

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖKÜM BENZEŞİMİ İLE BESLEYİCİ
GÖMLEKLERİN İŞLEVİNİN OPTİMİZASYONU

İbrahim Hayri KESER

Ağustos, 2016

İZMİR

DÖKÜM BENZEŞİMİ İLE BESLEYİCİ GÖMLEKLERİN İŞLEVINİN OPTİMİZASYONU

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

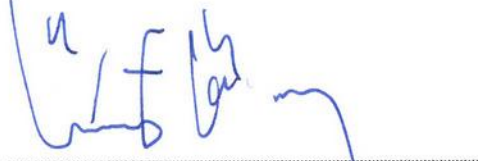
İbrahim Hayri KESER

Ağustos, 2016

İZMİR

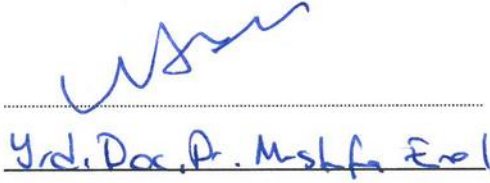
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

İBRAHİM HAYRİ KESER tarafından **PROF. DR. ÜMİT CÖCEN** yönetiminde hazırlanan “**DÖKÜM BENZEŞİMİ İLE BESLEYİCİ GÖMLEKLERİN İŞLEVİNİN OPTİMİZASYONU**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

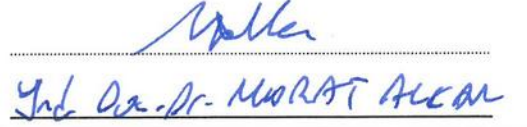


Prof. Dr. Ümit CÖCEN

Yönetici



Jüri Üyesi



Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR
Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

0199.STZ.2013-1 nolu “Yeni Nesil Ön Şekillendirilmiş Besleyici Gömleklerinin Tasarımı, Optimizasyonu ve Üretimi” isimli SANTEZ projesi kapsamında hazırlanmış olan bu bu çalışmaya vermiş oldukları katkılardan dolayı Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığına ve Çukurova Kimya Endüstrisi A. Ş.’ye,

Bu çalışmanın her aşamasının gerçekleştirilmesinde bilgi ve birikimini benimle paylaşan başta danışman hocam Prof. Dr. Ümit CÖCEN’e ve aynı projede görev aldığım doktora öğrencisi Haydar KAHRAMAN’a,

Besleyici gömleklerin uygulamalarına yönelik bilgilerini benimle paylaşan Met. Malz. Müh. M. Kemal TOZAN’a, döküm benzeşim çalışmalarının yapılmasında tecrübelerini benimle paylaşan Yük. Met. Müh. Yalçın ÇAY’a,

Deneme dökümlerinin yapılmasına olanak sağlayan başta Met. ve Malz. Müh. Can DERMAN’a ve tüm Derman Döküm Yedek Parça İmalat Ltd. Şirket çalışanlarına, Met. ve Malz. Müh. Berk Refik NUMANOĞLU’na ve tüm Pınar Döküm Sanayi Ticaret A.Ş. çalışanlarına, radyografi görüntülerinin çekilme aşamasında yardımlarını benden esirgemeyen başta Met. ve Malz. Müh. Onur KÖSE’ye ve tüm Erma Teknik Şirketi çalışanlarına,

Numune hazırlama ve kesme işlemlerindeki yardımlarından dolayı Dalyan ÖZKAN’a ve Metin GEMİCİ’ye, gerektiğinde zaman ayırmaktan kaçınmayan bölümümüzün araştırma görevlilerine ve yüksek lisans öğrencisi arkadaşlarıma,

Bu çalışmanın hazırlanması aşamasında gösterdikleri sabır ve anlayıştan dolayı aileme,

Teşekkürü bir borç bilirim.

İbrahim Hayri KESER

DÖKÜM BENZEŞİMİ İLE BESLEYİCİ GÖMLEKLERİN İŞLEVİNİN OPTİMİZASYONU

ÖZ

Bu çalışmanın amacı döküm benzeşim programı kullanarak endüstriyel uygulamalarda kullanılan ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin işlevini optime etmektir. Bu amaç doğrultusunda karakterizasyon çalışmaları, deneme dökümleri ve benzeşim çalışmaları yapılmıştır. Karakterizasyon çalışmaları kapsamında döküm öncesi besleyici gömlek numuneleri hazırlanarak bunların DT-TG analizi yapılmış ve besleyici gömleklere meydana gelen reaksiyonlar incelenmiştir. Döküm öncesi ve döküm sonrası besleyici gömlek numunelerinin faz bileşenleri ve değişimi X ışınları kırınım analizi yapılarak belirlenmiştir. Deneme dökümleri için döküm benzeşim programı kullanarak döküm parçasının boyutları belirlenmiş ve kalıp tasarımı yapılmıştır. Deneme dökümlerinde döküm parçası ve besleyici gömleklerin derecelere olan uzaklıkları aynı alınmıştır. Düşük alaşımli karbon çeliği, östenitik mangan çeliği, östenitik paslanmaz çelik olmak üzere üç farklı çelik alaşımı için deneme dökümleri yapılmıştır. Herbir alaşımın deneme dökümlerinde yüksek ve orta ekzotermik özellikli iki farklı besleyici gömlek kullanılmıştır. Dökümler sırasında B-tipi, S-tipi, K-tipi termal çiftler ile besleyici metalinden, besleyici gömleğin iç ve dış yüzeyinden sıcaklık ölçümleri alınarak soğuma eğrileri çıkarılmıştır. Döküm sonrası parçaların çekinti bölgelerini belirlemek amacıyla gama radyografi testi yapılmıştır. Benzeşim çalışmaları deneme döküm şartlarına uygun olarak tasarlanmıştır. Döküm benzeşim programının veri tabanında kayıtlı bulunan besleyici gömleklerin özellikleri değiştirilerek benzeşim çalışmaları yapılmıştır. Benzeşim çalışmalarından alınan sıcaklık ölçümleri ve çekinti bölgesi görüntüleri deneme dökümlerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deneme dökümünde kullanılan besleyici gömleklerin özellikleri ile benzeşim programının veri tabanında kayıtlı besleyici gömlek özelliklerinin uyumluluğu arttırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Çelik döküm, besleyici gömlek, benzeşim, sıcaklık ölçüm, gama radyografi, çekinti

OPTIMIZATION OF FUNCTION OF FEEDER SLEEVES WITH CASTING SIMULATION

ABSTRACT

The aim of this study is optimize the function of exothermic feeder sleeve used in industrial applications through casting simulation. In order to achieve this goal; characterization studies, trial casting and simulation studies have been performed. The samples of feeder sleeve before casting have been prepared for characterization studies. DT-TG analysis is carried out so as to determine the reactions occurring in feeder sleeves. Phase components of feeder sleeve before and after casting is determined by X-ray diffraction analysis. Cast part dimensions and mold design were determined by casting simulation before trial casting. Trial casting studies were conducted with three different steel alloys that consist of low-alloy carbon steel, austenitic manganese steel, austenitic stainless steel. Two different feeder sleeves are high and medium exothermic featured, were used in trial casting. The temperatures of the center of metal in feeder sleeve, the inner and outer surface of feeder sleeve were measured and cooling curves were obtained. B-type, S-type, K-type thermocouples were used for measurements. Gamma radiography test was conducted to determine shrinkage region of casting parts after the trial casting. Casting simulation and trial casting parameters were selected harmony for each other. Properties of feeder sleeve in casting simulation database were modified and simulation studies were conducted. The temperature measurements and shrinkage image were compared with simulation and trial casting. The compatibility of feeder sleeves properties between casting simulation and trial casting was improved.

Keywords: Steel casting, feeder sleeve, simulation, measuring temperature, gamma radiography, shrinkage

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|--|--------------|
| YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU | ii |
| TEŞEKKÜR..... | iii |
| ÖZ | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | ix |
| TABLolar LİSTESİ..... | xvi |
| BÖLÜM BİR- GİRİŞ..... | 1 |
| BÖLÜM İKİ- TEORİK İNCELEME | 4 |
| 2.1 Katılma..... | 4 |
| 2.1.1 Katılma Buzulmesi | 4 |
| 2.1.2 Buzulme Oluşumu | 7 |
| 2.2 Besleme Mekanizmaları | 7 |
| 2.2.1 Sıvı Beslemesi | 7 |
| 2.2.2 Kütle Beslemesi | 8 |
| 2.2.3 Dentritler Arası Besleme | 8 |
| 2.2.4 Patlama Beslemesi | 8 |
| 2.2.5 Katı Beslemesi | 9 |
| 2.3 Besleyici Tasarımı | 9 |
| 2.3.1 Modül Kriteri | 10 |
| 2.3.2 Hacim Kriteri | 13 |
| 2.3.3 Besleme Mesafesi ve Besleyici Konumu | 15 |
| 2.3.3.1 Besleyici ve Uç Bölgeler Açısından Döküm Parçasının Sağlamlığı | 19 |
| 2.3.3.2 Üstten Besleyicili Döküm Kesitleri | 21 |
| 2.3.3.3 Yandan Beslenen Döküm Kesitleri..... | 23 |
| 2.3.3.4 Uç Etkili Döküm Kesitlerinde Yandan Besleme | 24 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.4 Besleyici G6mleklerin Kullanılmasıyla Verimin Arttırılması..... | 25 |
| 2.3.5 D6k6m Benzeşim Programı ve Optimizasyon | 26 |
| 2.3.5.1 Benzeşim Sonuçlarının Değerlendirilmesi | 29 |
| B6L6M 6Ç- LİTERAT6R ALIşMALARİ..... | 32 |
| B6L6M D6RT- MALZEME VE Y6NTEM..... | 53 |
| 4.1 Karakterizasyon alışmaları | 54 |
| 4.1.1 Besleyici G6mleklerin Karakterizasyonu | 54 |
| 4.1.1.1 Numune Hazırlama | 54 |
| 4.1.1.2 DT-TG Analizi..... | 55 |
| 4.1.1.3 X Işınları Kırınım Desenleri | 55 |
| 4.1.2 D6k6m Parçalarının Karakterizasyonu..... | 55 |
| 4.1.2.1 Numune Hazırlama | 55 |
| 4.1.2.2 Mikroyapı İncelemeleri..... | 56 |
| 4.1.2.3 Kimyasal Analizler | 56 |
| 4.1.2.4 ekinti Tayini | 57 |
| 4.2 Deneme D6k6mleri | 58 |
| 4.3 D6k6m Benzeşim alışmaları..... | 62 |
| 4.3.1 D6k6m Parçası ve Kalıp Tasarımı..... | 62 |
| 4.3.2 D6k6m Benzeşim Parametreleri | 64 |
| 4.3.2.1 D6k6m Benzeşim Programında Kullanılan Parametrelerin Belirlenmesi | 65 |
| 4.3.2.2 D6k6m Benzeşim Programında Besleyici G6mleğin İşlevine Etki Eden Parametrelerin Değiştirilmesi | 67 |
| B6L6M BEş-ARAşTIRMA BULGULARI VE TARTIşMA..... | 71 |
| 5.1 Karakterizasyon Sonuçları | 71 |
| 5.1.1 Besleyici G6mlek Karakterizasyon Sonuçları..... | 71 |
| 5.1.1.1 DT-TG Analiz Sonuçları..... | 72 |

| | |
|--|------------|
| 5.1.1.2 X Işınlari Kırınım Sonuçları | 77 |
| 5.1.2 Döküm Parçalarının Karakterizasyon Sonuçları | 79 |
| 5.1.2.1 Mikroyapı Görüntüleri | 79 |
| 5.1.2.2 Kimyasal Analiz Sonuçları | 84 |
| 5.2 Deneme Dökümleri | 86 |
| 5.2.1 Deneme Dökümlerinin Sıcaklık-Süre Grafikleri | 87 |
| 5.2.2 Döküm Parçalarının Çekinti Sonuçları | 96 |
| 5.3 Döküm Benzeşim Sonuçları | 99 |
| 5.3.1 Deneme Dökümlerinde ve Döküm Benzeşim Çalışmalarında Ölçülen Sıcaklıkların Karşılaştırılması | 100 |
| 5.3.2 Döküm Benzeşim Çalışmaları Çekinti Sonuçları | 112 |
| BÖLÜM ALTI- SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 118 |
| KAYNAKLAR | 121 |
| EKLER..... | 127 |
| Ek-1: Sembol Listesi | 127 |
| Ek-2: Tablolar..... | 130 |
| Ek-3: Şekiller..... | 139 |

