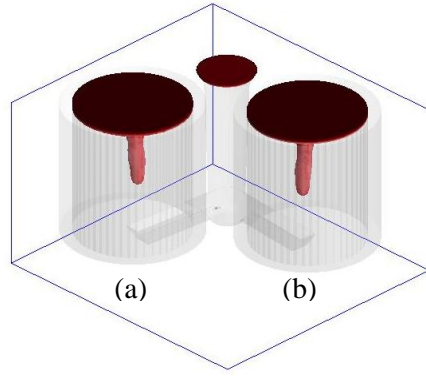
| Karşılaştırılan Besleyici Gömlekler | Çekinti Miktarları (%) |
|---|------------------------|
| Yüksek Ekzotermik ve EXO Özellikli Konik Besleyici Gömlek | 2,51 |
| Yüksek Ekzotermik ve EXO Özellikli Kapalı Silindirik Besleyici Gömlek | 2,77 |
| Orta ve Yüksek Ekzotermik Özellikli Açık Silindirik Besleyici Gömlek | 2,79 |
| Yüksek ve Düşük Ekzotermik Özellikli Açık Silindirik Besleyici Gömlek | 3,92 |
| Orta ve Düşük Ekzotermik Özellikli Açık Silindirik Besleyici Gömlek | 3,94 |



Şekil 5.1 Konik yüksek egzotermik (a) ve EXO (b) özellikli besleyici gömlekteki metalin katılaştıktan sonraki çekintileri içeren görüntüsü ve benzeşim programından alınan çekinti verileri

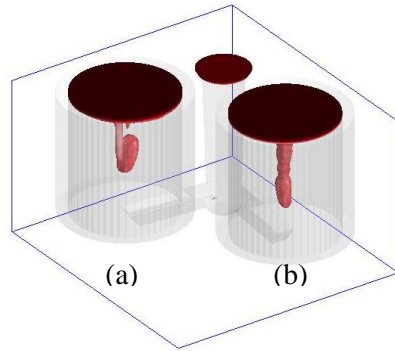


Şekil 5.2 Kapalı silindirik yüksek egzotermik (a) ve EXO (b) özellikli besleyici gömlekteki metalin katılaştıktan sonraki çekintileri içeren görüntüsü ve benzeşim programından alınan çekinti verileri



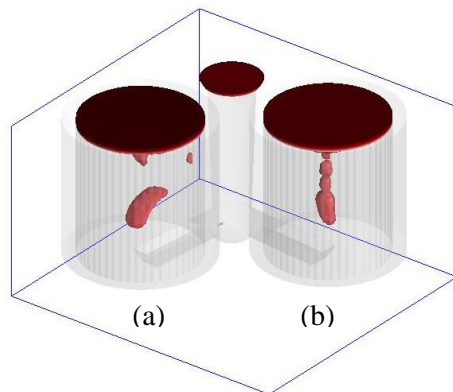
| | |
|----------------------|---------------|
| EN-GJS-500 (S) | 1400.0 |
| Exothermic - High | 20.0 |
| Exothermic - Mild | 20.0 |
| Mold - Green Sand(S) | 20.0 |
| Air - In mold | 20.0 |
| Time, (h,m,s) | 006:08:41,395 |
| Filled volume, % | 96.27 |
| Liquid phase, % | 0.00 |
| Shrinkage, % | 2.79 |

Şekil 5.3 Açık silindirik yüksek (a) ve orta (b) ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin katılaştıktan sonraki çekintileri içeren görüntüsü ve benzeşim programından alınan çekinti verileri



| | |
|----------------------|---------------|
| EN-GJS-500 (S) | 1400.0 |
| Exothermic | 20.0 |
| Exothermic - High | 20.0 |
| Mold - Green Sand(S) | 20.0 |
| Air - In mold | 20.0 |
| Time, (h,m,s) | 008:01:15,490 |
| Filled volume, % | 96.03 |
| Liquid phase, % | 0.00 |
| Shrinkage, % | 2.78 |

Şekil 5.4 Açık silindirik yüksek ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin katılaştıktan sonraki çekintileri içeren görüntüsü ve benzeşim programından alınan çekinti verileri



| | |
|----------------------|---------------|
| EN-GJS-500 (S) | 1400.0 |
| Exothermic | 20.0 |
| Exothermic - Mild | 20.0 |
| Mold - Green Sand(S) | 20.0 |
| Air - In mold | 20.0 |
| Time, (h,m,s) | 006:34:56,322 |
| Filled volume, % | 96.06 |
| Liquid phase, % | 0.00 |
| Shrinkage, % | 2.80 |

Şekil 5.5 Açık silindirik orta ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin katılaştıktan sonraki çekintileri içeren görüntüsü ve benzeşim programından alınan çekinti verileri

5.2 Deneme Döküm Sonuçları

Benzeşim programından ve gerçek döküm sırasında alınan ölçümler sonucu elde edilen soğuma eğrileri incelendiğinde belirli bir sıcaklık aralığında eğrilerin eğimleri sıfıra yaklaşarak yatay konuma gelmektedir. Bu tipik bir ötektik alaşım soğuma eğrisidir. Eğrilerin düzleşmeye başladığı ilk nokta faz diyagramında likidüs, sonlandığı nokta ise solidüs çizgilerini kestiği noktalaradır. Dökme demir için elde edilen bu soğuma eğrileri aracılığıyla kimyasal bileşiminin belirlenmesi mümkün olabilmektedir (Oliveira, Malherios ve Riberio, 1999).

Döküm denemeleri sonucu elde edilen ve benzeşim programında alınan veriler birlikte Şekil 5.6-5.8'de grafikler olarak verilmiştir. Tüm grafikler incelendiğinde benzeşim programından alınan veriler ile gerçek ölçüm sonuçları arasında farklar olduğu görülmektedir. İlk olarak sıvı metalin soğuması incelendiğinde Şekil 5.6'da gösterildiği gibi likidüs çizgisine yaklaşıırken programdan alınan verilerin oluşturduğu grafikte daha hızlı bir soğuma olduğu görülmektedir. Tablo5.3'te görüldüğü gibi sıvı metal için benzeşim programı sonuçlarında ortalama soğuma hızı 0,185 °C/s olurken, gerçek ölçüm sonuçlarında hız ortalaması 0,164 °C/s olmaktadır. Şekil 5.7 ve 5.8'de her iki gömleğinde benzeşim programından alınan grafikleri incelendiğinde EXO özellikli konik besleyici (EÖKB) gömlek içerisindeki sıvı metal, yüksek ekzotermik özellikli konik besleyici (YEÖKB) gömleğe yakın sıcaklık değerlerinden soğumaya başladığı görülmektedir. Bu da besleyici gömlek içerisindeki sıvı metalin, gömlekler tarafından ısıtılma miktarlarının birbirine çok yakın olduğunu göstermektedir. Fakat hızlı bir biçimde soğuyarak eğrinin yatay konuma gelmeye başladığı ve katılaşmanın başladığı likidüs çizgisine 115 s daha önce ulaştığı görülmektedir. Gerçekte alınan değerlerde ise görülebilen en yüksek sıcaklık her iki besleyici gömleğin de benzeşiminden elde edilen değerlerden daha az olduğu ve soğumanın daha yavaş gerçekleştiği görülmektedir.

Sağlam bir dökümün elde edilebilmesi için besleyicinin en son katılaştıran kısım olması gerektiği göz önüne alındığında, besleyici içerisindeki metalin, katılaşma tamamlanana kadar en yüksek sıcaklığa sahip olması gerekmektedir. Bu açıdan besleyici gömlek içerisindeki metalin döküm sonrasında eriştiği en yüksek sıcaklık

ve bu sıcaklığa erişme süresinden daha çok yavaş soğuması önem kazanmaktadır. Özellikle katılaşmanın sona ermek üzere olduğu solidüs çizgisine en yakın bölgelerde besleyici içerisinde sıvı metal oldukça yavaş katılaşarak sıvı metal hareketine olanak sağlamalıdır. Solidüsü geçtikten hemen sonra ise katılaşan metalde besleyici altında meydana gelebilecek büzölmeleri katı besleme yoluyla karşılamak için, plastik özelliğini mümkün olduğunca uzun süre koruması gerekmektedir.

Şekil 5.7’de mavi renk ile gösterilen YEÖKB gömlek içerisindeki sıvı metal 1255°C sıcaklıktan soğumaya başlamıştır. Yeşil ile gösterilen EÖKB gömlek ise 1251°C sıcaklık ile YEÖKB gömleğe göre daha düşük sıcaklıktan soğumaya başlamıştır. Fakat sıvı halde 0,166 °C/s hızla soğuyan YEÖKB, 162 °C/s hızla soğuyan EÖKB gömleğe göre daha hızlı bir soğuma rejimi göstermiştir.

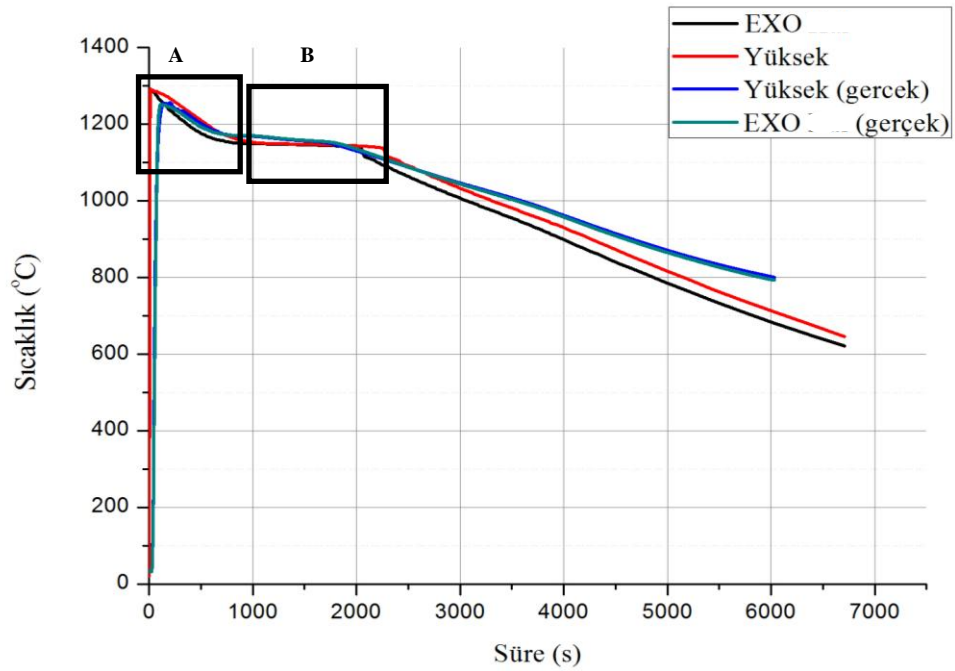
Şekil 5.8’deki grafikler gerçek ölçüm sonuçlarına ve Tablo 5.3’teki gerçek ölçüm sonuçlarının değerleri incelendiğinde EÖKB gömlek solidüse, YEÖKB gömleğe göre 47 s daha geç ulaşmaktadır. EÖKB solidüs çizgisine kadar daha uzun sürede erişerek ve sonrasında yavaş bir soğuma göstererek YEÖKB’ye göre daha uzun süre plastik özellikte kalmaktadır.