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

| | | |
|------------|---|----|
| Şekil 2.1 | Sıvı büzülmesi, sıvı-katı büzülmesi, katı büzülmesi şematik gösterimi ... | 5 |
| Şekil 2.2 | Besleme mekanizmaları | 7 |
| Şekil 2.3 | Katılaşmanın son aşamasında (a) Dentritler arası besleme giderek güçleşirken (b) Az miktarda ötektik bileşiğin bulunması beslemeyi kolaylaştırmaktadır..... | 8 |
| Şekil 2.4 | Katı besleme ve döküm içerisinde oluşan sıcak bölge çevresindeki plastik bölgeler..... | 9 |
| Şekil 2.5 | Besleyici şekilleri ve verimlikleri, a) Silindirik, b) Yarım küre, c) Kesik konik, d) Ekzotermik..... | 11 |
| Şekil 2.6 | Modülü ve hacmi bilinen döküm parçası için besleyici gömlek kalınlığının belirlenmesi..... | 14 |
| Şekil 2.7 | Modülü ve hacmi bilinen döküm parçası için besleyici gömlek boyutlarının belirlenmesi..... | 14 |
| Şekil 2.8 | Üstten ve yandan beslenen döküm parçaları | 15 |
| Şekil 2.9 | Üst besleyici besleme mesafesi | 16 |
| Şekil 2.10 | Yan besleyici besleme mesafesi | 16 |
| Şekil 2.11 | İki besleyici kullanılması durumunda yan besleme mesafesi | 17 |
| Şekil 2.12 | a) Besleyici besleme bölgesi, b) Uç besleme bölgesi..... | 17 |
| Şekil 2.13 | Karakteristik sıcaklık dağılımı | 18 |
| Şekil 2.14 | a) Besleme yolu kapalı çekinti oluşumu söz konusu b) Besleme yolu açık çekinti oluşmaz..... | 19 |
| Şekil 2.15 | Besleyici ve uç besleme bölgelerinin kesit kalınlığı ve genişliğe bağlı değişimi | 20 |
| Şekil 2.16 | a) Besleyici bölgesi ve uç bölgesi kesişmekte, b) İki bölgenin kesişmeme durumu | 21 |
| Şekil 2.17 | a) Uç bölgeler besleyici içinde kalırsa plaka sağlam, b) Plaka uzunluğu arttıkça görülen çekinti hataları..... | 22 |

| | | |
|------------|--|----|
| Şekil 2.18 | Yandan beslenen plaka; a) Uç bölgeler besleyici bölgesi içinde, b) Besleyici bölgesi içinde uç bölge oluşumu yoktur, çekinti oluşur..... | 23 |
| Şekil 2.19 | Döküm parça uzunluğu, döküm parça genişliği ve besleyici çapına bağlı besleme mesafesi..... | 24 |
| Şekil 2.20 | Besleyici tasarımı ve optimizasyonu..... | 27 |
| Şekil 2.21 | a) Termal çift ile sıcaklık ölçümü, b) Soğuma eğrisi bölgeleri..... | 31 |
| Şekil 3.1 | 100x100x100 mm boyutlarındaki numunenin, a) GGG40, b) GGG60, c) GGG80 alaşımından dökülmüş görüntüsü..... | 38 |
| Şekil 3.2 | 156x156x156 mm boyutlarındaki numunenin, a) GGG40, b) GGG60, c) GGG80 alaşımından dökülmüş görüntüsü..... | 38 |
| Şekil 3.3 | 210x210x210 mm boyutlarındaki numunenin, a) GGG40, b) GGG60, c) GGG80 alaşımından dökülmüş görüntüsü..... | 39 |
| Şekil 3.4 | a) Sıcak bölgelerin belirlenmesi, b) Kum besleyici kullanımı, c) Besleyici gömlek kullanımı..... | 41 |
| Şekil 3.5 | a) Tek besleyici kullanılarak gerçekleştirilen benzeşim çalışmasında çekinti hatası görülen bölgeler, b) İki besleyici kullanılan benzeşim çalışmasında çekinti bölgeleri..... | 41 |
| Şekil 3.6 | Kırıcı maça kullanılarak yapılan tasarım..... | 42 |
| Şekil 3.7 | a) Referans dökümün üst görünüşü, b) Besleyici gömlek kullanılan dökümlerde termal çiftlerin kalıp içindeki pozisyonu..... | 42 |
| Şekil 3.8 | a) Sıvı metalin soğuma eğrisi, b) Farklı besleyici gömleklerin kullanılması sonucunda sıvı metalin soğuma eğrisi..... | 43 |
| Şekil 3.9 | a) Cüruf A ile üretilen besleyici gömleğin ısı kaybı-süre grafiği, b) Cüruf B ile üretilen besleyici gömleğin ısı kaybı-süre grafiği..... | 45 |
| Şekil 3.10 | Farklı besleyici gömlekler kullanılarak dökülen parçaların görüntüleri. | 45 |
| Şekil 3.11 | a) Besleyici gömleğin yoğunluk-sıcaklık grafiği, b) Besleyici gömleğin ısı kapasitesi-sıcaklık grafiği..... | 46 |
| Şekil 3.12 | Besleyici gömleğin ısı iletim katsayısı-sıcaklık grafiği..... | 46 |
| Şekil 3.13 | Katılma davranışının incelenmesi için sıcaklık ölçümü alınan bölgeler | 47 |
| Şekil 3.14 | Katılma sırasında besleyici gömleğin ısı iletim katsayısının C1 ve C2 bölgelerinden hesaplanan sıcaklık gradyanına etkisi..... | 47 |

| | | |
|------------|--|----|
| Şekil 3.15 | Termal çiftlerin yerleştirilmesi..... | 50 |
| Şekil 3.16 | L2 olarak adlandırılan besleyici gömleğin deneysel ve benzeşim çalışmalarında ölçülen sıcaklıkların süreye bağlı değişimi..... | 50 |
| Şekil 3.17 | L5 olarak adlandırılan besleyici gömleğin deneysel ve benzeşim çalışmalarında ölçülen sıcaklıkların süreye bağlı değişimi..... | 50 |
| Şekil 4.1 | Deneysel çalışmaların akış şeması | 53 |
| Şekil 4.2 | DT-TG analizi için numune çıkarılan besleyici bölgeleri..... | 54 |
| Şekil 4.3 | a) Parçadan alınan bölge, b) Besleyici metalinden alınan bölgeler..... | 56 |
| Şekil 4.4 | Gama radyografi deneyinde döküm parçalarının yerleştirilmesi | 58 |
| Şekil 4.5 | Gama radyografi deneyinde ışın gönderen düzenek | 58 |
| Şekil 4.6 | Ekzotermik besleyici gömleklerin geometrik ve modül özellikleri | 59 |
| Şekil 4.7 | a) Alt derecenin görüntüsü, b) Üst derecenin görüntüsü..... | 60 |
| Şekil 4.8 | AISI 4130 üretim prosesi akış şeması | 60 |
| Şekil 4.9 | Östenitik mangan çeliği üretim prosesi akış şeması..... | 60 |
| Şekil 4.10 | CF-8M alaşımlı çeliğin üretim prosesi akış şeması | 61 |
| Şekil 4.11 | Deneme dökümlerinin ve numunelerinin kodlanması | 61 |
| Şekil 4.12 | Deneysel ve benzeşim çalışmalarında kullanılan a) derecenin üstten görünüşü ve b) kalıp tasarımı (mm) | 63 |
| Şekil 4.13 | a) Döküm metali ve besleyici gömleklerin benzeşim programına tanıtılması, b) Kalıp tasarımı | 64 |
| Şekil 4.14 | a) Döküm parametrelerinin belirlenmesi b) Döküm metalinin ve besleyici gömleklerin hücrelere ayrılması..... | 66 |
| Şekil 4.15 | a) Hücre sayısı, b) Döküm boşluğu ile kalıp yüzeyi arasındaki mesafe . | 66 |
| Şekil 4.16 | Benzeşim programındaki sıcaklık sensörlerinin kalıp içerisindeki konumları | 67 |
| Şekil 4.17 | Benzeşim programında besleyici gömlek özelliklerinin değiştirilmesi a) Ateşleme sıcaklığı, yanma süresi, enerji kapasite b) Isı iletim katsayısı ve yoğunluk parametrelerinin değiştirilmesi..... | 68 |
| Şekil 5.1 | Yüksek ekzotermik besleyici, Şekil 4.2 A bölgesi DT-TG grafiği | 73 |
| Şekil 5.2 | Yüksek ekzotermik besleyici, Şekil 4.2 B bölgesi DT-TG grafiği | 74 |
| Şekil 5.3 | Yüksek ekzotermik besleyici, Şekil 4.2 C bölgesi DT-TG grafiği | 74 |

| | | |
|------------|---|----|
| Şekil 5.4 | Orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek, Şekil 4.2 A bölgesi DT-TG grafiği | 75 |
| Şekil 5.5 | Orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek, Şekil 4.2 B bölgesi DT-TG grafiği | 76 |
| Şekil 5.6 | Orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek, Şekil 4.2 C bölgesi DT-TG grafiği | 76 |
| Şekil 5.7 | Döküm öncesi yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin X ışınları kırınım deseni | 78 |
| Şekil 5.8 | Döküm sonrası yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin X ışınları kırınım desenleri..... | 78 |
| Şekil 5.9 | Döküm sonrası orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin X ışınları kırınım desenleri..... | 78 |
| Şekil 5.10 | AISI 4130-1 deneme dökümünde orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak üretilen döküm parçası ve besleyici metalinin mikroyapı görüntüsü a) 1 nolu bölge, b) 2 nolu üst bölge, c) 2 nolu alt bölge, d) 3 nolu besleyici gömleğe temas eden yüzey, e) 3 nolu iç kısım (50 büyütme) | 80 |
| Şekil 5.11 | AISI 4130-1 deneme dökümünde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak üretilen döküm parçası ve besleyici metalinin mikroyapı görüntüsü a) 1 nolu bölge, b) 2 nolu üst bölge, c) 2 nolu alt bölge, d) 3 nolu besleyici gömleğe temas eden yüzey, e) 3 nolu iç kısım (50 büyütme) | 82 |
| Şekil 5.12 | AISI 4130-2 deneme dökümünde orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak üretilen döküm parçası ve besleyici metalinin mikroyapı görüntüsü a) 2 nolu üst bölge, b) 2 nolu alt bölge (50 büyütme)..... | 83 |
| Şekil 5.13 | AISI 4130-2 deneme dökümünde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak üretilen döküm parçası ve besleyici metalinin mikroyapı görüntüsü a) 2 nolu üst bölge, b) 2 nolu alt bölge, c) 3 nolu besleyici gömleğe temas eden yüzey, d) 3 nolu iç kısım (50 büyütme).. | 83 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Şekil 5.14 | AISI 4130-1 deneme dökümü yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek metali SEM görüntüsü a) 3 nolu bölge besleyici gömleğe temas eden kısım, b) 3 nolu bölge besleyici gömleğe temas eden iç kısım | 85 |
| Şekil 5.15 | AISI 4130-1 deneme dökümü orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek metali SEM görüntüsü a) 3 nolu bölge besleyici gömleğe temas eden kısım, b) 3 nolu bölge besleyici gömleğe temas eden iç kısım | 85 |
| Şekil 5.16 | Soğuma hızlarının hesaplandığı bölgeler | 87 |
| Şekil 5.17 | AISI 4130-1 deneme dökümü sıcaklık-süre grafiği | 88 |
| Şekil 5.18 | AISI 4130-2 deneme dökümü sıcaklık-süre grafiği | 89 |
| Şekil 5.19 | ÖMÇ-1 deneme dökümü sıcaklık-süre grafiği..... | 91 |
| Şekil 5.20 | ÖMÇ-2 deneme dökümü sıcaklık-süre grafiği..... | 92 |
| Şekil 5.21 | CF-8M-1 deneme dökümü sıcaklık-süre grafiği | 94 |
| Şekil 5.22 | CF-8M-2 deneme dökümü sıcaklık-süre grafiği | 94 |
| Şekil 5.23 | Yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak dökülen AISI 4130 alaşımlı parçanın radyografi görüntüsü..... | 96 |
| Şekil 5.24 | Orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak dökülen AISI 4130 alaşımlı parçanın radyografi görüntüsü..... | 97 |
| Şekil 5.25 | Yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak dökülen ASTM-A128M-93A alaşımlı parçanın radyografi görüntüsü..... | 97 |
| Şekil 5.26 | Orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak dökülen ASTM-A128M-93A alaşımlı parçanın radyografi görüntüsü..... | 97 |
| Şekil 5.27 | Yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak dökülen CF-8M alaşımlı parçanın radyografi görüntüsü | 98 |
| Şekil 5.28 | Orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak dökülen CF-8M alaşımlı parçanın radyografi görüntüsü..... | 98 |
| Şekil 5.29 | ASTM-E186 referans kataloğu | 99 |
| Şekil 5.30 | AISI 4130 alaşımı merkez bölgesi, yüksek ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmaları sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16, A ve B bölgeleri)..... | 101 |
| Şekil 5.31 | AISI 4130 alaşımı iç yüzey bölgesi, yüksek ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmaları sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16, A ve B bölgeleri)..... | 102 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Şekil 5.32 | AISI 4130 alaşımı dış yüzey bölgesi, yüksek ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmaları sıcaklık-süre grafikleri..... | 102 |
| Şekil 5.33 | AISI 4130 alaşımı merkez bölgesi, orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16, A ve B bölgeleri) | 103 |
| Şekil 5.34 | AISI 4130 alaşımı iç yüzey bölgesi, orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16, A ve B bölgeleri) | 104 |
| Şekil 5.35 | AISI 4130 alaşımı dış yüzey bölgesi, orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri .. | 104 |
| Şekil 5.36 | AISI 4130 alaşımı merkez bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16, A ve B bölgeleri)..... | 105 |
| Şekil 5.37 | AISI 4130 alaşımı iç yüzey bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16, A ve B bölgeleri)..... | 106 |
| Şekil 5.38 | AISI 4130 alaşımı dış yüzey bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri..... | 107 |
| Şekil 5.39 | A128M-93-A alaşımı merkez bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmasının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16, A ve B bölgeleri) | 108 |
| Şekil 5.40 | A128M-93-A alaşımı iç yüzey bölgesi, orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmasının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16, A ve B bölgeleri)..... | 109 |
| Şekil 5.41 | A128M-93-A alaşımı dış yüzey bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri..... | 110 |
| Şekil 5.42 | CF-8M alaşımı merkez bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16; A, B ve C bölgeleri)..... | 111 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Şekil 5.43 | CF-8M alaşımı iç yüzey bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16; A ve B bölgeleri)..... | 111 |
| Şekil 5.44 | CF-8M alaşımı dış yüzey bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri..... | 112 |
| Şekil 5.45 | AISI 4130 alaşımı ve exokal-3 isimli besleyici gömlek seçilerek yapılan benzeşim çalışmasının çekinti bölgeleri..... | 113 |
| Şekil 5.46 | AISI 4130 alaşımı ve exokal-1 isimli besleyici gömlek seçilerek yapılan benzeşim çalışmasının çekinti bölgeleri..... | 113 |
| Şekil 5.47 | A128M-93-A alaşımı ve exokal-3 isimli besleyici gömlek seçilerek yapılan benzeşim çalışmasının çekinti bölgeleri..... | 114 |
| Şekil 5.48 | A128M-93-A alaşımı ve exokal-1 isimli besleyici gömlek seçilerek yapılan benzeşim çalışmasının çekinti bölgeleri..... | 114 |
| Şekil 5.49 | CF-8M alaşımı ve exokal-3 isimli besleyici gömlek seçilerek yapılan benzeşim çalışmasının çekinti bölgeleri..... | 115 |
| Şekil 5.50 | CF-8M alaşımı ve exokal-1 isimli besleyici gömlek seçilerek yapılan benzeşim çalışmasının çekinti bölgeleri..... | 115 |
| Şekil 5.51 | Yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak dökülen ASTM-A128M-93A alaşımli parçanın kumlama sonrası görüntüsü | 116 |
| Şekil 5.52 | Orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak dökülen ASTM-A128M-93A alaşımli parçanın kumlama sonrası görüntüsü | 116 |