Benzeşim programından alınan veriler ise solidüs ve likidüs aralığında gerçek verilerle benzerlik gösterse de sıvı ve katı metal soğumalarında gerçek değerlerden uzaklaşmıştır. EÖKB gömlek soğuması incelendiğinde gerçek ve benzeşim sonuçları arasında ciddi farklar bulunmaktadır. Erişilen en yüksek sıcaklıkta 40 °C, sıvı metal soğuma hızında 0,024 °C/s, likidüse ulaşma süresinde 130 s, solidüse ulaşma süresinde 313 s ve katı metalin soğuma hızında 0,022 °C/s fark bulunmaktadır. Benzer farklar YEÖKB gömlek için erişilen en yüksek sıcaklıkta 35 °C, sıvı metal soğuma hızında 0,018 °C/s, likidüse ulaşma süresinde 286 s, solidüse ulaşma süresinde 562 s ve katı metalin soğuma hızında 0,025 °C/s olarak belirlenmiştir. Genel olarak, gerçek duruma göre programdan elde edilen grafiklerde daha yavaş soğuma olduğu gözlenmiştir. Besleyicinin en geç katılaşması gereken kalıp elemanı olduğu düşünüldüğünde, döküm süreç benzeşim programı ve gerçek döküm uygulamaları arasındaki sıcaklık ve zaman farkları daha da önem kazanmaktadır.

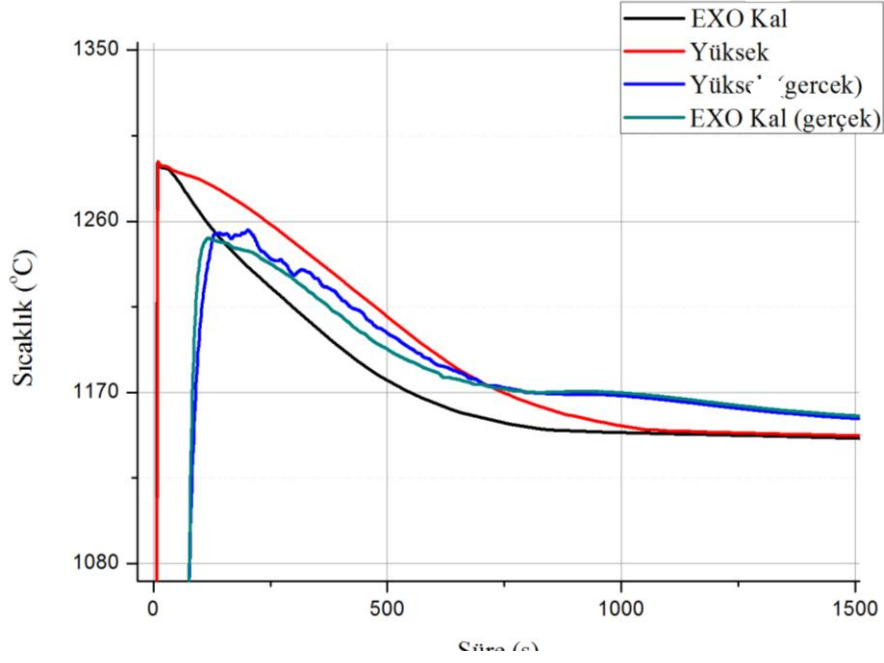
Zira bu durumda benzeşim programıyla öngörülenden daha büyük veya daha fazla sayıda besleyici kullanılması gerekebilir.

Tablo 5.3 Konik besleyici gömleklerin deneme dökümlerinden ve benzeşim programından alınan sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırması

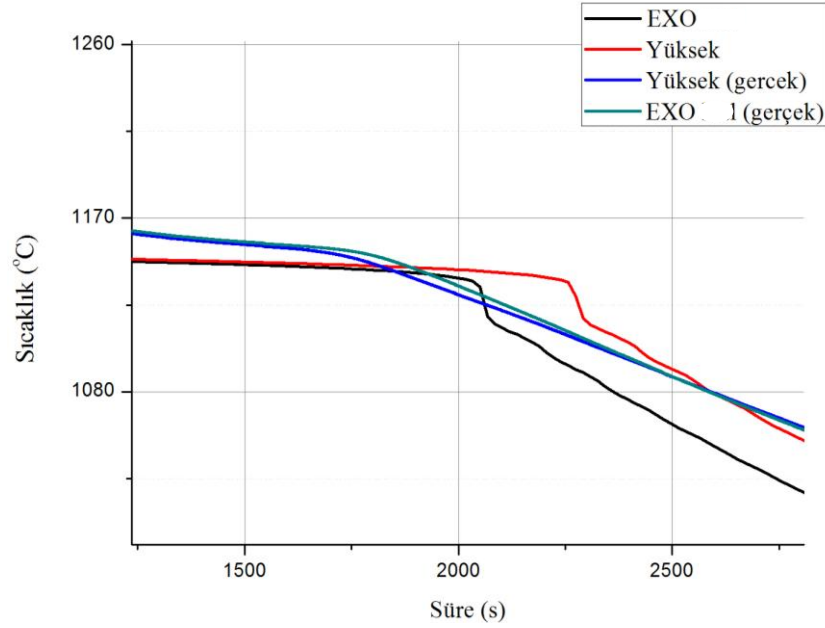
| Besleyici | Erişilen en Yüksek Sıcaklık (°C) | Sıvı Metalin Soğuma Hızı (°C/s) | Likidüse Ulaşma Süresi (s) | Solidüse Ulaşma Süresi (s) | Katı Metalin Soğuma Hızı (°C/s) |
|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| EXO | 1291 | 0,186 | 953 | 2052 | 0,108 |
| EXO (Gerçek) | 1251 | 0,162 | 823 | 1739 | 0,086 |
| Yüksek Ekzotermik | 1290 | 0,184 | 1068 | 2254 | 0,109 |
| Yüksek Ekzotermik (gerçek) | 1255 | 0,166 | 782 | 1692 | 0,084 |



Şekil 5.6 Konik besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 5.7 Konik besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (Şekil 5.6 A bölgesi)



Şekil 5.8 Konik besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (Şekil 5.6 B bölgesi)

Şekil 5.9, 5.10 ve 5.11’de kapalı silindirik besleyici gömleğe ait benzeşim ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırması gösterilmektedir. Deney tasarımında seçilen kapalı silindirik besleyici gömleklerin ekzotermik özellikleri

konik besleyici gömleklemlerle benzerdir. Tablo 5.3'te gösterildiği gibi kapalı besleyici gömlemlerin benzeşim programından alınan sonuçların grafikleri incelendiğinde, ilk olarak konik besleyici gömlemlere göre erişilen en yüksek sıcaklığın daha fazla ve soğuma hızlarının daha yavaş olduğu görölmektedir. Gerçek ölçüm sonuçları incelendiğinde ise erişilen sıcaklığın yüksek olmasıyla birlikte soğuma hızı konik besleyici gömlemlere göre daha yüksek olmaktadır.

şekil 5.10'deki benzeşim programı sonuçları incelendiğinde konik besleyici gömleğin aksine sıvı metalin soğuması sırasında yüksek ekzotermik özellikli kapalı silindirik besleyici (YÖKSB) gömleğin, EXO özellikli kapalı silindirik besleyici (EÖKSB) gömleğe göre 0,012 °C/s daha hızlı soğuduğu görölmektedir. Bu bağlamda EÖKSB gömlek likidüs sıcaklığına, YEÖKSB gömleğe göre 283 s daha geç ulaşmaktadır. Solidüs sıcaklığından sonra ise EÖKSB gömlek, YEÖKSB gömleğe göre 0,002 °C/s daha hızlı soğumaya devam etmektedir (Tablo 5.4).

şekil 5.10 ve 5.11'deki gerçek ölçüm sonuçları incelendiğinde iki besleyici gömleğinde soğuma rejimleri birbirine yakındır. Benzeşim sonuçlarının tersine gerçek ölçüm sonuçlarında EÖKSB gömlekteki sıvı metal, YEÖKSB gömleğe göre 0,008 °C/s daha hızlı soğumaktadır. Gerçek ölçüm sonuçlarına göre EÖKSB gömlek, YEÖKSB gömleğe göre 7 °C daha yüksek sıcaklıktan soğumaya başlamasına rağmen sıvı metaldeki soğuma hızı farkı nedeniyle 31 s daha önce likidüs noktasına ulaşmaktadır. EÖKSB gömlek hızlı soğumasına doğrusal olarak devam ederek katılaşmanın tamamlandığı solidüs noktasına YEÖKSB gömleğe göre 62 s daha önce ulaşmaktadır (Tablo 5.4).

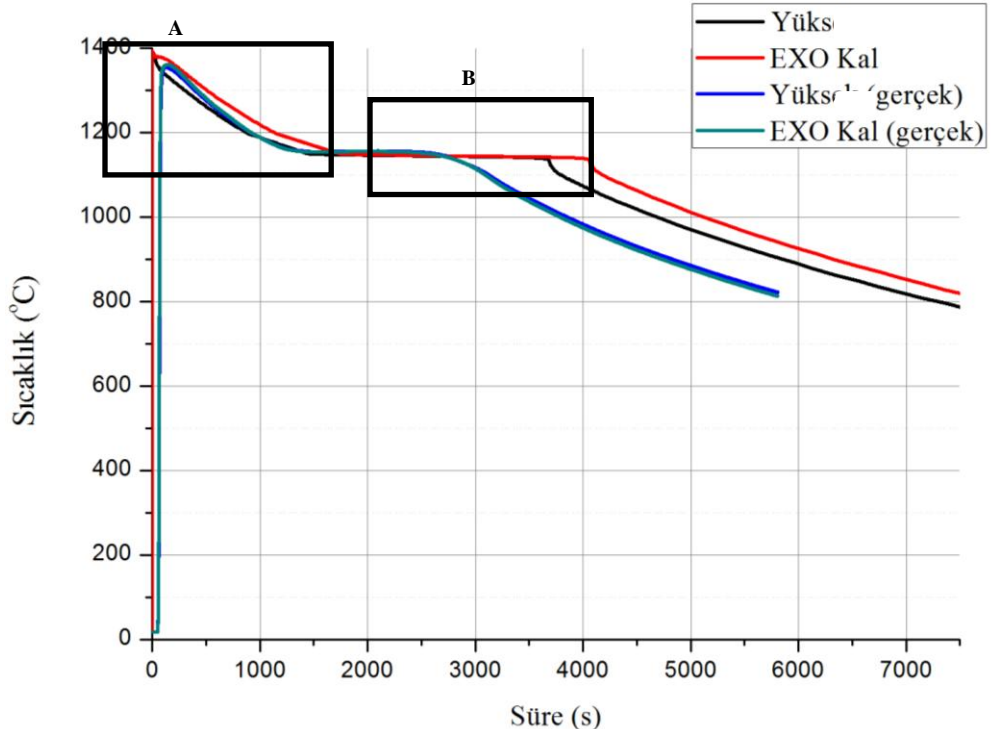
Benzeşim programından alınan ve gerçek ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında bazı farklılıklar görölmektedir. EÖKSB gömlek için grafikler ve Tablo 5.4'deki veriler incelendiğinde, benzeşim programından alınan sonuçların gerçek ölçüm sonuçlarından erişilen en yüksek sıcaklıkta 36 °C daha yüksek, sıvı metal soğuma hızında 0,057°C/s daha düşük, likidüse ulaşma süresinde 379 s daha geç, solidüse ulaşma süresinde 1456 s daha geç ve katı metalin soğuma hızında 0,009 °C/s daha yavaş olduğu görölmüştür. YEÖKSB gömlek için grafikler ve Tablo 5.4'deki veriler

incelendiğinde, benzeşim programından alınan sonuçların gerçek ölçüm sonuçlarından erişilen en yüksek sıcaklığın 40 °C daha yüksek, sıvı metal soğuma hızının 0,037°C/s daha düşük, likidüse ulaşma süresinin 65 s daha geç, solidüse ulaşma süresinin 1023 s daha geç ve katı metalin soğuma hızının 0,012 °C/s daha düşük olduğu görülmüştür. Ortaya çıkan farklardan YEÖKSB gömlek benzeşim verilerinin, EÖKSB gömlek benzeşim verilerine göre gerçek döküm şartlarına daha yakın olduğu görülmektedir. Fakat her iki gömlek için ortaya çıkan farklar besleyici tasarımında gerçek sonuca yaklaşımda engel oluşturmaktadır.