TABLolar LİSTESİ

| | Sayfa |
|--|--------------|
| Tablo 2.1 Bazı metallerin özellikleri ve katılma sırasındaki hacim değişimleri.... | 5 |
| Tablo 2.2 Metal ve alaşımların katılma aralığı | 6 |
| Tablo 2.3 Basit şekilli parçaların döküm modülü..... | 12 |
| Tablo 3.1 Farklı besleyici tasarımlarından elde edilen sonuçların karşılaştırılması | 33 |
| Tablo 3.2 Farklı besleyici tasarımlarından elde edilen sonuçların karşılaştırılması | 34 |
| Tablo 4.1 Ocak sıcaklıkları ve döküm süreleri..... | 61 |
| Tablo 4.2 Döküm potasından alınan numunelerin kimyasal kompozisyonu | 62 |
| Tablo 4.3 Deneme dökümleri için tasarlanan döküm parçasının boyutları ve döküm modülleri | 63 |
| Tablo 4.4 Benzeşim programının veri tabanında oluşturulan yüksek, orta ve exokal besleyici gömleklerin özellikleri | 69 |
| Tablo 4.5 Benzeşim programının veri tabanında oluşturulan yüksek, orta ve exokal besleyici gömleklerin özellikleri | 70 |
| Tablo 4.6 Benzeşim programında seçilen parametreler | 70 |
| Tablo 5.1 Yüksek ekzotermik gömleklerin kütle değişimi (%)..... | 73 |
| Tablo 5.2 Orta ekzotermik gömleklerin kütle değişimi (%)..... | 75 |
| Tablo 5.3 Orta ekzotermik besleyici gömlek kullanılan döküm metalinin mikroyapı görüntülerinin kantitatif analizleri..... | 81 |
| Tablo 5.4 Yüksek ekzotermik besleyici gömlek kullanılan döküm metalinin mikroyapı görüntülerinin kantitatif analizleri | 82 |
| Tablo 5.5 Parça ve besleyicinin farklı bölgelerinden alınan numunelerin kimyasal analiz sonuçları..... | 84 |
| Tablo 5.6 AISI 4130 alaşımlı besleyici metallerinin EDS sonuçları..... | 86 |
| Tablo 5.7 AISI 4130 alaşımı seçilerek yapılan deneme dökümlerinde ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri ve hesaplanan soğuma hızları..... | 90 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Tablo 5.8 | Östenitik mangan çeliği alaşımı seçilerek yapılan deneme dökümlerinde ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri ve soğuma hızları..... | 93 |
| Tablo 5.9 | Östenitik paslanmaz çelik alaşımı seçilerek yapılan deneme dökümlerinde ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri ve soğuma hızları... | 95 |
| Tablo 5.10 | Deneme dökümleri ve benzeşim çalışmalarının besleme mesafeleri | 117 |



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Döküm yöntemi insanların yüzyıllar boyunca hayatlarını kolaylaştıran metal parçaların üretimi için tercih ettiği bir yöntemdir. Günlük yaşantımızda etrafımızda gördüğümüz birçok metal malzeme döküm yöntemi ile üretilmiştir. Metal malzemelerin her biri kullanıldığı alandaki işlevine göre belirli mekanik özellikleri karşılamaktadır. Döküm parçalarının mikroyapı incelemeleri ile mekanik özellikleri hakkında fikir edinilebilir. Mikroyapı farklılıkları döküm parçasının alaşımına, döküm sıcaklığına, kalıp tasarımına, uygulanan ısıl işleme gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Bu parametrelerin en başında mikroyapı kontrolünün başlangıç aşaması olan kalıp tasarımı gelmektedir. Kalıp tasarımının iyi bir şekilde yapılması sonucunda katılaşma kontrolü sağlanabilir ve döküm parçasının mikroyapısı kontrol edilebilir.

Döküm çalışmalarında kullanılan besleyiciler sıvı metalin döküm parçasına göre daha geç katılaşmasını sağlayarak döküm parçasına sıvı metal akışı sağlamaktadır. Kalıp tasarımında besleyici gömleklerin kullanılmasıyla besleyici verimi artırılabilir. Döküm parçasında besleme kaynaklı oluşan hataların giderilebilmesi için işlevini yerine getirecek uygun özelliklerde besleyici gömleklerin seçilmesi önem arz etmektedir.

Döküm çalışmalarında döküm parçalarını tek bir seferde hata içermeyecek şekilde minimum maliyet ile üretebilmek için benzeşim programlarından yararlanılmaktadır. Günümüz teknolojisinde önemli olan noktalardan bir tanesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği'nin çalışma alanında kullanılan benzeşim programlarının gerçekte yapılan çalışmalar ile uyumlu olup olmadığıdır. Bundan dolayı bazı araştırmacılar benzeşim programlarına veri sağlamak amacıyla deneysel çalışmalar yapmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda birçok program için farklı araştırmacıların elde ettikleri sonuçlar toplanarak benzeşim çalışmalarının veri tabanları oluşturulmuştur. Ancak yapılan birçok araştırmaya rağmen benzeşim programlarında kullanılan bazı malzeme özelliklerinin doğruluğu tartışılmaktadır. Deneme

dökümlerine geçilmeden önce benzeşim programları kullanılarak farklı kalıp tasarımları yapılabilir ve farklı tasarımların sonuçları değerlendirilerek en uygun tasarıma karar verilebilir. Benzeşim programında kullanılan malzeme özelliklerinin doğrulanması amacıyla yapılacak olan deneysel çalışmalar benzeşim programlarını daha da ileriye götürerek üretimde hata oranını ve maliyeti azaltacağı tartışılmazdır. Döküm benzeşim programında kullanılan besleyici gömlek özelliklerinin gerçek uygulamalarda kullanılan besleyici gömlek özelliklerine uygun olması benzeşim çalışmalarının doğruluğunu arttırırken hata oranlarını da azaltacaktır.

Bu çalışmanın amacı döküm benzeşim programı ile besleyici gömleklerin işlevinin optimizasyonudur. Bu kapsamda karakterizasyon çalışmaları, deneme dökümleri ve döküm benzeşim çalışmaları yapılmıştır. Döküm öncesi ve döküm sonrası besleyici gömleklerden numuneler hazırlanarak besleyici gömleklerin işlevini yerine getirip getirmediği yapılan DT-TG ve X ışınları kırınım analizleri ile irdelenmiştir. Düşük alaşımlı karbon çeliği (AISI 4130), östenitik mangan çeliği (ASTM-A128M-93A, ASTM-A128M-93-C) ve östenitik paslanmaz çelik (CF-8M) ile 6 adet deneme dökümü yapılmıştır. Deneme dökümlerinde kullanılan ve benzeşim çalışmalarında seçilen besleyici gömlek özelliklerinin uyumunu incelemek amacıyla B-tipi, S-tipi ve K-tipi termal çiftler yardımıyla herbir besleyici gömleğin 3 farklı bölgesinden sıcaklık ölçümü alınmıştır. Farklı çelik alaşımları ile yapılan deneme dökümlerinde, besleyici gömleklerin sıvı metalle etkileşimini incelemek amacıyla katılma sonrası besleyici metalinin farklı bölgelerinden ve döküm parçasından alınan numunelerin mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Besleyici metalinin besleyici gömleğe temas eden bölgelerinden numuneler hazırlanarak EDS analizleri yapılmıştır. Döküm parçalarında çekintilerin oluşum bölgeleri ve buna bağlı olarak besleyici gömleklerin besleme mesafeleri gama radyografi testi yapılarak incelenmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmada deneme dökümleri ve benzeşim çalışmaları yapılmıştır. Benzeşim ve döküm çalışmalarındaki kalıp tasarımı aynı ölçülerdedir. Döküm benzeşim programının veri tabanında farklı özelliklerde besleyici gömlekler bulunmaktadır. Besleyici gömleklerin işlevine etki eden ısı iletim katsayısı,

yoğunluk, ısı kapasitesi, yanma sıcaklığı, yanma süresi, enerji kapasitesi olmak üzere 6 adet parametre bulunmaktadır. Benzeşim programının veri tabanında belirtilen besleyici gömlek özellikleri değiştirilerek farklı özelliklerde besleyici gömlekler oluşturulmuştur. Oluşturulan yeni gömlekler ile benzeşim çalışmaları yapılmış ve parametrelerin besleyici gömleğin işlevine etkisi araştırılmıştır. Döküm benzeşim çalışmalarında sıvı metal katılaşmaya kadar sensörler yardımıyla sıcaklık ölçümleri alınmış ve soğuma eğrisi çıkarılmıştır. Benzeşim ve döküm çalışmalarının soğuma eğriler karşılaştırılarak uyumluluğu incelenmiştir. Döküm benzeşim ve deneysel çalışmalarda döküm parçasında oluşan çekinti bölgeleri karşılaştırılmıştır.



BÖLÜM İKİ

TEORİK İNCELEME

Bu bölümde katılaşma, besleme mekanizmaları, besleyici işlevi ve tasarım prensipleri hakkında açıklamalar verilmiştir. Besleyici veriminin artırılması için kullanılan besleyici gömlek türleri ve besleyici gömlek karışımında bulunan bileşenler belirtilmiştir. Döküm benzeşim programı ve optimizasyon üzerine konu ile ilgili teorik bilgiler aktarılmıştır.

2.1 Katılaşma

2.1.1 Katılaşma Büzülmesi

Metalik parçanın özellikleri mikroyapıya bağlı olarak değişmektedir. Mikroyapı kontrolü metal katılaşması sırasında oluşur. Döküm yöntemi ile üretilen malzemelerin özelliklerinin doğru belirlenebilmesi için katılaşma olayının iyi bilinmesi gerekmektedir (Aran, 2007).

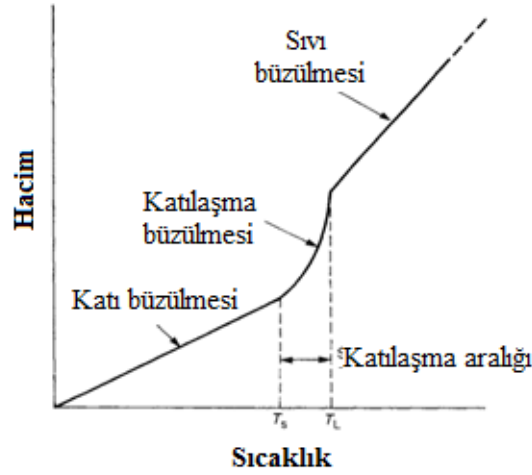
Katılaşma, çok küçük tanelerin çekirdeklenmesi ile başlayarak ısı koşulların etkisi altında büyümesi ile tamamlanır. Dökülen parçasının sağlamlığı alaşımın kimyasal kompozisyonuna, fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişmektedir (Beeley, 2001).

Dökümde katılaşma sürecine etki eden birçok parametre bulunmaktadır. Döküm parçasının mikroyapısı ve sağlamlığı, dökülecek olan metalin katılaşma davranışına bağlı olmasının yanı sıra alaşımın bileşimi ve fiziksel özellikleri gibi birçok faktörden etkilenir. Ek olarak döküm parçasının katılaşması sırasında katı tanelerin büyümesi, ısı yayılımı ve boyutsal değişimlere dikkat edilmesi gerekmektedir (Tablo 2.1). Metalin kompozisyonuna ve fiziksel özelliklerine bağlı olan parametreler belirtilmiştir. Bunlar kalıp malzemesi ve kalınlığı, kalıbın şekli, metal parçasının (döküm) kalınlığı, metalin fiziksel özellikleri; ısı iletkenliği, ergime ısısı, ısı genleşme ve katılaşma sıcaklık aralığı, kalıptan atmosfere ısı taşınımıdır.

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

| Metal | Ergime Noktası (°C) | Sıvı yoğunluk (kg/m ³) | Katı Yoğunluk (kg/m ³) | Hacim Değişimi (%) |
|-------|---------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------|
| Al | 660 | 2368 | 2550 | 7,14 |
| Cu | 1083 | 7938 | 8382 | 5,3 |
| Ni | 1453 | 7790 | 8210 | 5,11 |
| Fe | 1536 | 7035 | 7265 | 3,16 |
| Mg | 651 | 1590 | 1655 | 4,1 |
| Zn | 420 | 6577 | | 4,08 |
| Bi | 271 | 10034 | 9701 | -3,32 |
| Si | 1410 | 2525 | | -2,9 |

Döküm sıcaklığından itibaren soğuma sırasında sıvı, sıvı-katı ve katı aşamalarında büzülme meydana gelir (Şekil 2.1). Hacim azalması kademeli olarak üç aşamada gerçekleşmektedir. Bu aşamalar sıvı büzülmesi, sıvı-katı büzülmesi, katı büzülmesi olarak ifade edilmektedir.



Şekil 2.1 Sıvı büzülmesi, sıvı-katı büzülmesi, katı büzülmesi şematik gösterimi (Campbell, 2003)

Sıvı büzülmesi; sıvı metalin döküm sıcaklığından itibaren katılaşana kadar göstermiş olduğu büzülmedir. Sıvı metal kaybını karşılamak amacıyla ek olarak sıvı metal yolluğa ilave edilir.

Sıvı-katı büzülmesi; sıvı katı geçişi sırasında donma noktasında meydana gelen büzülmedir. Besleyici tasarımının yanlış yapılmasından kaynaklanan besleme yetersizliği sonucunda büzülme hataları oluşmaktadır.

Katı büzülmesi; katılaşma tamamlandıktan sonra katı metalde meydana gelen büzülme olarak ifade edilmektedir. Katı büzülmesinin karşılanması için gerçekleştirilen kalıp tasarımlarında model payı hesaba katılarak olası hatalar giderilmeye çalışılmalıdır (Campbell, 2003).

Saf metallerin katılaşmasında kalıp yüzeyinden merkeze doğru katılaşma devam ederken sıvı-katı arayüzeyi düzlemseldir. Alaşımlı parçaların katılaşması saf metallere göre farklıdır. Alaşım ve termal Őartlara bağlı olarak sıvı ve katı arasında yarı katı bir bölge bulunabilir. Bu bölgenin genişliği döküm parçasının beslenmesi ile doğrudan ilişkilidir (Tablo 2.2).