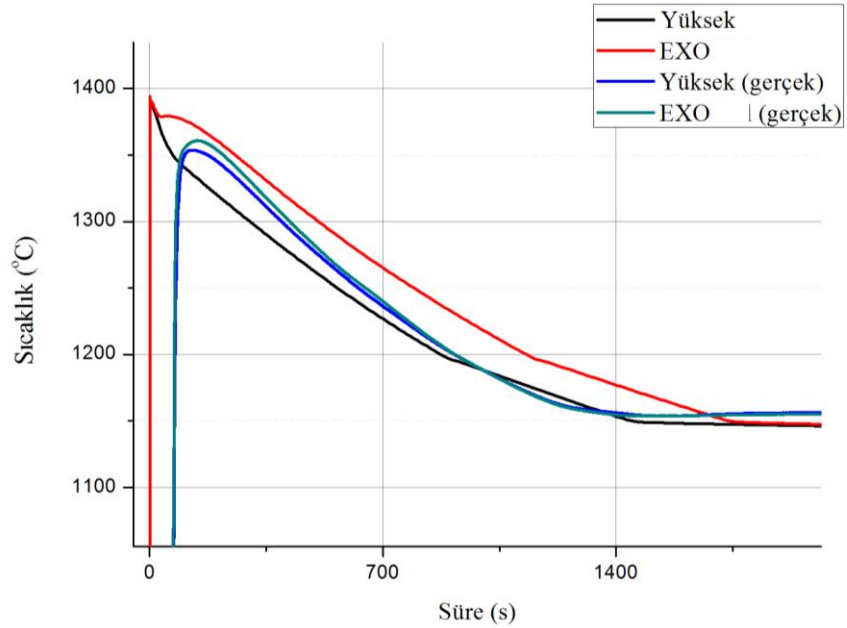
Kapalı besleyici gömleklerin deneyleri sonucunda gerçek ölçümlere YEÖKSB gömlek, benzeşim programı sonuçlarına göre EÖKSB daha yavaş bir katılma rejimi göstererek daha geç katılmıştır. Bu durumda geç katılan besleyici gömlek içerisindeki sıvı metalin beslenecek bölgeye akışı daha kolay gerçekleşecektir.

Tablo 5.4 Kapalı silindirik besleyici gömleklerin deneme dökümlerinden ve benzeşim programından alınan sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırması

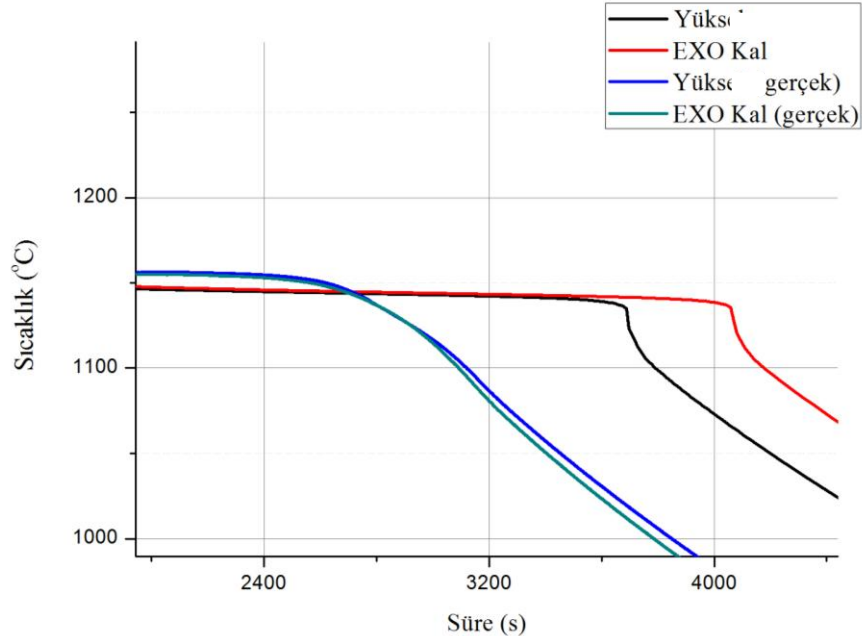
| Besleyici | Erişilen en Yüksek Sıcaklık (°C) | Sıvı Metalin Soğuma Hızı (°C/s) | Likidüse Ulaşma Süresi (s) | Solidüse Ulaşma Süresi (s) | Katı Metalin Soğuma Hızı (°C/s) |
|----------------------------|---|--|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| EXO | 1396 | 0,168 | 1767 | 4048 | 0,094 |
| Yüksek Ekzotermik | 1393 | 0,180 | 1484 | 3677 | 0,092 |
| EXO (gerçek) | 1360 | 0,225 | 1388 | 2592 | 0,103 |
| Yüksek Ekzotermik (gerçek) | 1353 | 0,217 | 1419 | 2654 | 0,114 |



Şekil 5.9 Kapalı silindirik besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 5.10 Kapalı silindirik besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (Şekil 5.9 A Bölgesi)



Şekil 5.11 Kapalı silindirik besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (Şekil 5.9 B Bölgesi)

Açık silindirik besleyici gömlek deneyleri sonucunda besleyicilerin bileşimindeki ekzotermik özelliklerinin metal soğuması üzerine etkisi incelenmiştir. Şekil 5.12, 5.13 ve 5.14 de açık silindirik yüksek ekzotermik (ASYEÖB) ve orta ekzotermik özellikli (ASOEÖB) gömleklerin içerisinde katılaştıran metale ait soğuma eğrileri gösterilmektedir. Bu eğriler incelendiğinde, diğer besleyici gömlek sıcaklık ölçüm sonuçlarından farklı olarak benzeşim programından alınan verilere göre besleyici gömlekler içerisindeki metal, gerçek uygulamalardan daha yavaş soğumaktadır. Ayrıca Şekil 5.11'deki eğriler incelendiğinde gerçek ölçüm sonuçlarıyla, benzeşim programından alınan sonuçları arasındaki farkın az olduğu görülmektedir.

Şekil 5.13 ve 5.14'de görüldüğü gibi benzeşim sonuçlarına göre erişilen en yüksek sıcaklıkları çok yakın olan ASYEÖB gömlek ve ASOEÖB gömlekteki sıvı metaller soğuma başladıklarında, ASYEÖB gömlekteki sıvı metal $0,030 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ daha hızlı soğumaktadır. Soğuma sırasında meydana gelen bu hız farkından dolayı ASYEÖB gömlek ASOEÖB gömleğe göre 305 s daha önce solidüs noktasına ulaşmaktadır (Tablo 5.5). ASOEÖB gömlekteki sıvı metal daha uzun süre sıcak

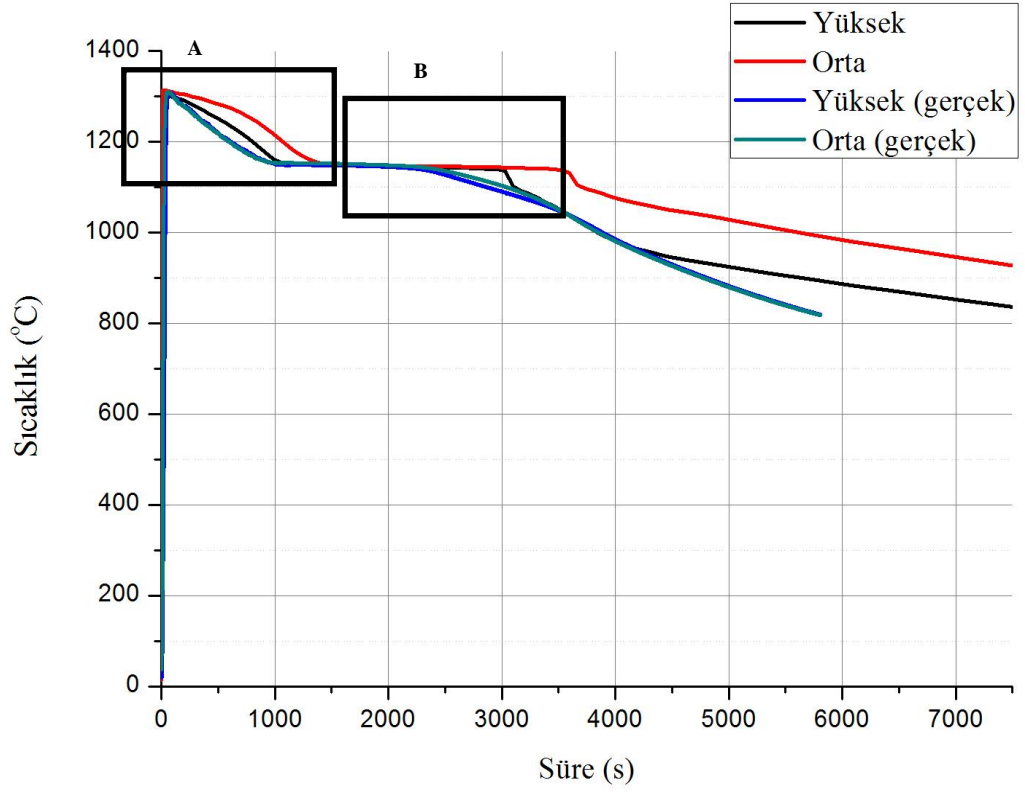
kalarak katılaştırmanın tamamlandığı solidüs noktasına ASYEÖB gömleğe göre 491 s daha geç ulaşmaktadır.