Tablo 2.2 Metal ve alaşımların katılaşma aralığı (Beeley, 2001)

| 1. Grup | 2. Grup | 3. Grup |
|---|---|---|
| Kısa katılaşma aralığı | Uzun katılaşma aralığı | Genleşme |
| Düşük karbonlu elikler Pirinçler Alüminyum bronzları Alüminyum Bakır | Orta ve yüksek karbonlu elikler Nikel esaslı alaşımlar Fosfor bronzları Magnezyum alaşımları | Gri dökme demir Küresel grafitli dökme demir |

Birinci gruptaki metal ve alaşımlarda yönlü katılaşma daha kolay sağlanarak en son katılaşan bölgenin besleyici içinde olması sağlanabilir. Besleyici hesaplamaları genel olarak bu tip alaşımlar için geçerlidir.

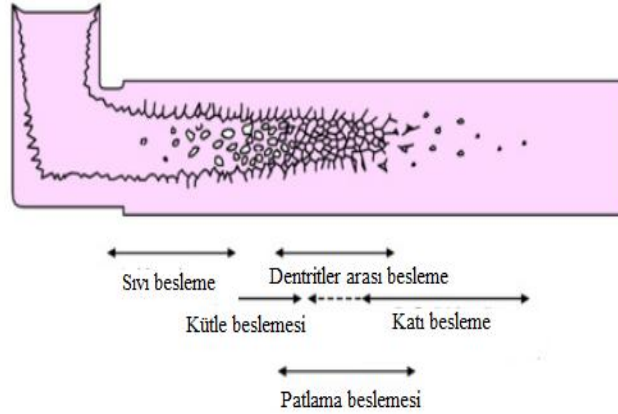
İkinci gruptaki alaşımlar geniş katılaşma aralığına sahiptirler. Bu tip alaşımlarda katılaşma sırasında dentrit kolları arasında sıvı bölgelerin olmasından dolayı besleyici metalinin sağladığı sıvı metalin bu blgere ulaşması zorlaşacaktır. Bundan dolayı döküm parçası içinde bulunan bu sıvı bölgelerden kaynaklanan çekintinin besleyiciler ile karşılanması zorlaşacaktır (Beeley, 2001).

2.1.2 Büzülme Oluşumu

Döküm sonrasında soğuma sırasında sıcak bölgeler oluşabilir. Döküm sonrası parçalarda oluşan sıcak bölgeler en son katılır. Katılma tamamlandıktan sonra yeterli sıvı metalin bu bölgelere ulaşmaması nedeniyle büzülme boşlukları oluşabilmektedir (Kayıkçı ve Akar, 2007). Uygun besleme yolu tasarımının gerçekleştirilmesi ile büzülme oluşabilecek bölgelere sıvı metalin ulaşması sağlanarak büzülme oluşumunun engellenmesi mümkün olabilir. Döküm benzeşim programları ile besleyici tasarımları yapılarak büzülme oluşumlarının önüne geçebilir (Saturia ve diğer., 2012).

2.2 Besleme Mekanizmaları

Metalin katılması sırasında döküm parçası içerisinde oluşacak olan negatif basınç farkları ve hidrostatik çekmeler beslemeyi güçleştiren etkenlerdir. Döküm hatalarının oluşumunu engellemek amacıyla beş farklı besleme mekanizması bulunmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Besleme mekanizmaları (Campbell, 2003)

2.2.1 Sıvı Beslemesi

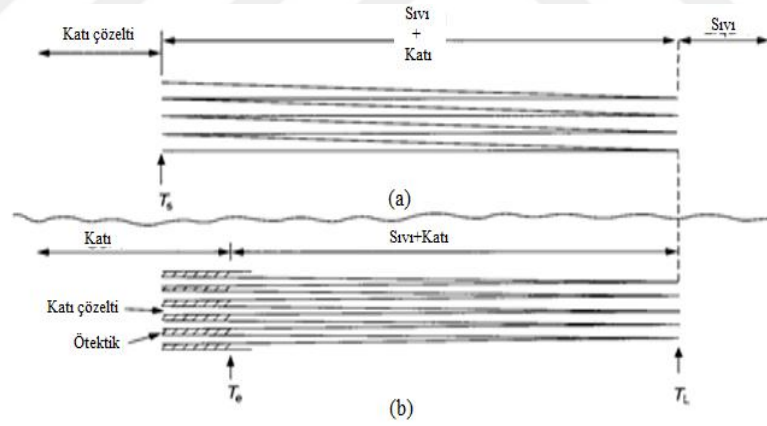
Beslenmesi gereken bölgede oluşan basınç farkı besleyici içerisindeki sıvı metal ile giderilebilir. Besleyici tasarımı ve özellikleri yeterli basıncı oluşturmak için önemlidir.

2.2.2 Kütle Beslemesi

Katılaşılan metal ile sıvı haldeki metalin hareketine dayanmaktadır. Kütle beslemesi, sıvı metal içerisinde eş eksenli tanelerin bulunması ile söz konusu olur. Katılama başlangıcından belli bir süre sonra katılaşılan tanelerin birbirine tutunması sonucunda besleme engelleri oluşabilmektedir.

2.2.3 Dentritler Arası Besleme

Sıvı-katı metal karışımından oluşan hamurumsu bölgede sıvının hareketine dayanan besleme mekanizmasıdır. Katılamanın başlangıcından itibaren ilerleyen sürelerde dentritler oluşmaktadır. Dentritler arasında hamurumsu sıvı hareket etmeye çalışacaktır. Dentritler arası hamurumsu sıvı metal hareketinin katılamanın sonuna doğru giderek zorlaşması nedeniyle dentritler veya taneler arasında gözeneklerin oluşması kaçınılmazdır (Şekil 2.3).



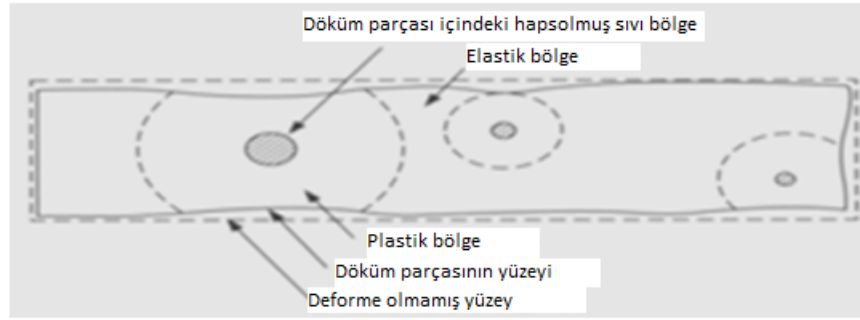
Şekil 2.3 Katılamanın son aşamasında (a) Dentritler arası besleme giderek güçleşirken (b) Az miktarda ötektik bileşimin bulunması beslemeyi kolaylaştırmaktadır. (Campbell, 2003)

2.2.4 Patlama Beslemesi

Katılaşılan kolların birleşmesi sonucunda sıvı metal akışı zorlaşacaktır. Katılama sırasında oluşan gerilmeler engellerin (katılaşılan kolların) dayanımını aşacak seviyeye gelmesi durumunda engeller yıkılarak sıvı metalin ulaşmadığı bölgeler beslenecektir.

2.2.5 Katı Beslemesi

Metalin katılaşması sırasında katılaşmanın sonlarına doğru bazı kısımların hızlı katılaşması izole bölgelerin oluşmasına neden olur. Oluşan izole bölgelerdeki sıvıda yüksek hidrostatik basınçlar meydana gelir. Hidrostatik basınçtan kaynaklanan bu gerilmeler sıvıyı çevreleyen kabuğun içe doğru plastik deformasyona uğramasına neden olurken gözenek oluşumunu kısmen de olsa önler (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Katı besleme ve döküm içerisinde oluşan sıcak bölge çevresindeki plastik bölgeler (Campbell, 2003)

Dökümlerde katılaşma ve besleme mekanizmaları birlikte dikkate alındığında özellikle katılaşma sırasında ortaya çıkan büzülme sonucu taneler ve dentritler arasında oluşabilecek hataların giderilmesi için besleyici kullanımı gerekmektedir. Kullanılan besleyicinin işlevini yerine getirebilmesi için besleyici tasarım prensiplerine uygun olacak şekilde tasarlanmalıdır.

2.3 Besleyici Tasarımı

Besleyicilerin işlevini yerine getirebilmesi için besleyici tasarımında aşağıdaki kriterler dikkate alınmalıdır;

1. Döküm ile besleyici arasındaki bağlantı (boyun) sıcak nokta oluşturmamalıdır ve besleyici dökümle aynı zamanda veya daha sonra katılaşmalıdır.
2. Besleyici, döküm parçasının hacimsel büzülme gereksinimlerini karşılamaya yetecek kadar sıvı metal sağlamalıdır.

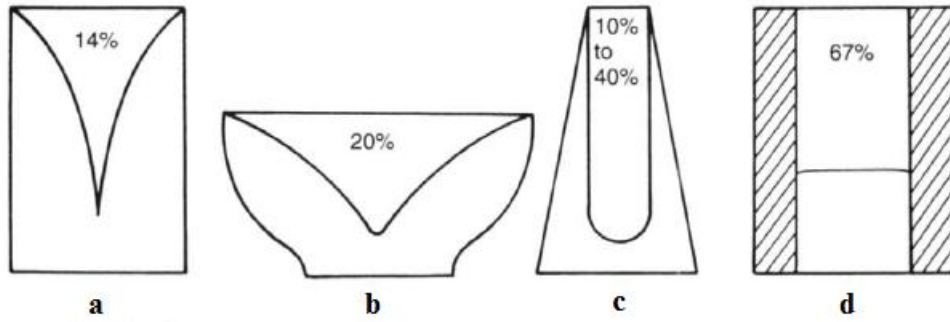
3. Besleme yolu kriterleri sağlanmalıdır. Bunlar;
 - a) Katılma besleyiciye doğru yönelmiş olmalıdır,
 - b) Minimum sıcaklık gradyanı şartı sağlanmalıdır,
 - c) Besleme mesafesi yeterli olmalıdır,
 - d) Çil kullanımı ile besleme mesafesi düzenlenmelidir.
4. Sıvı metalin akışı doğru yönde olmalıdır ve besleme metalinin akışını sağlayacak kadar basınç farkı olmalıdır.
5. Dökümün katılması sırasında besleyicinin işlevini yerine getirebilmesi için aşağıdaki değişkenler göz önünde bulundurulmalıdır.
 - a) Besleyicinin şekli, boyutu, konumu
 - b) Soğutma elemanı kullanımı
 - c) Yalıtkan ve ekzotermik bileşiklerin kullanımı
 - d) Bağlantı kesitlerinin durumu (Campbell, 2003).

Belirtilen bu 5 madde kapsamında besleyici tasarımları modül kriteri, hacim kriteri ve besleme mesafesi kriteri olmak üzere 3 temel başlık altında toplanabilir.

2.3.1 Modül Kriteri

Besleyicinin işlevinin yerine getirebilmesi için besleyicinin döküm parçasından daha geç katılarak döküm parçasına sıvı metal aktarımı sağlaması gerekmektedir. Katılma süresini etkileyen en önemli faktör ısı kaybı olduğundan besleyicide ısı kaybının minimize edilmesi gerekmektedir. Isı kaybının minimize edilmesi sonucunda besleyici katılma süresi artarak döküm parçası için sıvı metal akışı kesilmemiş olur ve olası döküm boşluklarının oluşumu engellenerek parçanın sağlam olarak üretilmesi sağlanır. Besleyici için ısı kaybının minimum olması besleyici boyutlarına bağlı olarak yüzey alanı ve hacmine göre değişmektedir (Ou ve diğer., 2002).

Sabit hacim durumu söz konusu olduğunda düşük yüzey alanına sahip besleyicilerde katılma süresi artacaktır. Bu teoriye dayanarak besleyici geometrileri incelendiğinde en uygun besleyici şeklinin yüzey alanı en küçük olan ve dolayısıyla ısı kaybının en düşük olduğu küre şekilli geometrilerdir. Ancak küre şekilli besleyiciler her ne kadar teorik olarak katılma için ideal boyutlara sahip olsalar bile pratik uygulamalarda kalıplamada yaşanan sorunlar nedeniyle kullanılmamaktadır. Küre şekilli besleyicinin pratik çalışmalarda kullanılmamasından dolayı silindirik şekilli besleyicilere yönelme olmuştur. Silindirik besleyicilerin ısı kaybının düşük olması (V_b/A_b oranı yüksek) ve kolay kalıplanabilir olmasından dolayı uygulamalarda tercih edilmektedir (Ou ve diğer., 2002). Şekil 2.5'te besleyici şekilleri gösterilmektedir.



Şekil 2.5 Besleyici şekilleri ve verimlilikleri, a) Silindirik, b) Yarım küre, c) Kesik konik, d) Ekzotermik (Campbell, 2003)

Besleyicilerin şekillerine göre katılma süreleri farklı olacaktır. Flemings bu katılma süresinin hesaplanması için kalıp ve metal özelliklerine bağlı olan Eşitlik 2.1'de gösterilen bir bağıntı ortaya koymuştur (Campbell, 2003).

$$\frac{V}{A} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{(T_m - T_0)}{(\rho_s H)} \sqrt{(K_m \rho_m C_m)} \sqrt{t} \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1 doğrultusunda Chvorinov Eşitlik 2.2'de gösterilen besleyici tasarımında halen kullanılan en temel bağıntıyı ortaya koymuştur (Candeğer, 2001).

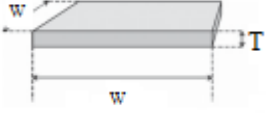
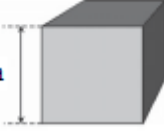
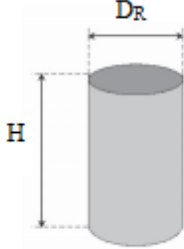
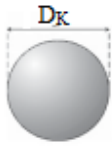
$$t = C (V/A)^2 \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2’de belirtilen V/A oranı döküm modülü olarak adlandırılır. Basit şekilli parçaların modül hesaplamaları Tablo 2.3’te gösterilmektedir. Besleyicinin işlevini yerine getirmesi için dökümle aynı zamanda veya daha sonra katılmalıdır. Bu göz önünde bulundurulduğunda Eşitlik 2.3 sağlanmalıdır. Eşitlik 2.3’te modül değerleri yazıldığında Eşitlik 2.4 elde edilir.

$$M_b = 1,2 * M_d \quad (2.3)$$

$$(V_b / A_b) = 1,2 * (V_d / A_d) \quad (2.4)$$

Tablo 2.3 Basit şekilli parçaların döküm modülü (Campbell, 2003)

| | Şekil | V (cm ³) | A (cm ²) | M (cm) |
|-------------------------------|---|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| Levha (W>>T) |  | TW ² | 2W ² +4WT | T/2 |
| Küp |  | a ³ | 6a ² | a/6 |
| Silindir (H= D _R) |  | 3π(D _R) ³ /8 | 2π(D _R) ² | D _R /6 |
| Küre |  | π(D _R) ³ /6 | π (D _R) ² | D _R /6 |

Eşitlik 2.3’te belirtilen 1,2 güvenlik katsayısı birçok çelik alaşımı için geçerli olup, grafit genleşmesinden dolayı lamel ve küresel grafitli dökme demir dökümlerde bu değer sırası ile 0,6 ve 0,8 olarak alınır (Candeğer, 2001).