Şekil 5.13'teki gerçek ölçüm sonuçları incelendiğinde benzeşim sonuçlarında olduğu gibi iki besleyici gömlekte erişilen en yüksek sıcaklık değerleri birbirlerine yakındır. Aynı zamanda gerçek ölçüm sonuçlarına göre ASOEÖB ve ASYEÖB gömlekteki sıvı metalin soğuma hızları arasında 0,001 °C/s fark görülmektedir. Diğer karşılaştırmalı deneme dökümlerinden alınan ölçüm sonuçlarındaki farklılıklara göre oldukça azdır. ASYEÖB gömlek, solidüs sıcaklığına ASOEÖB gömlekten 36 s daha önce ulaşmaktadır. ASOEÖB gömlekteki sıvı metal solidüs noktasına ulaştığında 40 s daha uzun süre sıcak kalmaktadır. ASYEÖB gömlekteki metal katılaştıktan sonra ASOEÖB gömleğe göre 0,008 °C/s daha hızlı soğumaktadır (Tablo 5.5).

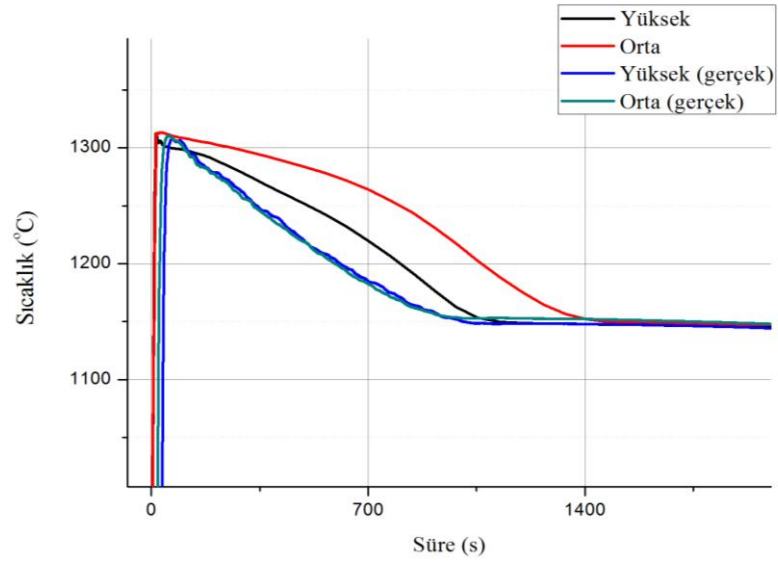
Şekil 5.13'te solidüs çizgisi ve hemen sonrası soğuma rejimlerine bakıldığında benzeşim programından alınan verilere göre besleyici gömlek içerisindeki metal gerçek ölçümlerin üzerinde ve yavaş soğuduğu görülmektedir. Gerçek değerlerden elde edilen eğriler incelendiğinde ASOEÖB besleyici gömleğin ASYEÖB gömleğe göre fark edilir biçimde daha yavaş soğuduğu görülmektedir.

Tablo 5.5 Açık Silindirik yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin deneme dökümlerinden ve benzeşim programından alınan sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırması

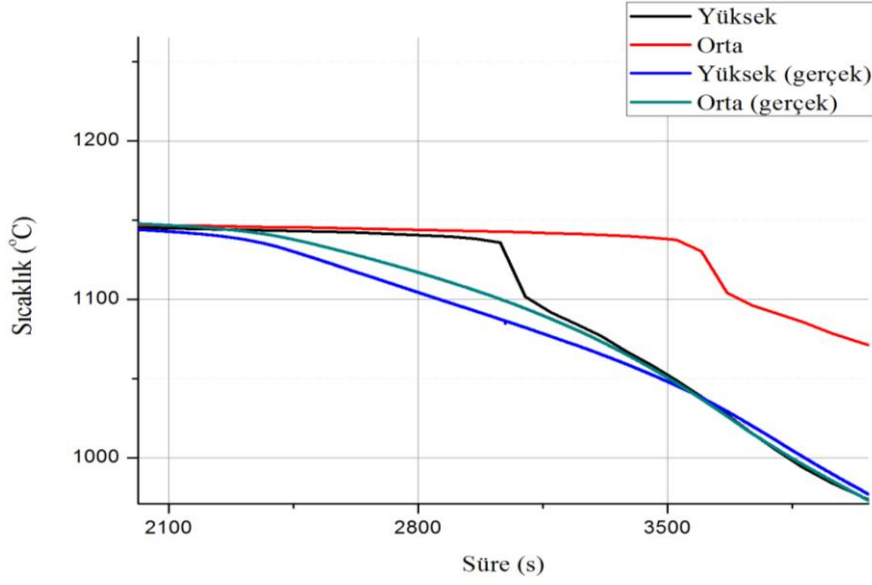
| Besleyici | Görülen en Yüksek Sıcaklık (°C) | Sıvı Metalin Soğuma Hızı (°C/s) | Likidüse Ulaşma Süresi (s) | Solidüse Ulaşma Süresi (s) | Katı Metalin Soğuma Hızı (°C/s) |
|----------------------------|--|--|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| Orta Ekzotermik | 1311 | 0,127 | 1394 | 3520 | 0,045 |
| Yüksek Ekzotermik | 1313 | 0,157 | 1429 | 3029 | 0,119 |
| Orta Ekzotermik (Gerçek) | 1310 | 0,181 | 1059 | 2245 | 0,077 |
| Yüksek Ekzotermik (gerçek) | 1307 | 0,180 | 1023 | 2205 | 0,085 |



Şekil 5.12 Açık silindirik orta ve yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 5.13 Açık silindirik orta ve yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (5.11 A Bölgesi)



Şekil 5.14 Açık silindirik orta ve yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (5.11 B Bölgesi)

Şekil 5.15, 5.16 ve 5.17’de açık silindirik yüksek ekzotermik özellikli besleyici (ASYEÖB) ve düşük ekzotermik özellikli besleyici (ASDEÖB) gömleklerin döküm sonrasında içlerindeki sıvı metale ait sıcaklık değişim grafikleri gösterilmektedir. Bu eğriler incelendiğinde diğer sıcaklık grafiklerinin aksine ölçülen en yüksek sıcaklık dışında benzeşim programından alınan ve gerçek ölçümlerden elde edilen eğriler arasında uyum görülmektedir. Şekil 5.15’de sıcaklık değişim grafiğinin tamamı incelendiği soğuma rejimlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Şekil 5.16’de sıcaklık değişim grafiğinin döküm sıcaklığından likidüsün hemen sonrasına kadar olan kısmı verilmiştir. Burada benzeşim programı eğrisi ile gerçek ölçüm sonuçlarının eğrisi arasındaki fark en yüksek sıcaklığın olduğu bölgede görülmektedir. Bu da benzeşim programındaki döküm sıcaklığının sabit tutulması, gerçek uygulamalarda ise sıvı metal sıcaklığının ortam sıcaklığına göre değişkenlik göstermesi nedeniyle ortaya çıkan uyumsuzluk ile açıklanabilir. Bu fark dışında likidüse kadar olan sıvı metal soğuması birbirleriyle uyumlu bir eğimle devam ettiği görülmektedir.

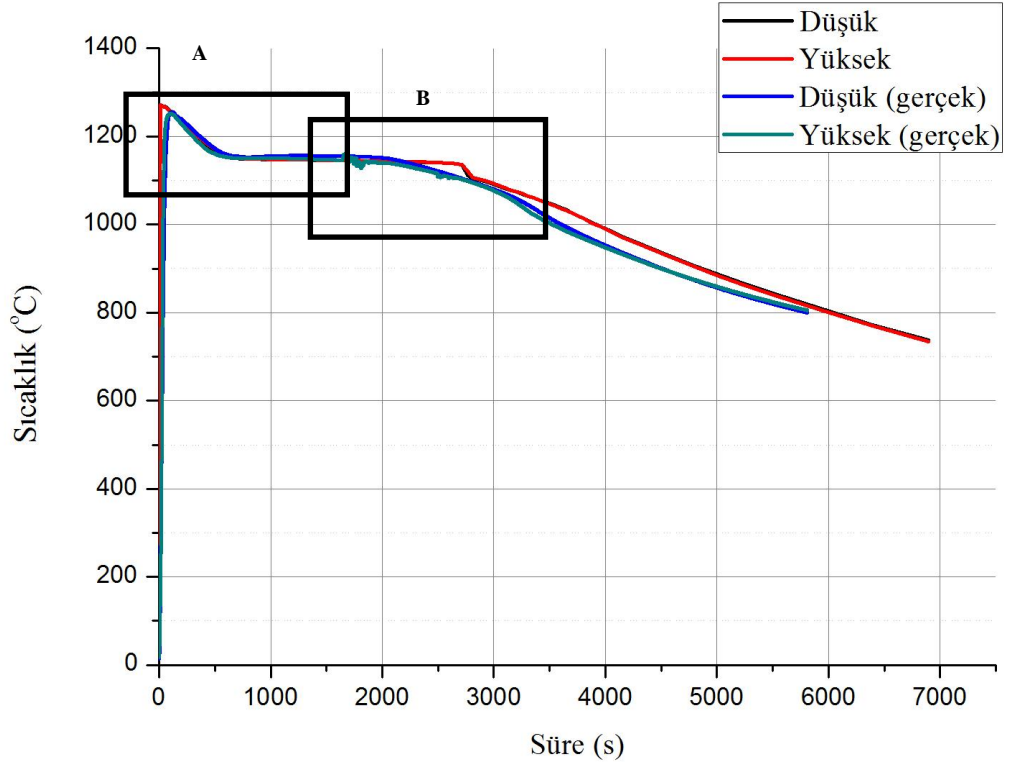
Şekil 5.17’te solidüs öncesi ve hemen sonrası sıcaklık değişim grafiği görülmektedir. Bu bölgede de likidüs ve solidüs arasında grafiklerin birbirleri ile

uyumlu olduğu görülmektedir. Solidüs sonrasında benzeşim programında elde edilen eğri ile gerçek ölçüm sonucunda elde edilen eğri arasında uyumsuzluk görülmektedir. Bunu da besleyici gömlekteki ekzotermik tepkimeler tamamlandıktan sonra, gömlek ısı geçirgenliğinde meydana gelen değişimlerle açıklamak mümkündür. Benzeşim programında bu değişimin tam olarak belirlenememesi nedeniyle uyumsuzlukların olacağı bilinmektedir. Fakat ASYEÖB gömlek ve ASDEÖB gömleklerden sıvı metal dökümü ve sonrasında alınan sıcaklık ölçümlerinden benzeşim programı karşılaştırılmasında belirgin bir uyumun olduğu söylenebilir.

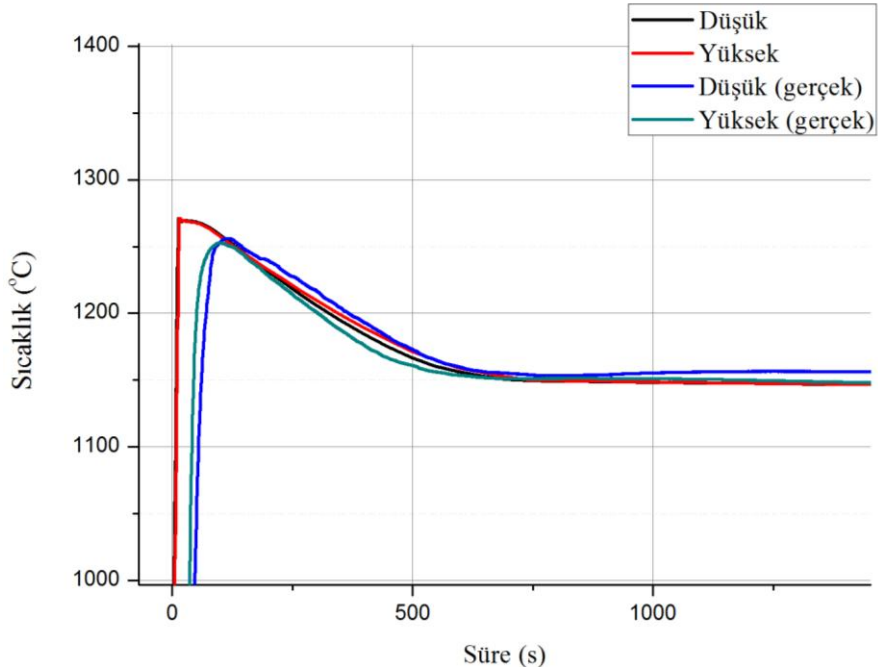
Tablo 5.5'te görüldüğü gibi benzeşim programı sonuçlarına göre ASDEÖB gömlek, ASYEÖB gömleğe göre daha hızlı soğurken, gerçek ölçüm sonuçlarında bu durum tam tersine gelişmektedir. Diğer besleyici gömlek karşılaştırmaları incelendiğinde hem soğuma hızlarında, hem de katılma için önemli noktalar olan likidüs ve solidüs noktalarına ulaşma sürelerinde benzeşim programından alınan sonuçlar ile gerçek ölçümler arasındaki farkın daha az görülmektedir. Solidüsten sonraki soğuma hızlarında ASDEÖB gömlek benzeşim ve gerçek ölçüm sonuçları arasındaki fark 0,001 °C/s kadar inmektedir. Benzeşim sonuçlarına göre her iki gömleğin solidüs noktasına ulaşma süreleri arasında 12 s fark bulunmaktadır. Neredeyse aynı anda ulaşmışlardır. Fakat gerçek ölçüm sonuçlarındaki ASDEÖB gömlek ve ASYEÖB gömlek arasındaki süre farkı 90 s olarak ölçülmüştür.

Tablo 5.5 Açık silindirik yüksek ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin deneme dökümlerinden ve benzeşim programından alınan sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırması

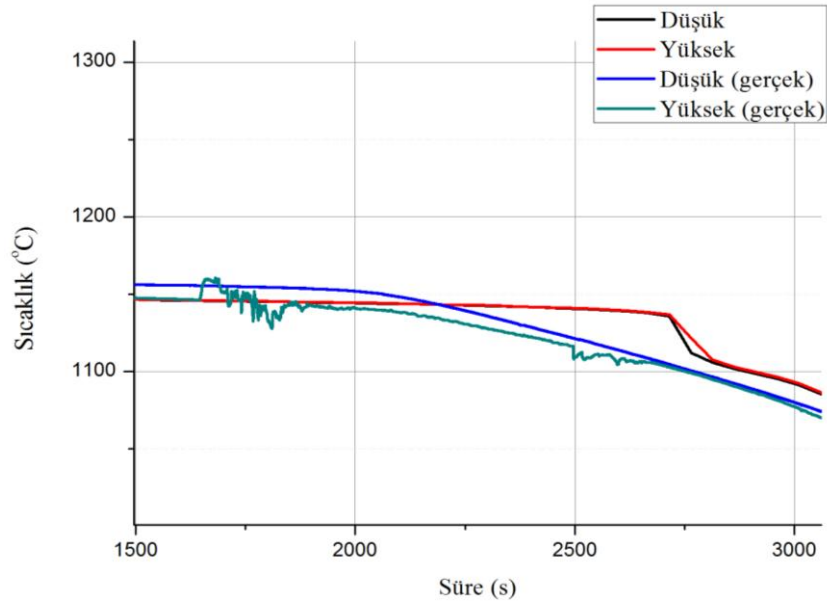
| Besleyici | Erişilen en Yüksek Sıcaklık (°C) | Sıvı Metalin Soğuma Hızı (°C/s) | Likidüse Ulaşma Süresi (s) | Solidüse Ulaşma Süresi (s) | Katı Metalin Soğuma Hızı (°C/s) |
|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Düşük Ekzotermik | 1270 | 0,260 | 728 | 2704 | 0,087 |
| Düşük Ekzotermik (Gerçek) | 1256 | 0,228 | 678 | 2034 | 0,088 |
| Yüksek Ekzotermik | 1271 | 0,232 | 747 | 2716 | 0,087 |
| Yüksek Ekzotermik (gerçek) | 1252 | 0,276 | 690 | 2124 | 0,069 |



Şekil 5.15 Açık silindirik yüksek ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 5.16 Açık silindirik yüksek ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (Şekil 5.15 A Bölgesi)



Şekil 5.17 Açık silindirik yüksek ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (Şekil 5.15 B Bölgesi)

Şekil 5.18, 5.19 ve 5.20’de açık silindirik orta ekzotermik ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlelerdeki sıvı metale ait benzeşim programından alınan ve gerçek ölçümler sonucunda elde edilen sıcaklık değişim grafikleri karşılaştırılmalı olarak gösterilmektedir. Şekil 5.18’deki sıcaklık değişim grafiğinin tamamı incelendiğinde gerçek ölçümler ve benzeşim programında alınan eğrilerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir.

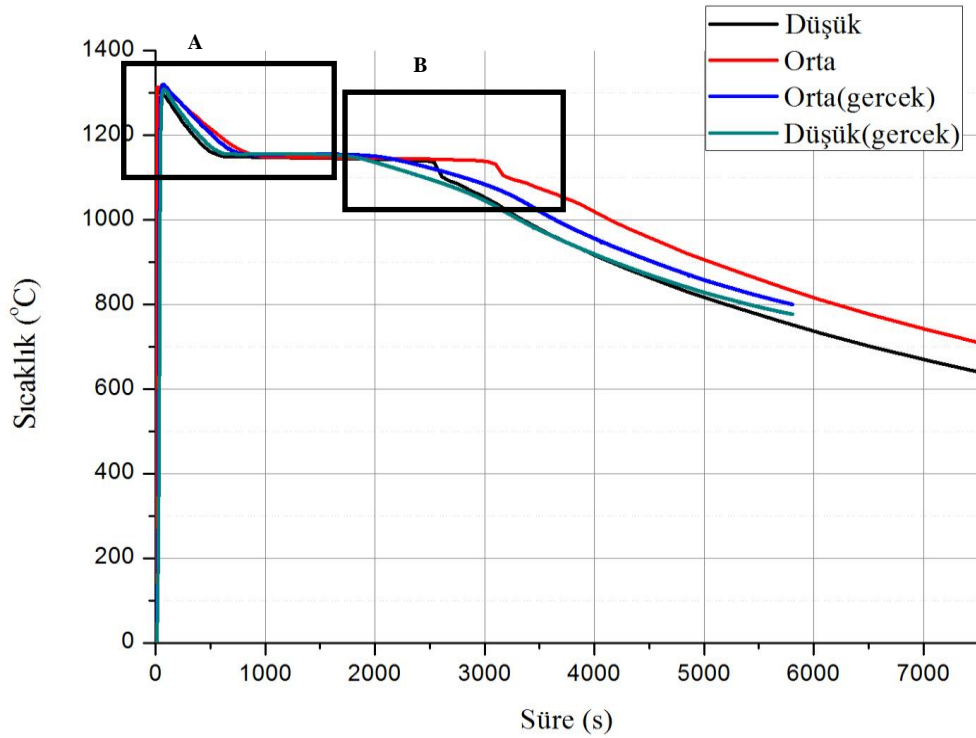
Şekil 5.19 incelendiğinde gerçek ölçüm sonucu elde edilen eğrilerin sıvı metalin likidüs çizgisine kadar olan eğiminin benzeşim programından alınan eğrilerin arasında kaldığı görülmektedir. Gerçek ölçümlerden elde edilen ve benzeşim programından alınan soğuma hızlarını incelendiğinde ASDEÖB gömlek soğuma hızları arasında $0,002 \text{ } ^\circ\text{C/s}$, ASOEÖB soğuma hızlarında $0,052 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ fark bulunmaktadır.. Siyah ile gösterilen eğriden ASDEÖB gömlek içerisindeki metalin benzeşim programında soğumasının gerçek ölçümlerden çıkan sonuçlardan daha hızlı olduğu görülmektedir.

Şekil 5.20’deki soğuma eğrileri incelendiğinde hem benzeşim sonuçlarında hem de gerçek ölçümlerin sonuçlarında ASDEÖB gömleğin katılaşmanın tamamlandığı

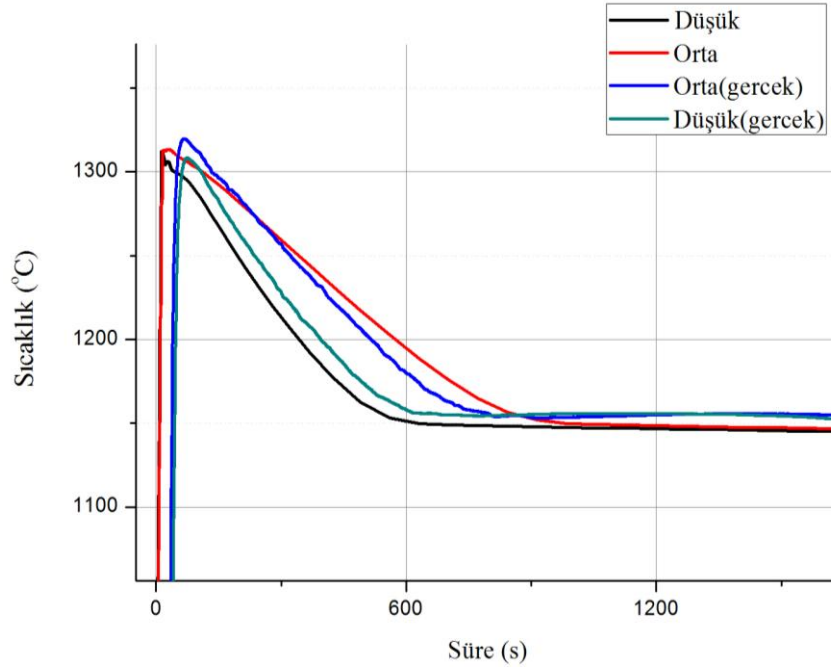
solidüs noktasına ASOEÖB gömlekten yaklaşık 1000 s önce geldiği görülmektedir (Tablo 5.6).