2.3.2 Hacim Kriteri

Döküm parçasının şekli ne olursa olsun çekinti hatasının parça içinde olmaması için besleyicilerin yeterli miktarda sıvı metal hacmine sahip olması gerekmektedir (Kayıkçı, 2007). 1940'lerde NRL metodu kullanılarak besleyici ve döküm arasında uygun hacim oranları grafiklerinden besleyici boyut tayini yapılmaktadır (Candeğer, 2001). Bu yöntemde besleyici şekli değişken alınır ve döküm parçasının şekline bağlı olarak besleyici hacmi bulunur. Yandan ve üstten besleme şartlarına göre besleyici yüksekliği ve çapı belirlenir.

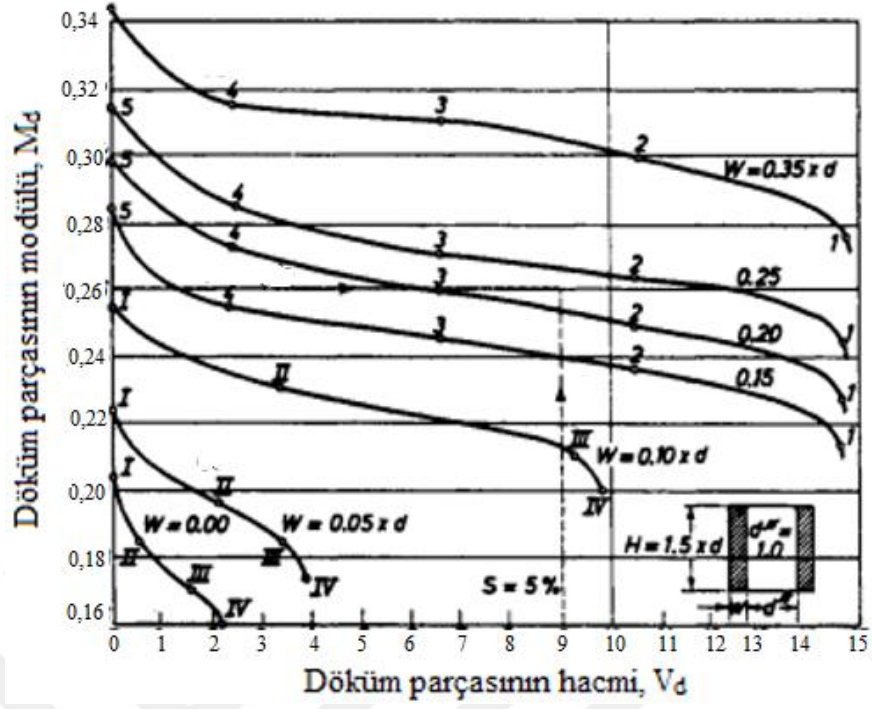
1950'lerde Wlodawer, Chvorinov yaklaşımını geliştiren bir metod ortaya koymuştur. Bu metod kullanılarak modül ve hacim kriterleri her ikisi kontrol edilmektedir. Eşitlik 2.5 boşluksuz bir döküm için bir besleyicinin sahip olması gereken asgari metal miktarını belirlemek için kullanılır.

$$V_b = \frac{V_d \cdot \alpha}{\Phi - \alpha} \quad (2.5)$$

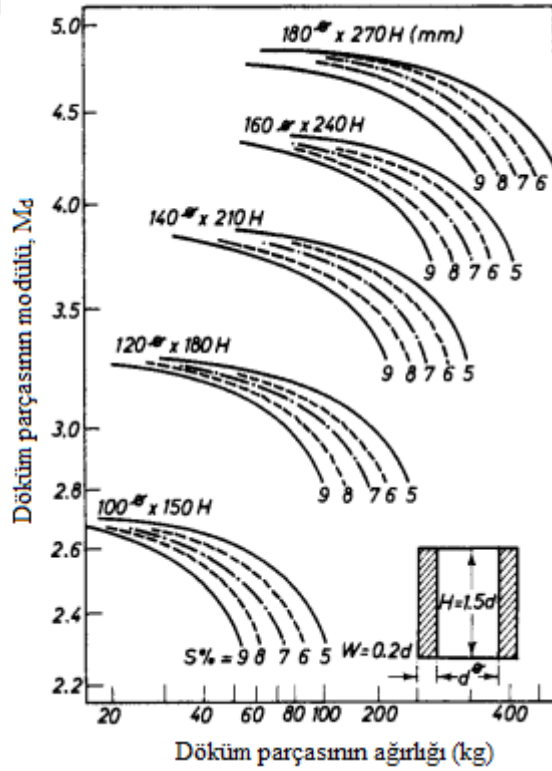
Wlodawer metoduna göre herhangi bir döküm parçasının modülü ve hacmi bilindiğinde uygun besleyici gömlek boyutları belirlenebilir (Şekil 2.6). Besleyici gömlek boyutlarının belirlenmesi için kullanılan grafikte hacim ve modül değerlerinin grafik üzerinde keşişim noktası belirlenir. Bu keşişim noktasının grafik üzerinde gösterilen eğriler ile keşişme noktası belirlenerek Eşitlik 2.6'da 0,35 değerinin yerine konular ve besleyici gömleğin kalınlığı belirlenir (Wlodawer, R., çev., 1966).

$$W_b = 0,35 * D_R \quad (2.6)$$

Şekil 2.7'de besleyici gömlek boyutlarının belirlenmesi için yararlanılan grafik verilmektedir. H/D_R oranı 1,5 olacak şekilde döküm parçasının ağırlığına ve modül değerine bağlı olarak besleyici gömleğin H ve D_R değerleri Şekil 2.7 yardımıyla belirlenir.



Şekil 2.6 Modülü ve hacmi bilinen döküm parçası için besleyici gömlek kalınlığının belirlenmesi (Wlodawer, R., çev., 1966)



Şekil 2.7 Modülü ve hacmi bilinen döküm parçası için besleyici gömlek boyutlarının belirlenmesi (Wlodawer, R., çev., 1966)

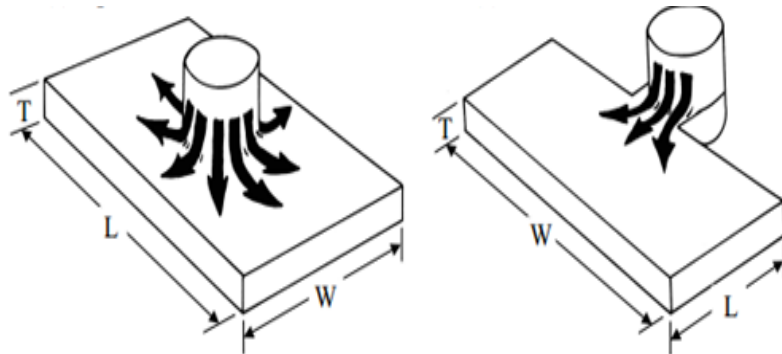
Döküm tasarımında sadece modül ve hacim kriterlerini sağlayan besleyicilerin kullanılması besleyici işlevinin yerine getirilebilmesi için yeterli değildir. Modül ve hacim kriterlerine ek olarak tasarımda kullanılması düşünülen besleyicinin konumu ve besleme mesafesi önem arz etmektedir.

2.3.3 Besleme Mesafesi ve Besleyici Konumu

Sıvı metalin soğuması sırasında hacimde küçülmeler meydana gelerek yapıda çekintiler oluşmaktadır. Bu çekintilerin döküm parçası içerisinde boşluk oluşturmasını önlemek için sıvı metal beslemesi sağlayacak bir besleyici kullanılmalıdır. Kullanılacak olan besleyici sıcaklık gradyanı sağlayarak yönlü katılaşmayı sağlaması gerekmektedir. Yönlü katılaşma durumu olmadığı zaman besleyici ile sıvı metal arasındaki bağlantı kesilir ve bunun sonucunda yapıda boşluklar meydana gelir. Besleyicinin yeterli olup olmadığı 2 kritere göre değerlendirilmektedir. Bunlar;

- Besleyicinin katılaşma süresi
- Besleyicinin besleme mesafesi

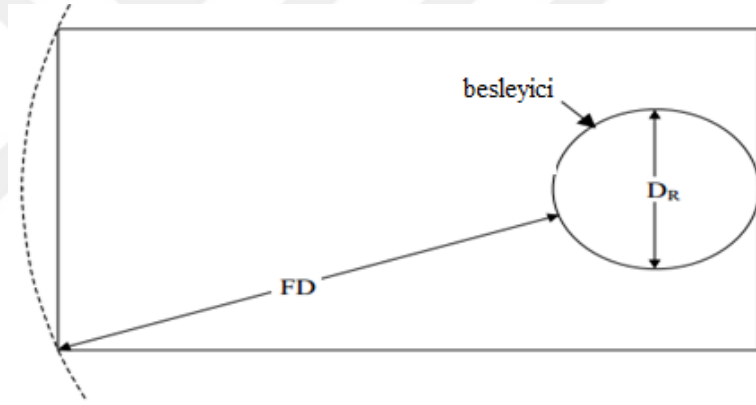
Besleyicilerin kalıp tasarımındaki konumu besleyici verimini etkilemektedir. Kalıp tasarımında besleyicinin döküm parçasının üstüne veya yan tarafına yerleştirilmesi besleyici içindeki sıvı metalin döküm parçasına aktarım oranını etkiler. Bunun sonucunda besleyici verimi değişir. Şekil 2.8’de üst ve yandan besleme şekilleri gösterilmektedir (Hardin ve diğer., 2001).



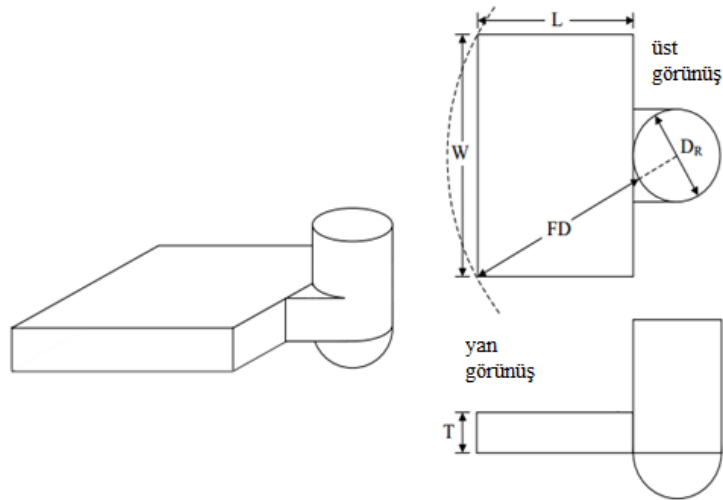
Şekil 2.8 Üstten ve yandan beslenen döküm parçaları (Hardin ve diğer., 2001)

Besleme mesafesi besleyicinin döküm parçası üzerinde boşluksuz olarak besleme yapabileceği en büyük uzaklık olup, besleyicinin dış çapından döküm parçasının en uç kesitine kadar olan mesafe olarak gösterilir (Şekil 2.9 ve Şekil 2.10). Besleme mesafesi gerekli olan besleyici sayısını belirlemektedir. Birden fazla besleyici kullanımının söz konusu olduğu durumlardaki besleme mesafesi Şekil 2.11’de gösterilmiştir (Ou ve diğer., 2002).

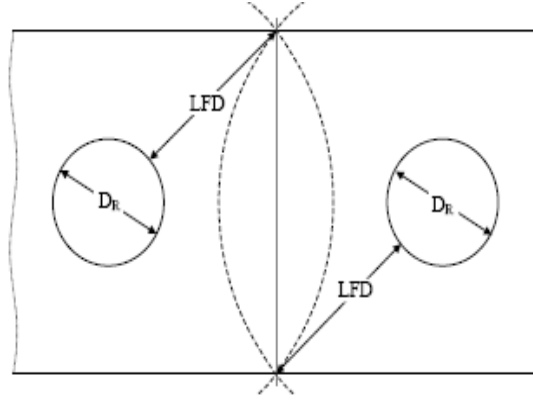
Şekil 2.9 ve Şekil 2.10’da kesikli çizgiler içinde kalan bölge besleyiciler tarafından beslenecektir. Şekil 2.11’de olduğu gibi birden fazla besleyici kullanımının söz konusu olduğu durumlarda besleyicilerin besleme mesafeleri birbiri ile kesişmelidir ve dökümün tüm kesitleri kesikli bölgeler içinde kalmalıdır (Ou ve diğer., 2002).



Şekil 2.9 Üst besleyici besleme mesafesi (Ou ve diğer., 2002)



Şekil 2.10 Yan besleyici besleme mesafesi (Ou ve diğer., 2002)

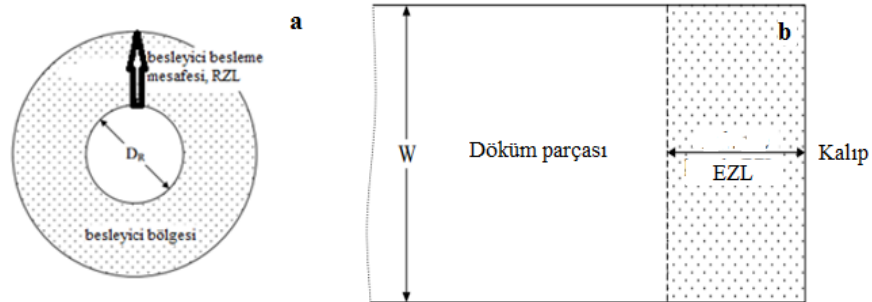


Şekil 2.11 İki besleyici kullanılması durumunda yan besleme mesafesi (Ou ve diğer., 2002)

Besleme mesafelerinin değerlendirilmesi için bilinmesi gereken iki önemli kavram söz konusudur. Bunlar;

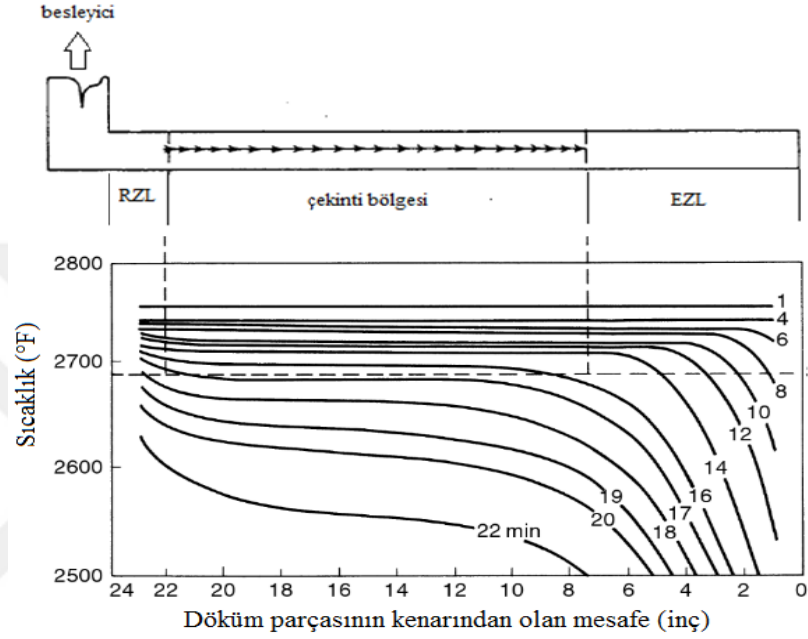
- Besleyici besleme bölgesi
- Uç besleme bölgesi

Besleyicinin döküm parçasına göre daha geç katılmasından dolayı dik bir sıcaklık gradyanı oluşumu söz konusudur. Bu sıcaklık gradyanı sonucunda çekinti hatasının önlendiği mesafeye besleyici besleme mesafesi (RZL) denilmektedir (Şekil 2.12a). Döküm parçası ile kalıp arasında kalan bölgede kalıbın soğuma etkisinden dolayı bir sıcaklık gradyanı oluşacaktır. Bunun sonucunda uç besleme bölgesi (EZL) olarak adlandırılan bir bölge oluşacaktır (Şekil 2.12b). W/T oranının 7'den küçük olduğu durumlarda EZL değeri W 'ye bağlı olarak değişmektedir. Uç soğutucuların kullanılması sonucunda EZL mesafesi artacaktır. Ancak uç soğutucuların kullanılması RZL değerini etkilemeyecektir.



Şekil 2.12 a) Besleyici besleme bölgesi, b) Uç besleme bölgesi (Ou ve diğer., 2002)

Şekil 2.13'te döküm parçasının kenarından olan mesafeye göre sıcaklık dağılımı gösterilmektedir. Şekil 2.13'te RZL ve EZL bölgeleri dik bir sıcaklık gradyanı söz konusu iken çekinti bölgesinde yataya yakındır. EZL bölgesinden besleyiciye doğru bir yönlü katılma söz konusudur. Çekinti bölgesinde ise sıcaklık gradyanının yataya yakın olmasından dolayı besleme yetersizdir.



Şekil 2.13 Karakteristik sıcaklık dağılımı (Beeley, 2001)

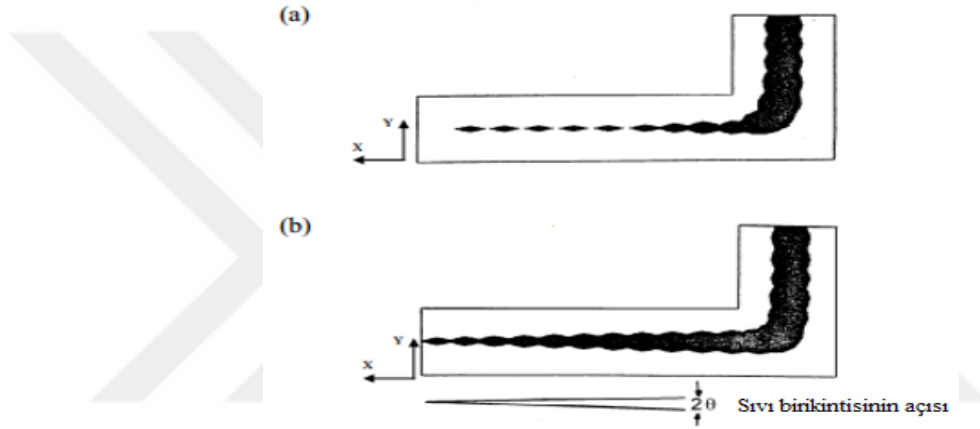
Besleme mesafesi, sıcaklık gradyanı ve soğuma hızına bağlı olarak belirlenen Niyama kriteri ile incelenmektedir. Niyama çelik döküm işlemlerinde çekinti hatalarını tahmin etmek için Eşitlik 2.7 ile gösterilen basit bir bağıntı sunmuştur. Genel olarak Niyama'ya göre Eşitlik 2.7'deki kritik Niyama (N_{cr}) değeri $0,775 \text{ K}^{1/2}\text{s}^{1/2}\text{mm}^{-1}$ 'den daha düşük olması durumunda çelik parçada çekinti hataları oluşacaktır.

$$N_{cr} = G / \sqrt{\dot{T}} \quad (2.7)$$

N_{cr} değerinin hesaplanmasında kullanılan sıcaklık gradyanının dik olması döküm parçasında çekinti oluşumunu etkilemektedir. Şekil 2.14b'de sıcaklık gradyanının Şekil 2.14a'ya göre dik olması sonucunda açık ve kolay ulaşılabilen besleme kanallarının oluşmasıyla sıvı birikintilerin parça içinde kalması önlenmektedir ve

sonuç olarak çekinti oluşumu söz konusu değildir. Eğer sıvı bölgelerin oluşturduğu bu açı kritik değerden düşük olması durumunda merkez çekintiler oluşacaktır (Şekil 2.14a). Bu kritik açı çelik plakalar için 2 ile 5 derece arasında değişmektedir (Carlson ve diğer., 2002).

Sıcaklık gradyanı ve soğuma hızı; parça geometrisi, döküm şartları, kalıp malzemesi, çelik cinsine bağlı olarak değişmektedir. Bundan dolayı metal ve kalıp malzemesinin termofiziksel özelliklerine (ısı iletim katsayısı, yoğunluk, özgül ısı) bağlı olarak N_{cr} değeri değişecektir.



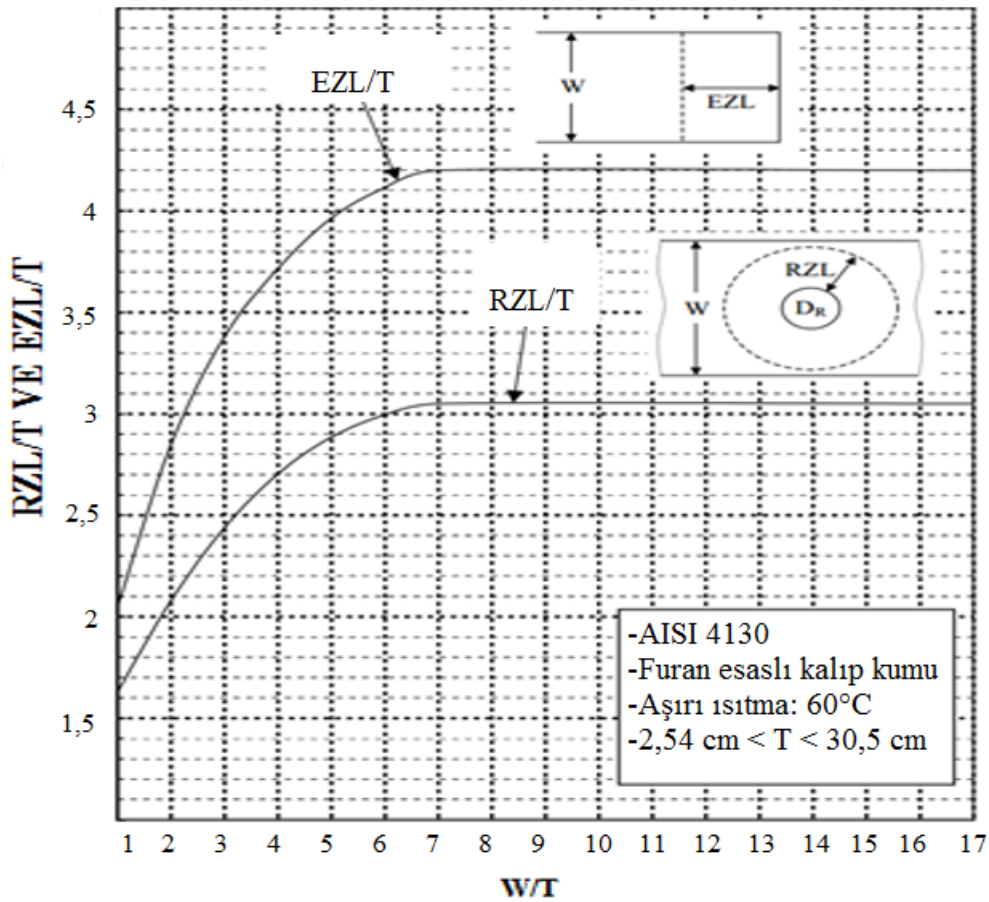
Şekil 2.14 a) Besleme yolu kapalı çekinti oluşumu söz konusu b) Besleme yolu açık çekinti oluşmaz (Carlson ve diğer., 2002)

2.3.3.1 Besleyici ve Uç Bölgeler Açısından Döküm Parçasının Sağlamlığı

Döküm parçalarında besleyici bölgesi ve uç bölgenin kesişmesi sonucunda çekinti hatası oluşumu görülmemektedir. Bundan dolayı döküm parçasının çekinti hataları bu bölgeler dikkate alınarak değerlendirilir. Şekil 2.15’de W/T oranına bağlı olarak RZL/T ve EZL/T oranları verilmektedir.

Şekil 2.15 incelendiğinde W/T oranının 7’nin üstündeki değerlerde RZL/T ve EZL/T değerleri sabit kalmaktadır. W/T oranı 1’den başlayarak artması sonucunda RZL/T ve EZL/T oranlarında artış görülmektedir. EZL/T eğrisi incelendiğinde W/T’nin 7’den büyük olduğu durumlarda EZL/T değeri 4,2 olmaktadır. W/T değerinin 7’nin altında olması durumunda EZL/T değerinde düşüşler görülmektedir.

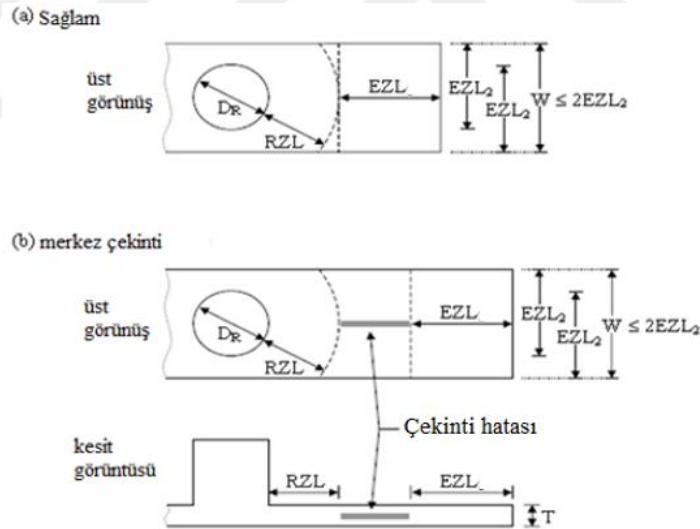
Bu durum üç uç bölgesinin (alt yüzey, yan yüzey, üst yüzey) etkili olmasından kaynaklanmaktadır. Levha şeklindeki parçaya üstten bakıldığında besleyiciye en uzak olan bölgeden uç etkisi başlamaktadır. Ancak diğer kenarlarda da uç etkisi sonucu oluşan bölgeler mevcuttur. Katılaşmaların yanlardan merkeze doğru yönelmesi durumunda besleyiciye en uzak bölgeden başlayan katılaşma cephesi, bütün uç bölge uzunluğunu tamamlayamadan merkez eksenini ile karşılaşır. Yan kenarlardan gelen katılaşma cepheleri birbirleri ile karşılaştıklarında metal akışı durmuş olur ve bunun sonucunda EZL bölgesinin uzunluğunda azalmalar meydana gelir. Aynı şekilde RZL/T değeride açıklanabilir. Grafikte W/T' nin 7'den büyük olduğu durumlarda RZL/T değeri 3,05'te sabitlenmiştir (Şekil 2.15). RZL ve EZL uzunluklarından yararlanılarak besleyici tarafından beslenen kesitin boşluksuz olup olmadığı, çekinti oluşması durumunda oluşan çekintinin hangi bölgede oluşabileceği belirlenebilmektedir (Ou ve diğer., 2002).