Tablo 5.6 Açık silindirik orta ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömleklere deneme dökümlerinden ve benzeşim programından alınan sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırması

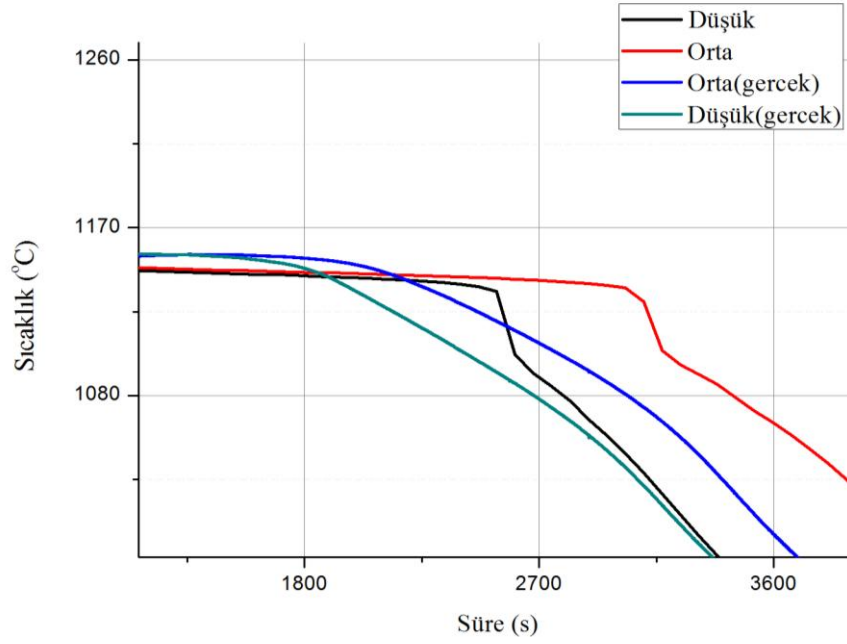
| Besleyici | Görülen en Yüksek Sıcaklık (°C) | Sıvı Metalin Soğuma Hızı (°C/s) | Likidüse Ulaşma Süresi (s) | Solidüse Ulaşma Süresi (s) | Katı Metalin Soğuma Hızı (°C/s) |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Düşük Ekzotermik | 1311 | 0,316 | 641 | 2534 | 0,128 |
| Düşük Ekzotermik (Gerçek) | 1308 | 0,314 | 638 | 1789 | 0,161 |
| Orta Ekzotermik | 1313 | 0,200 | 972 | 3023 | 0,109 |
| Orta Ekzotermik (gerçek) | 1319 | 0,252 | 778 | 1960 | 0,107 |



Şekil 5.18 Açık silindirik orta ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 5.19 Açık silindirik orta ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (5.18 A Bölgesi)



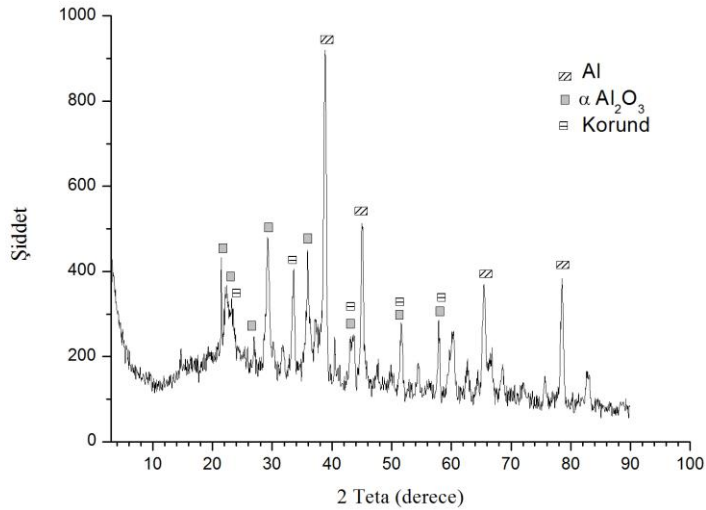
Şekil 5.20 Açık silindirik orta ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlekteki metalin benzeşim programından alınan ve gerçek sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (5.18 B Bölgesi)

Bilindiği gibi dökümü yapılan tüm parçaların katılma süreleri Bölüm İki’de anlatılan döküm modülü hesabı ile açıklanmaktadır. Besleyicilerin de Tablo 3.1’de

gösterildiği gibi hem geometrik modülleri hem de sahip oldukları ısıtma özelliğinden dolayı ısı modülleri bulunmaktadır. Modül değerleri karşılaştırılarak besleyicilerin soğuma hızları hakkında ön görüde bulunulabilir. Aynı ekzotermik özellikli besleyicilere ait gerçek ölçüm sonuçları ve modül hesaplamaları karşılaştırıldığında, daha büyük modüle sahip olan konik besleyici gömlekler kapalı besleyici gömleklere göre daha yavaş soğumaktadır. Bu nedenle 5.2 'de gösterildiği gibi katılma sonunda konik besleyici gömlek kapalı silindirik gömleklere göre daha az çekintiye sahiptir.

5.4 Döküm Öncesi ve Sonrası Besleyici Gömlek Faz Analizi

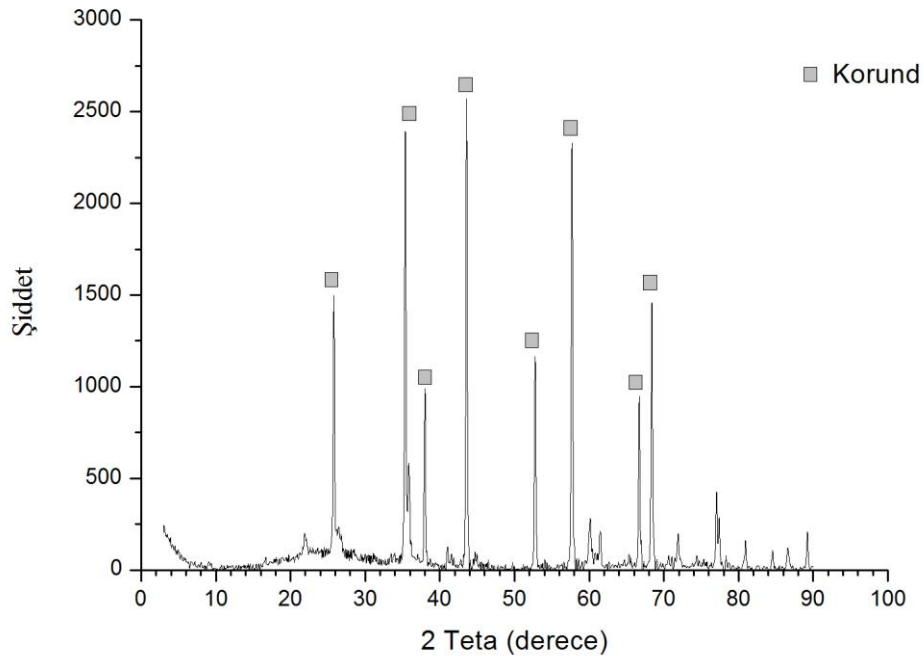
Döküm yapılmadan önce besleyici gömlekten numuneler alınarak toz haline getirilerek faz analiz yapılmıştır. Besleyici gömlek yapısının alüminyum esaslı ekzotermik bileşenden, alüminyum oksit ve alüminyum silikat esaslı yalıtım bileşenlerinden ve polimerik bağlayıcı ile yoğunluğu ayarlamak için çeşitli dolgu elemanlarından oluştuğu bilinmektedir (Menon, 1997). Yapılan X ışınları kırınım analizleri sonucunda ekzotermik eleman olarak alüminyum metali pikleri, yalıtım elemanı olarak da değişik fazlardaki alüminyum oksit pikleri Şekil 5.21'de görülmektedir. Ateşleyici bileşen olarak çok az miktarlarda kullanılan florür bileşiklerine ait pikler saptanamamıştır.



Şekil 5.21 Döküm öncesi besleyici gömlek içeriğinin faz analizi

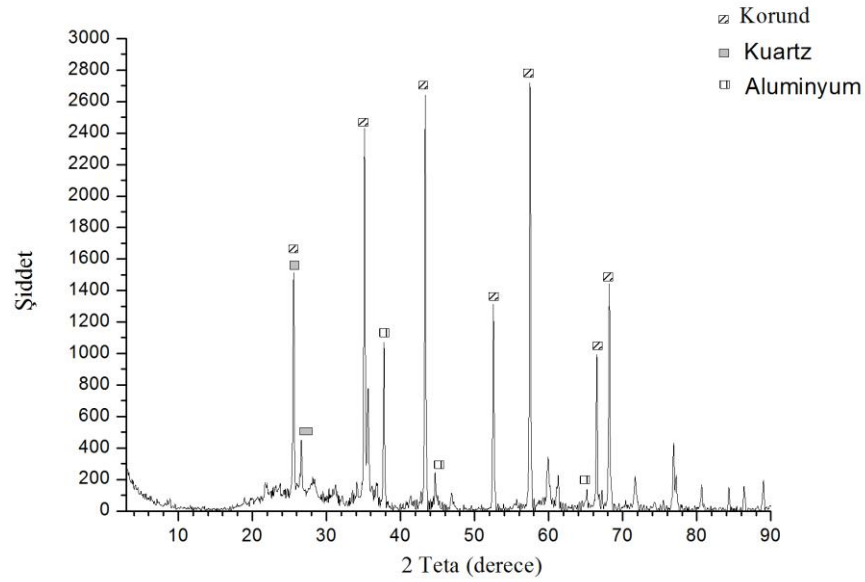
Besleyici gömlek bileşiminde bulunan yalıtım, ekzotermik ve ateşleyici bileşenlerin reaksiyon sonucunda değişimi takip edilmiştir. Yalıtım elemanı olarak seçilen alumina silikat bileşiklerinin pikleri ve metalik alüminyumun yanması sonucu elde edilen alüminyum oksit piklerine ulaşılmıştır. Şekil 5.22’de görüldüğü gibi yanma reaksiyonu sonucunda alüminyum oksit piklerinin şiddetinde artma olduğu gözlemlenmiştir

Besleyici gömleğe ekzotermik özellik sağlayan, metalik haldeki alüminyumun Bölüm İki’de verilen (2.1) ve (2.2) reaksiyonları ile oksitlenme tepkimesi sonucu yükseltgenerek enerji vermesidir. Metalik alüminyum ekzotermik reaksiyon sonucunda alüminyum oksit haline gelir. Ortaya çıkan alüminyum oksidin hangi fazda olacağı tepkimenin başladığı ve sonlandığı sıcaklıkla ilişkilidir. Tepkime sonucunda stokiometrik olmayan alüminyum oksitlerin meydana gelmesi de mümkündür (Duraes, Costa, Santos ve diğer, 2007). X ışınları kırınımı analizi ile başta metalik halde olan alüminyum tamamen korund fazına sahip alüminyum oksite dönüşmüştür.