Şekil 2.15 Besleyici ve uç besleme bölgelerinin kesit kalınlığı ve genişliğe bağlı değişimi (Ou ve diğer., 2002)

2.3.3.2 Üstten Besleyicili Döküm Kesitleri

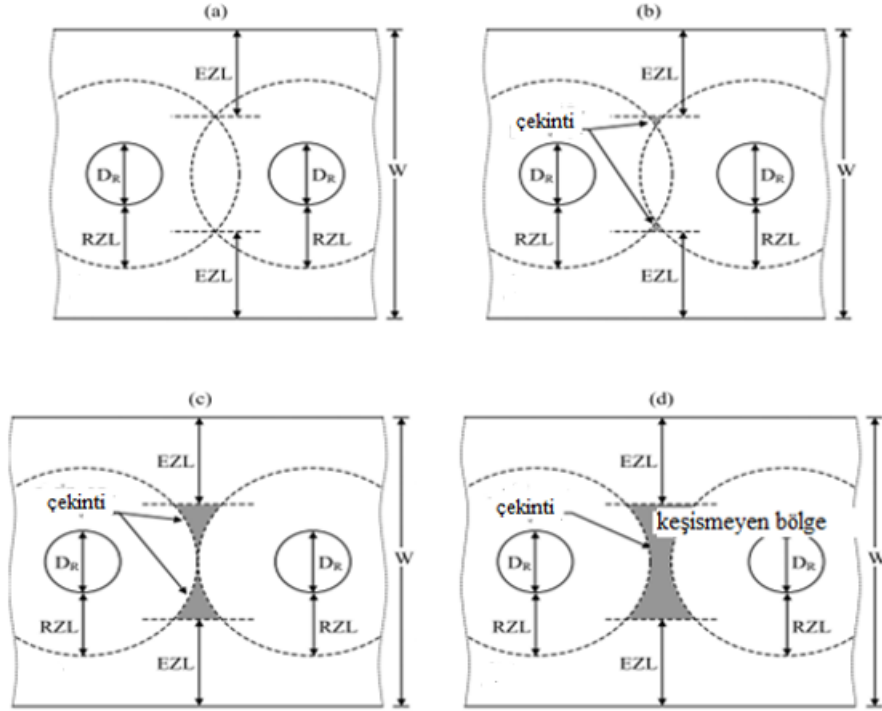
Şekil 2.16'da kesit kalınlığının (W) uç bölge uzunluğuna eşit veya daha küçük olduğu durumu göstermektedir. Kalıp ile metal ara yüzey uyumlulukları değiştiği için EZL ve EZL_2 farklı değerlerde olabilir. Bunun sonucunda; EZL W kalınlığının bir fonksiyonu olup, EZL_2 yan kenarların fonksiyonudur. $W < 2EZL_2$ olan durumlarda üstten beslenen ve uç etkisi gösteren plaka şekilli döküm kesitleri için RZL VE EZL bölgeleri Şekil 2.16'da gösterilmektedir. Şekil 2.16a'da boşluksuz bir döküm kesiti gösterilmektedir. Besleyici ve uç besleme bölgesi içinde kalmayan çok küçük bir bölge vardır. Bu bölge yan taraflardan kaynaklanan uç besleme bölgesi içinde kalacaktır. Sonuç olarak kesitin tamamı besleyici besleme bölgesi ya da uç besleme bölgesi içinde kalmış olacaktır. Şekil 2.16b'de besleyici ile uç besleme bölgelerinin kesişmemesi durumunda arada belli bir mesafe olacaktır ve bu bölgede çekinti oluşacağı görülmektedir (Ou ve diğer., 2002).



Şekil 2.16 a) Besleyici bölgesi ve uç bölgesi kesişmekte, b) İki bölgenin kesişmeme durumu (Ou ve diğer., 2002)

Şekil 2.17'de $W > 2EZL_2$ olan plaka şekilli dökümlerde RZL ve EZL bölgeleri gösterilmektedir. Şekil 2.17a'da döküm parçası besleyici ve uç bölgelerin sınırları içinde kalmaktadır ve döküm parçası hata içermemektedir. Şekil 2.17b'de ise plaka uzunluğunun artmasıyla döküm parçası besleyici ile uç bölge arasında boşluğun kalmasından dolayı belirli bir uzaklıktan sonra çekinti oluşumu görülmüştür. W 'nin

EZL₂'den büyük olması sonucunda çekinti oluşumu görülmemiştir. Kesit genişliğinin artması sonucunda çekinti bölgeleri büyüyecektir (Şekil 2.17c, Şekil 2.17d). Şekil 2.16a ve Şekil 2.17c kıyaslandığında EZL uzunlukları aynı olmasına rağmen kesit genişliği büyük olan Şekil 2.17c'de çekinti hatası artmaktadır (Ou ve diğer., 2002).



Şekil 2.17 a) Uç bölgeler besleyici içinde kalırsa plaka sağlam, b) Plaka uzunluğu arttıkça görülen çekinti hataları (Ou ve diğer., 2002)

Döküm parçasının boşluk içermeyecek şekilde üretilebilmesi için aşağıda belirtilen şartların sağlanması gerekmektedir. Bunlar;

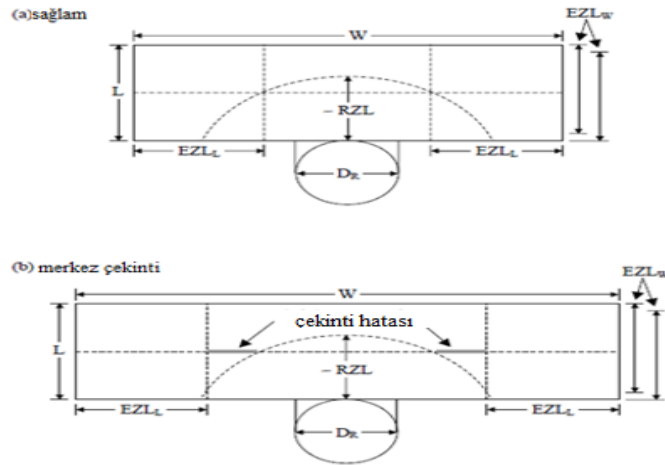
- Döküm parçası besleyici bölgesi veya bir uç bölgesi içinde kalmalıdır.
- İki'den fazla uç bölgelerin sağladığı besleme bölgesi kesişirse bu bölge besleyici bölgesi ile kesişmelidir.
- İki'den fazla besleyicinin besleme bölgeleri kesişirse ve bu kesişim bölgesi uç bölgenin sağladığı besleme bölgesi ile kesişiyorsa besleyicilerin sağladığı besleme bölgeleri uç bölgelerin sağladığı besleme bölgelerinin içinde kalmalıdır (Ou ve diğer., 2002).

2.3.3.3 Yandan Beslenen Döküm Kesitleri

Bir önceki başlık altında besleyici ve uç bölgeler ile ilgili açıklamalar sadece üstten beslenen kesitler için geçerli olmakla birlikte yan besleyiciler için gözden geçirilerek açıklanmıştır. Yan besleyiciler her yönde besleme yapamadığı için besleyici besleme mesafesi biraz farklıdır (Ou ve diğer., 2002).

Şekil 2.18'de parçanın kalıp ile temasta bulunan dört uç bölgesi bulunmaktadır. Sağ ve sol taraftan gelen uç bölgeleri L uzunluğuna, üst ve alttan gelen uç bölgeleri W genişliğine bağlıdır. Kalıba giren sıvı metal döküm parçasının köşelerindeki boşlukları doldurmak için köşelere yönlenecektir. Besleme metalinin oluşturduğu sıcaklık gradyanı kalıp yüzeylerinin soğutma etkisini karşılaması gerekmektedir (Ou ve diğer., 2002).

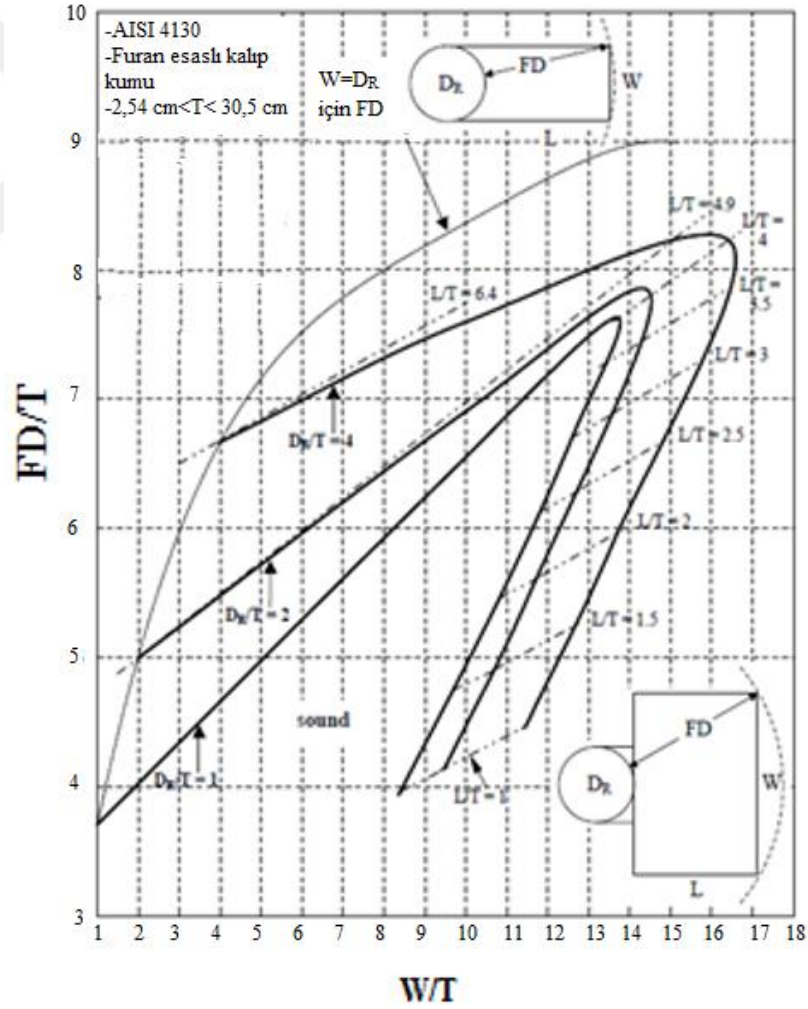
Şekil 2.18a'da uç noktaların kesişme noktaları besleyici besleme bölgesi içindedir ve döküm kesitinin tamamı besleyici ve uç besleme bölgeleri içinde kalmaktadır. Şekil 2.18b'de uç noktaların kesişme noktaları besleyici bölgesinin dışında kalmıştır ve bunun sonucunda çekinti hataları oluşmuştur. Belirtilen yöntemler karmaşık geometrili şekiller için yan besleyici uygulamalarında kullanılabilir. Yan besleyici kullanılan dökümlerde kesit genişliği ve kalınlığa bağlı olarak RZL ve EZL mesafeleri kullanılabilir (Ou ve diğer., 2002).



Şekil 2.18 Yandan beslenen plaka; a) Uç bölgeler besleyici bölgesi içinde, b) Besleyici bölgesi içinde uç bölge oluşumu yoktur, çekinti oluşur (Ou ve diğer., 2002)

2.3.3.4 Uç Etkili Döküm Kesitlerinde Yandan Besleme

Döküm parçasının yan besleyici tarafından beslenmesi durumunda besleme mesafesi tek bir eğri ile gösterilememektedir. Besleme mesafesi besleyici boyutlarına bağlı olduğu bilinmektedir. Yan besleme üstten beslemeye göre daha karmaşık olduğu için besleyici çapı esas alınarak genişlik ve kalınlık değerlerinin oranlanmasıyla bir eğri oluşturulmuştur. Döküm parçasının genişliği ile ve besleyici çap değerinin eşit olması kritik durumu ifade etmektedir. $W=D_R$ olması durumunda yan besleyici üst besleyici gibi davranır ve bunun sonucunda yan besleyicinin FD/T değeri üst besleyicinin FD/T değerine eşit olduğu görülür. Şekil 2.19’da kesikli çizgiler L/T oranını ifade etmektedir (Hardin ve diğer., 2001).



Şekil 2.19 Döküm parça uzunluğu, döküm parça genişliği ve besleyici çapına bağlı besleme mesafesi (Hardin ve diğer., 2001)

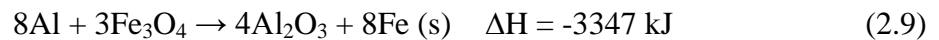
2.3.4 Besleyici Gömleklerin Kullanılmasıyla Verimin Arttırılması

Döküm parçasının katılaşması sırasında besleyicinin işlevi kullanılan besleyici şekli, boyutu, konumu bağlı olarak değişmektedir. Ek olarak kalıp tasarımında soğutma elemanı kullanılması, yalıtkan ve ekzotermik bileşiklerin kullanılması, döküm parçasının kesit durumu besleyicinin işlevini değiştirecektir. Besleyici işlevinin değişmesi sonucunda besleyici veriminde değişimler olacaktır. Besleyici verimini arttırmak amacıyla besleyici gömlekler kullanılabilir.

Besleyici gömlekler 3 ana özellikleri ile sınıflandırılmaktadır.

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

Genel olarak besleyici gömleklerin temel bileşenleri; metalik alüminyum, yüksek demir oksit içeren hadde tufalı, sodyum nitrat, kriyolit, ısı ile sertleşen reçine, mineral yündür (Lipowska ve diğer., 2010). Besleyici gömleklerin yapısında bulunan metalik alüminyum ile metal oksitlerin reaksiyona girmesi sonucunda yüksek enerjiler ortaya çıkmaktadır. Bu reaksiyonlar alüminotermik reaksiyonlar olarak adlandırılmaktadır (Eşitlik 2.8 ve Eşitlik 2.9). Bu reaksiyonların başlaması için ateşleyici olarak adlandırılan flor esaslı bileşikler kullanılmaktadır (Neu ve Gough, 1993). Bu reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan ısının yayılımını azaltmak için besleyici gömlek karışımlarında yalıtım özelliği sağlayan mineral yün ve dolgu malzemeleri kullanılmaktadır (Twardowska ve Aufderheide, 2002).



Ekzotermik ve yalıtım özellikli besleyici gömleklerin kullanılmasıyla besleyici metalinin daha geç katılaşması sağlanarak döküm parçasına sıvı metal akışı sürekli olarak sağlanır ve döküm parçası hata içermeden üretilebilir. Silindirik besleyiciler

için %14 olan besleyici verimi besleyici gömleklerin kullanılmasıyla %80'e kadar artmaktadır (Sorelmetal, 2000).

2.3.5 Döküm Benzeşim Programı ve Optimizasyon

Karmaşık geometrili ve farklı kesit kalınlıklarına sahip döküm parçaların yolluk besleyici tasarımı oldukça zordur. Ancak gelişen bilgisayar teknolojileri ile döküm proseslerinin modellenmesi, döküm parçalarının mikro ve makro yapılarının önemli ölçüde tahmin edilebilmesi benzeşim programları sayesinde sağlanmaktadır. Döküm proseslerinin modellenmesi, bilgisayarın kalıp doldurulurken ve doldurma yapıldıktan sonra kalıp içerisinde neler olduğu hakkında hızlı ve doğru tahmin yapabilmesi için gerekli bir matematiksel yöntemdir (Çolak ve Kayıkçı, 2002). Aktif olarak kullanılan birçok benzeşim programı bulunmaktadır. Bunlar; ADSTEFAN, AnyCasting, AutoCAST, CapCAST, CastCAE, Flow-3D, MagmaSoft, Mavis Flow, Nova Flow, ProCAST, SoftCAST, SUTCAST, Virtual Casting, Pam-Quick Cast, ve WINCAST (Jagdishwar, 2012).