Şekil 5.22 Hava ortamında yakma sonrası besleyici gömlek içeriğinin faz analizi

Döküm kalıbı içerisinde yanma şartlarına bağlı olarak, Şekil 5.23'teki X ışınları kırınım deseni incelendiğinde döküm sonrasında besleyici gömlekte tam yanmanın olmadığı görülmektedir. Burada “korund”dan başka alüminyum oksit fazlarının ortaya çıkması yanma şartlarına bağlanabilir. Ayrıca grafik üzerinde azda olsa metalik halde bulunan alüminyum fazı da görülmektedir. Yanma davranışının bu şekilde farklılık göstermesi, Bölüm İki’de verilen (2.1) ve (2.2) reaksiyonları sonucu ortaya çıkan enerjinin reaksiyon farklı ürünlerine göre değişmesinden kaynaklanmaktadır. Böylece yanma sonrası besleyici gömlekteki metalin sıcaklığı, oksitlenme şartlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.



Şekil 5.23 Dökümden sonra besleyici gömlekte alınan numunelerin faz analizi

5.4 DT-TG Analizleri

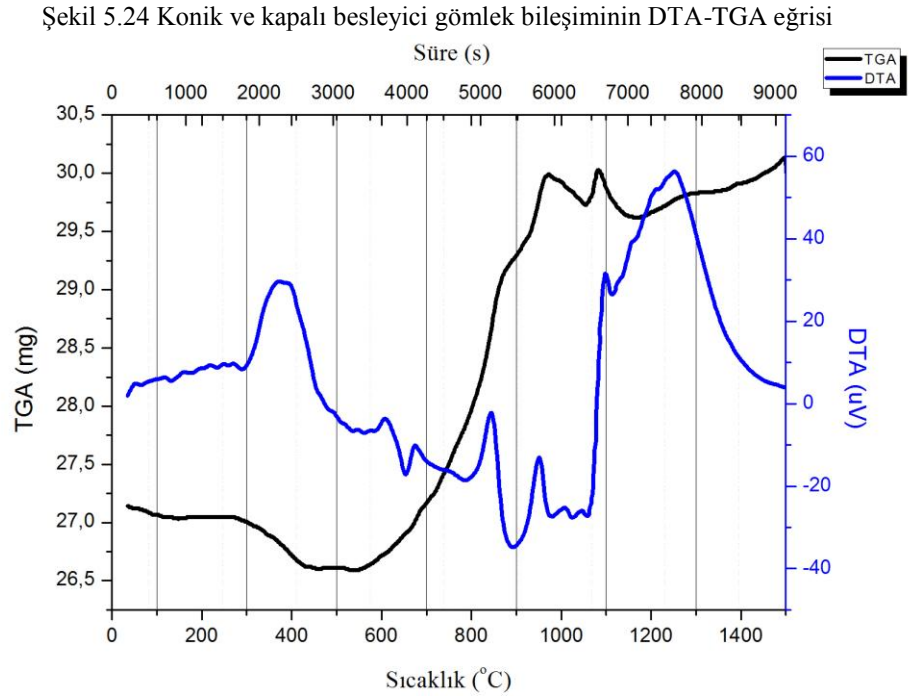
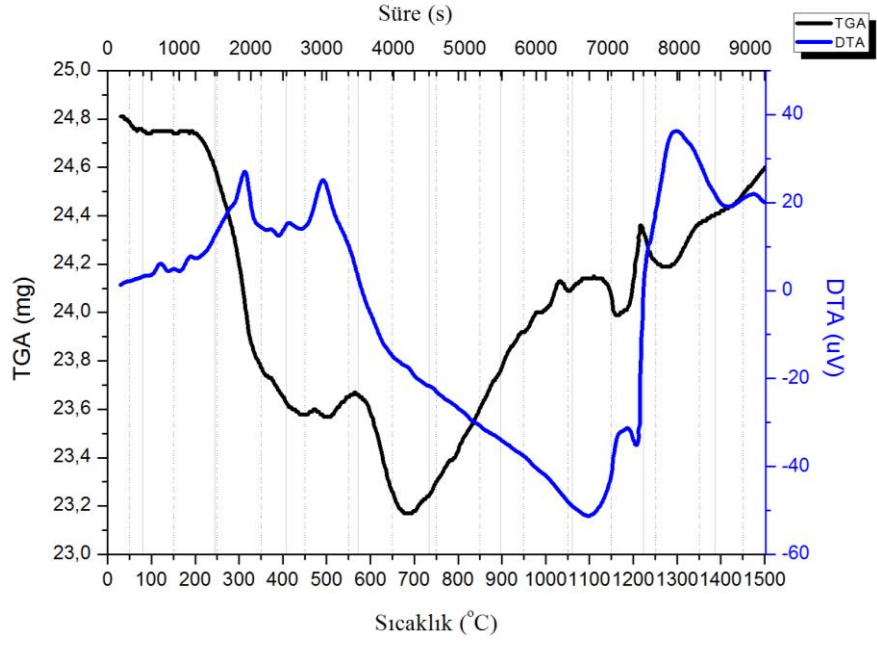
Hava ortamında gerçekleştirilen DT-TG analizleri incelendiğinde 400°C ile 1400°C arasında ekzotermik reaksiyonların olduğu görülmektedir. En yüksek enerji 1000°C-1400°C aralığında ortaya çıksa da reaksiyon başlama sıcaklığı 400°C'dir. Benzeşim programından alınan Tablo 5.1'de gösterilen verilere bakıldığında da orta ekzotermik besleyici gömlek dışındaki tüm besleyici gömleklerin reaksiyon başlama sıcaklıkları 400°C ve civarındadır. DT-TG analiz eğrileri incelendiğinde, analizde tercih edilen sıcaklık artış hızı ile reaksiyona başlama ve toplam reaksiyon

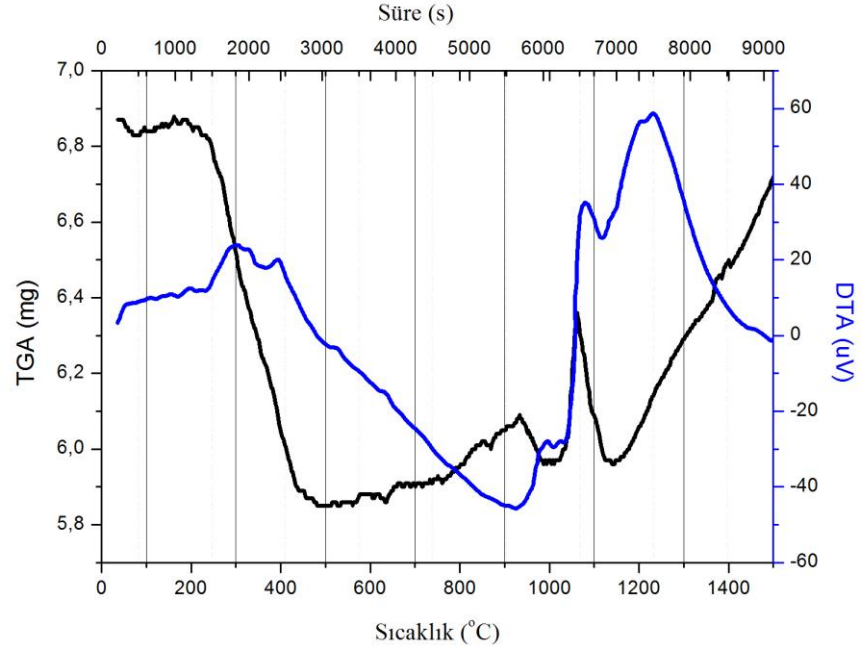
sürelerinin benzeşim programından alınan verilerden çok farklı olduğu görülmektedir. Döküm şartlarında, besleyici gömleklerin ısınmasının çok hızlı olmaktadır. DT-TG analizleri ile benzeşim programı arasındaki farklılığın ısınma farkından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Besleyici gömleklerin ısı iletkenlikleri açısından önemli parametrelerden biri de yoğunluktur. Sıcaklık değişimine bağlı yoğunluk değişimi sıvı metalden kalıba olan ısı geçişini değiştirmektedir. Bu da gömlek içerisindeki metalin soğuma rejimini değiştirmektedir. Özellikle Şekil 5.25 ve 5.26'de gösterilen yüksek ve orta ekzotermik özelliğe sahip gömlek karışımlarında belirgin bir ağırlık artışı meydana gelmiştir. Bu da ekzotermik besleyici gömleklerin temel çalışma prensibi olan termit reaksiyonu ile oksitlenerek enerji elde edilmesine dayanmaktadır. Şekil 5.27'da ise düşük ekzotermik reaksiyondan dolayı oksitlenme miktarı az, besleyici gömlek bünyesindeki başta bağlayıcı olmak üzere organiklerin yanması sonucu ağırlık kaybı fazladır.

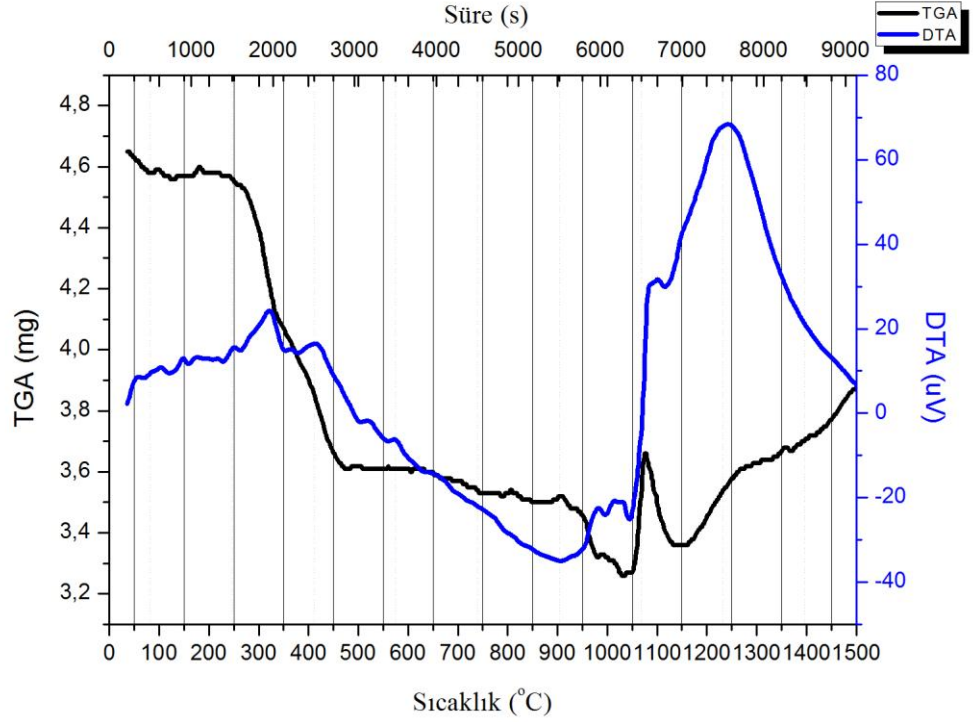
Şekil 5.24'de ise konik ve kapalı besleyicilerde kullanılan bileşimin ısı analizidir. Burada da bir miktar ağırlık azalışı olmakla birlikte özellikle ekzotermik reaksiyon meydana geldikten sonra belirgin bir artışında meydana geldiği görülmektedir.

Tüm besleyici gömlek bileşiminde Bölüm 2'de de bahsedildiği gibi ateşleyici olarak florlu bileşikler bulunmaktadır. DT-TG analizi sonucunda elde edilen eğriler incelendiğinde flor esaslı ateşleyicileri görevlerinin alüminyumun ergime sıcaklığına yakın değerlerde yapmaktadır. Bu nedenle ekzotermik reaksiyonun göstergesi olan DTA eğrisindeki azalma alüminyumun ergime sıcaklığına yakın değerlerde başlamıştır (Hahma, Gany, & Palovuori, 2006).





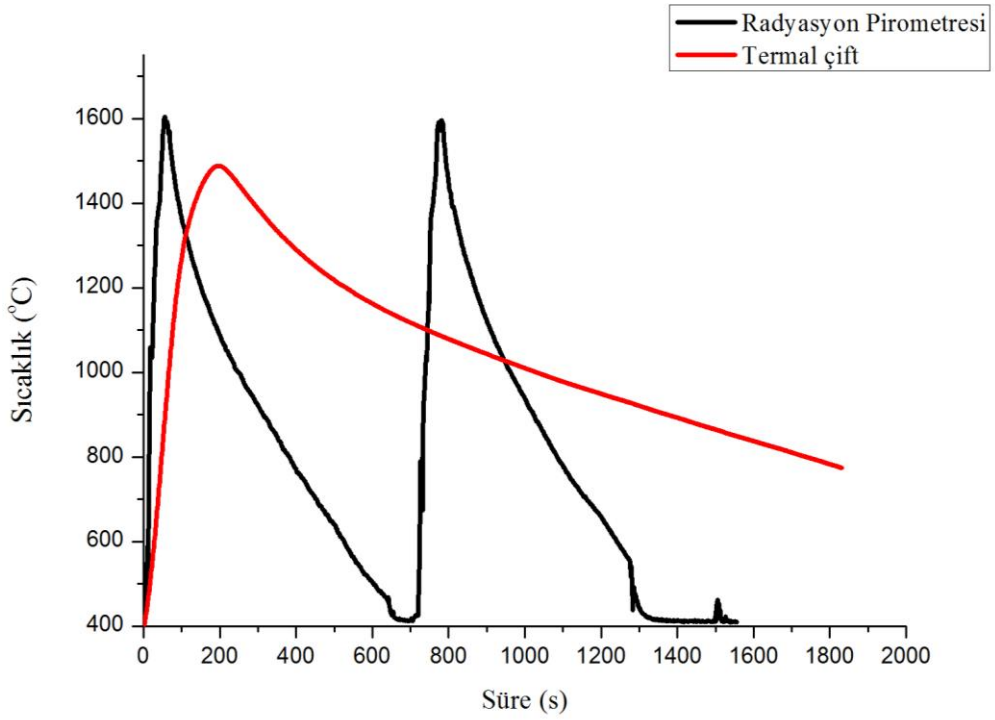
Şekil 5.26 Açık silindirik orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek bileşiminin DTA-TGA eğrisi



Şekil 5.27 Açık silindirik düşük ekzotermik özellikli besleyici gömlek bileşiminin DTA-TGA eğrisi

5.5 Hava Ortamında Gerçekleştirilen Yakma Verileri

Hava ortamında ardışık yapılan yakma işlemleri sonucunda Şekil 5.27’de görülen grafikler elde edilmiştir. Elde edilen grafiklerin en yüksek sıcaklık değerlerinin kalıp içerisindeki yakmadan çok farklı olduğu açıkça gözlenmektedir. Kalıp içerisinde 1300°C civarına çıkabilen en yüksek sıcaklık değeri hava ortamında iken 1600°C civarına çıkabilmektedir. Hava ortamında tam yanmanın (2.1) reaksiyonunun gerçekleştiği böylece de ortaya çıkan enerjinin daha fazla olduğu düşünülmektedir. Besleyici gömlekler kül fırınında 900°C’de yaklaşık 30 s içerisinde reaksiyona girmiştir. Toplam reaksiyon süreleri ise 70-75 s aralığındadır. Benzeşim programından alınan Tablo 5.1’deki veriler incelendiğinde, yakma işlemleri sırasında ölçülen süreler arasında 30-35 s fark bulunmaktadır.



Şekil 5.28 Konik ve kapalı silindirik gömleklerde kullanılan gömlek birleşiminin radyasyon pirometresi ve termal çift sıcaklık değişim grafiği

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR

Döküm sanayinde yaygın olarak kullanılan besleyici gömlekler ile gerçekleştirilen bu çalışmada NovaCast Flow&Solid döküm benzeşim programından ve gerçek döküm şartlarında elde edilen sonuçlarının karşılaştırılarak uyumları irdelenmiştir. Bu amaçla besleyici gömleklere ait farklı özellikler incelenerek belirlenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalı deneme dökümleri ile elde edilen besleyici gömleklerdeki metallerin soğuma rejimlerinin benzeşim programı ve gerçek döküm şartlarına uyumu irdelenmiştir.

Benzeşim programında kayıtlı olan EXO ve yüksek ekzotermik özellikli konik besleyici gömleklerin gerçek uygulamalarda benzeşim programına göre daha hızlı soğuduğu görülmüştür. Bu nedenle benzeşim programı ve gerçek uygulamalar arasında uyumsuzluk vardır.

Benzeşim programında kayıtlı EXO ve yüksek ekzotermik özellikli kapalı besleyici gömleklerin ısı ve geometrik modül özelliklerinden dolayı konik besleyici gömleğe göre besleyici içerisindeki metalin daha hızlı soğuma göstermesi beklenmekteydi. Fakat benzeşim sonuçlarına göre aynı şartlarda dökümü yapılan konik besleyici gömlekteki metal daha hızlı soğumuştur. Aynı zamanda benzeşim programından alınan sonuçlar ile gerçek döküm şartları arasında da uyumsuzluk vardır. Gerçek döküm şartlarında modül özelliklerine bağlı olarak kapalı besleyici daha hızlı soğuma göstermiştir.

Benzeşim programında kayıtlı yüksek, orta ve düşük ekzotermik özellikli besleyici gömleklerle yapılan çalışmalar sonucunda orta-düşük ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin karşılaştırmalı olarak incelendiği sıcaklık ölçümlerinde benzeşim programı ve gerçek uygulamalardan benzer soğuma eğrileri elde edilmiştir. Bu gruptaki diğer deneme dökümlerinde uyumsuzluklar olduğu görülmüştür.

Besleyici gömleklerin ısı karakteristilerinin incelenmesi sonucunda gömleklerin ekzotermik reaksiyon başlama sıcaklıklarının gerçek ölçümlerle uyumlu olduğu, fakat reaksiyon sürelerinde ve erişilen en yüksek sıcaklık değerlerinde uyumsuzlukların olduğu grlmştir.

X ışınları kırınım çalışmaları sonucunda besleyici gömleklerde yanma öncesi ve sonrası faz ve bileşim değerimleri tespit edilmiştir. Besleyici gömleklerin farklı ısı özellik göstermelerinin oluşan termit reaksiyonlarına ve reaksiyon kinetiğine bağlı olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Aran, A. (2007). *Döküm teknolojisi, imal usülleri ders notları*. İstanbul.
- Arıkan, M. ve Sahir, A. (2011). *Sonlu Elemanlar Metodu'nun Mühendislikteki Uygulamaları*. 25 Nisan 2013, Makina Mühendisleri Odası: <http://www.arsiv.mmo.org.tr/pdf/10944.pdf>
- American Society of Materials, (1998). Metal Handbook (10). *Casting*, Ohio
- Beely, P. (2001). *Foundry technology*, Oxford:Butterworth-Heinemann
- Campbell, J. (2003). *Casting*. Birmingham:Butterworth-Heinemann
- Campbell, J. (2003). *Casting practice*. Birmingham:Butterworth-Heinemann
- Candeger, K. C. (2001). Dökümde besleyiciler ve ekzotermik besleyici malzemeler. *Metalurji* , 5-12.
- Costabel, M. (10 Eylül 1986). *Principles of boundary element methods*. Nisan 30, 2013. http://perso.univ-rennes1.fr/martin.costabel/publis/Co_PrinciplesBEM.pdf.
- Çolak, M. ve Kayıkçı, R. (2002). Döküm simülasyon programları üzerine bir değerlendirme. *Metal Dünyası* , 2-5.
- Duraes, L., Costa, B. F., Santos, R., Correia, A., Campos, J., ve Portugal, A. (2007). Fe₂O₃/alüminyum termite reaction intermediate and final products characterization. *Materials Science and Engineering A* , 199-210.
- Foseco Foundry, C. (2000). *Foundry practice*. 24 Mayıs 2013. http://www.foseco.com.tr/tr/downloads/FoundryPractice/23001_Simulation_with_thermal_true_data.pdf.
- Hahma, A., Gany, A. ve Palovuori, K. (2006). Combustion of activated aluminum. *Combustion and Flame* , 464-480.

- Hardin, R., Ou, S. ve Carlson, K. (2001). *Feeding and risering guidelines for steel Casting*.
- Kayıkçı, R. ve Akar, N. (2007). Farklı kesit kalınlıklarına sahip büyük hacimli bir çelik dökümün simülasyon teknikleri ile tasarlanması. *Politeknik* , 219-227.
- Kumruoğlu, L. C. ve Özer, A. (2008). Investigation of critical liquid fraction factor in nodular iron casting by computer simulation. *Journal of Materials Processing Technology* , 182-188.
- Menon, P. R. (1997). *Patent No. US 006133340A*. Sa Paulo, Brazil.
- Neu, M. G. ve Gough, M. J. (1993). *Patent No. US 005180759A*. Birmingham, England.
- NovaCast (2013), *Nova Flow&Solid Gravity CV User Guide 4.6*. Ronneby:Novacast System AB
- Oliveira, M. J., Malherios, L. F. ve Riberio, C. A. (1999). Evaluation of the heat of solidification of cast irons from continuous cooling curves. *Journal of Materials Processing Technology* , 25-30.
- Ravi, B. (2008). Casting simulation and optimisation: benefits, bottlenecks, and best practices. *Technical Paper for Indian Foundry Journal January* , 1-12.
- Richard Walter Heine, C. R. (1967). *Principles of Metal Casting*. Stanford: McGraw-Hill.
- Rundman, K. B. (2000). *Metal casting*. Michigan: Department of Materials Science and Engineering Michigan Technical University.
- Saturia, M., Gada, V. H., Sharma, A. ve Ravi, B. (2012). Computation of feed-paths for casting solidification using level-set-method. *Journal of Materials Processing Technology* , 1236-1249.

Rio Tinto Iron and Titanium Inc. (2000). *Ductile iron the essentials of gating and risering system design*. Montreal: Sorelmetal.

Tavakoli, R. ve Davami, P. (2008). Automatic optimal feeder design in steel casting process. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* , 921-932.

Twardowska, H. ve Aufderheide, R. C. (2002). *Patent No. US 006360808B1*. Dublin Ohio.

Voller, V. R. (2009). *Basic control volume finite element methods for fluids and solids*. Singapore: World Scientific Publishing.