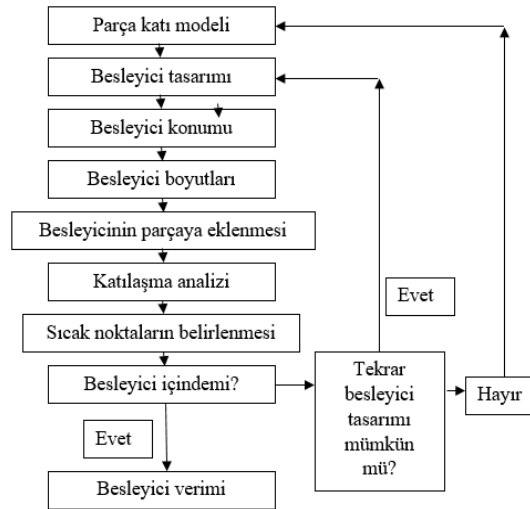
Benzeşim programları yeni bir teknoloji olarak kalıp tasarımını kolay, ekonomik ve doğru yapabilmeye olanak sağlayarak deneme ve yanılma maliyetini ortadan kaldırmaktadır. Bilgisayar ortamında benzeşim programları kullanarak 3 boyutlu katı model üzerinde, kaç tane ve hangi boyutlarda besleyicinin gerekli olduğunu ve nereye yerleştirileceği belirlenerek yolluk-besleyici tasarımı yapılabilir. Tasarımı yapılan parçanın benzeşim sonuçları bilgisayar ortamında katılma davranışı ve çekinti oluşumu incelenebilir (Çolak ve Kayıkçı, 2002).

Bilgisayar ortamında benzeşim çalışmasının modellenmesini yapmak için gerekli işlem basamakları bulunmaktadır. İşlem basamaklarının sırasıyla yapılması sonucunda doğru değerlendirmeler yapılabilir. Bu işlem basamakları dökülecek olan malzeme seçimi ile başlamaktadır. Malzeme seçiminin ardından döküm ve kalıp modeli bilgisayar ortamında oluşturulur ve oluşturulan bu model hücrelere ayrılarak benzeşim çalışması yapılır. Benzeşim sonuçları incelenerek yapılan tasarım değerlendirilir. Farklı tasarımlar deneyerek çok sayıda benzeşim çalışması

yapılabilir. Benzeşim çalışması tekrarlanabilen bir işlem olduğundan istediğimiz parametreyi değiştirerek yeni bir benzeşim çalışmasına başlatılabilir ve optimum tasarım kısa zamanda ekonomik bir şekilde belirlenebilir (Çolak ve Kayıkcı, 2002). İstenilen tasarıma ulaşmak için optimizasyon kavramının iyi bilinmesi gerekmektedir.

Optimizasyon; Tanımlanan veya sayısal değerler ile belirtilen bir hedef kavramına etki eden parametrelerin farklı değerler veya durumlarda olması sonucunda hedef kavramına en uygun sonuç olarak tanımlanabilir. Optimizasyon çalışmalarında amaca uygun bir şekilde hedef belirlenerek hedefe etki eden parametrelerin doğru bir şekilde belirlenmesi yapılacak olan çalışmanın etkinliğini arttıracaktır. Bu kapsamda döküm benzeşim çalışmalarında yapılacak olan optimizasyon çalışmalarında hedefe etki eden parametrelerin irdelenerek belirlenmesi gerekir.

Dökümü planlanan parçanın benzeşim çalışmalarında optimum tasarıma etki eden en önemli kavramlardan biri besleyicilerin işlevini yerine getirip getirmediğidir. Bundan dolayı döküm işlemine geçilmeden önce benzeşim programları ile besleyicilerin işlevi optimize edilmelidir. Optimizasyon yöntemleri sistematik bir yaklaşım sunmaktadır. Döküm benzeşim programı ile katılma analizinde genel olarak besleyicilerin tasarımı ve optimizasyonu için akış şeması Şekil 2.20’de gösterilmektedir (Jagdishwar, 2012).



Şekil 2.20 Besleyici tasarımı ve optimizasyonu (Jagdishwar, 2012)

Besleyici katı modeli döküm tasarımına eklenir ve döküm benzeşim programında döküm parçasının katılma modeli incelenir. Besleme yolu ve sıcak nokta kriterleri değerlendirilir. Döküm parçası içinde sıcak bölgelerin kalması durumunda besleyici boyutları tekrar belirlenir. Eğer tek başına besleyici boyutlarının değiştirilmesi tasarımı iyileştirmek için yeterli değilse parça tasarımı değiştirilmelidir. Son adımda besleyici verimi hesaplanır (Jagdishwar, 2012).

Genel başlıklar altında besleyici tasarımlarında kullanılan farklı optimizasyon teknikleri aşağıda belirtilmektedir. Bunlar sayısal optimizasyon yöntemi, geometrik optimizasyon yöntemi ve topoloji optimizasyon yöntemidir.

Sayısal optimizasyon yöntemi; Döküm tasarımı parça geometrisi ve proses şartlarına göre tanımlanır. Proses parametreleri ve geometrik parametreler değişebilen tasarım parametreleri olup geriye kalan parametreler modelleme parametreleridir. Proses parametreleri döküm alaşımı, kalıp kumu, besleyici türüdür. Geometrik parametreler besleyici ve döküm parçasının boyutlarıdır. Maliyeti en aza indirmek için sayısal optimizasyon yöntemi ortaya konulmaktadır. Minimum maliyet ve istenilen şartların sağlanması için tasarım parametreleri belirlenir (Jagdishwar, 2012).

Geometrik optimizasyon yöntemi; Besleyici ve döküm geometrisinin şekline bağlı olarak Chvorinov kuralına göre göre besleyici ve döküm parçasının modül değerleri ile ısı kayıpları incelenir ve katılma analizi yapılır. Bu yöntemde besleyici kullanımıyla ilgili bir uygunluk fonksiyonu belirlenir ve en yüksek döküm verimi hedeflenir. Bilgisayar ortamında besleyici ve döküm parçasının üç boyutlu şekilleri çizilir ve ampirik kurallara dayanan algoritmalar kullanılarak optimum besleyici boyutları belirlenir. Belirlenen optimum boyutlardaki besleyicinin kullanılmasıyla döküm verimi artırılır (Jagdishwar, 2012).

Topoloji optimizasyon yöntemi; Genellikle kum kalıba dökümlerde besleyici tasarımının geliştirilmesi için kullanılır. Bu yöntemde optimizasyon tekniği ile farklı katılma analizleri yapılarak en uygun besleyici tasarımına karar verilir. Bu amaçla

yapılan ilk besleyici tasarımı istenilen şartları sağlayana kadar iteratif yaklaşımla algoritmanın çözümlenmesi sonucunda besleyici tekrar tasarlanır. Yapılan her iterasyon ısı iletim denklemi çözülür ve besleyici endeksi belirlenir. Düşük besleyici endeksi sahip tasarımlar çıkarılır. Algoritmanın durdurulması maksimum döküm verimi veya mikro çekintilerin kabul edilebilir seviye olması ile mümkündür. Sonuç olarak yapılan farklı tasarımlarda yönlü katılma sağlanarak döküm verimi artırılır ve döküm parçası çekinti hataları içermez (Jagdishwar, 2012).

Döküm verimini arttırmak için besleyici hacmi en aza düşürülmesi gerekmektedir. Son yıllarda döküm benzeşim programları döküm hatalarını tahmin etmek için güçlü bir teknolojik yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Benzeşim programları kullanılarak düşük maliyetle optimum tasarımlara ulaşmak için çalışmalar yapılmıştır. Deneme ve yanılma yöntemleri daha hızlı ve kolay olmasına karşılık mutlaka her zaman optimum çözümü vermeyebilir. Optimizasyon yöntemlerine dayanan tekniklerin kullanılmasıyla yapılacak olan tasarımlar deneme yanılma yöntemlerine göre daha doğru sonuçlar vermektedir (Jagdishwar, 2012).

2.3.5.1 Benzeşim Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Benzeşim çalışmaları sonuçlarının değerlendirilmesi ile kısa zamanda kalıp tasarımında iyileştirmeler yapılabilir ve hata içermeyecek çalışmalar gerçekleştirilir. Benzeşim çalışmaları sonucunda optimum tasarımlara ulaşabilmek için yapılan çalışmaların mühendislik bilgileri doğrultusunda değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda benzeşim çalışması yapan kişinin kalıp tasarımını iyi bir şekilde analiz etmesi gerekmektedir. Kalıp tasarımı analizlerinde seçilen parametreler (döküm sıcaklığı, döküm yöntemi, kalıp kumu, kalıp yardımcı elemanlar, döküm alaşımı, döküm parçası boyutları, besleyici ve yolluk tasarımı) yapılan çalışmanın sonuçları ile ilişkilendirilir ve istenilen hedefe yönelik iyileştirmeler yapılır.

Benzeşim sonuçlarının değerlendirilmesinden önce benzeşim sırasında kalıp dolununun ve sıcaklık dağılımı incelenerek anlık olarak hata oluşma ihtimali değerlendirilebilir. Bundan dolayı benzeşim çalışmasının en başından sonuna kadar

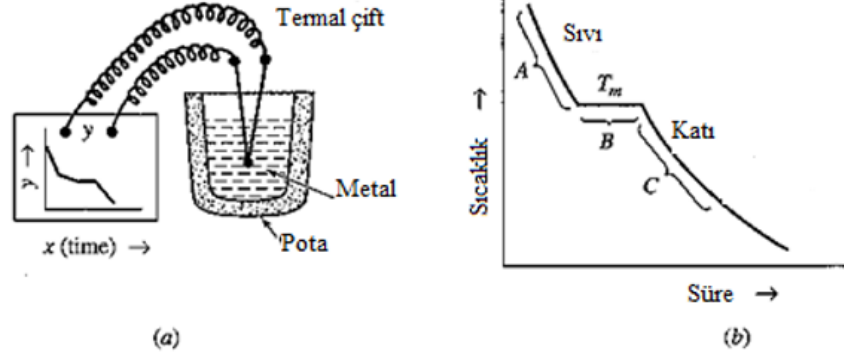
dikkatli bir şekilde kontrol edilerek gerçekleştirilmesi sonucunda kısa zamanda istenilen hedef doğrultusunda uygun sonuçlar elde edilebilir. Benzeşim çalışmasının sonuçları ile gerçekte yapılan döküm çalışmasının sonuçları arasında uyumsuzluk bulunuyorsa kalıp tasarım parametrelerinin tekrar değerlendirilerek iyileştirilmesi gerekir. Yapılacak olan iyileştirmelerin ardından benzeşim sonuçları yorumlanabilir.

Benzeşim çalışması sonucunda neredeyse istenilen bütün özellikler belirlenebilir (Çolak ve Kayıkçı, 2002). Bunlar;

- 1- Kalıp dolumu esnasında sıvı metalin hızı, basıncı, yönü,
- 2- Kalıp dolumu aşamasında oluşabilecek türbilanslar,
- 3- Döküm parçasının katılma süresi, döküm parçası üzerinde oluşan sıcak noktalar, beslenmesi gereken noktalar ve modülleri,
- 4- Besleyici yeri ve boyutları,
- 5-Parça üzerinde oluşan çekinti (makro hatalar), sıcak yırtılma riski taşıyan bölgeler, Niyama kriterine göre mikroporozite tahmini,
- 6- Döküm parçasının kesitleri üzerinde soğuma süresince sıcaklık-süre analizleri,
- 7- Döküm parçasının kesitleri üzerinde katılma zamanı analizi,
- 8- Yönlenmiş katılma analizi,
- 9- Doldurma ve katılma esnasındaki sıcaklık dağılımı,
- 10- Döküm parça hacim ve ağırlıkları şeklinde sıralanabilir (Çolak ve Kayıkçı, 2002).

Benzeşim çalışmalarının hedefi döküm parçasını hata içermeyecek şekilde üretmektir. Bu kapsamda optimum tasarımlara ulaşmak için çekinti hatalarının analizi ve sıcaklık - süre grafiklerinin değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Benzeşim çalışmalarında ölçülen sıcaklık değerleri ile gerçekte yapılan çalışmalarda ölçülen sıcaklık değerlerinin uyumlu olması benzeşim çalışmasının güvenilirliğini arttıracaktır. Bu kapsamda optimum tasarımlara ulaşmak için gerçekte yapılan döküm çalışmalarının sıcaklık ölçümleri ve çekinti görüntüleri ile benzeşim programından alınan sıcaklık ölçümleri ve çekinti görüntüleri karşılaştırılmalıdır.

Şekil 2.21’de gerçekte yapılan döküm çalışmalarından ölçülecek sıcaklıklardan yararlanılarak soğuma eğrisinin çıkarılışı ve bölgeleri gösterilmektedir.



Şekil 2.21 a) Termal çift ile sıcaklık ölçümü, b) Soğuma eğrisi bölgeleri (Aran, 2007)

BÖLÜM ÜÇ

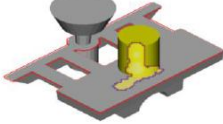
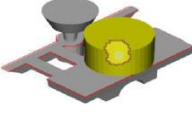
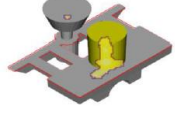
LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Bu bölümde endüstride yaygın olarak kullanılan besleyicilerin (kum besleyici) ve besleyici gömleklerin döküm çalışmalarında kullanılmasına yönelik deneysel ve döküm benzeşim çalışmaları özetlenmiştir. Yapılan çalışmalarda kum besleyici, ekzotermik ve yalıtım özellikli besleyici olmak üzere farklı türlerde besleyiciler kullanılmıştır. Kum besleyici kullanılarak yapılan döküm benzeşim çalışmaları incelendiğinde döküm parçasının çekinti miktarı ve verimi değerlendirilerek söz konusu döküm parçası için optimum besleyici boyutlarını elde etmek hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda izlenen yöntemler ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Ekzotermik ve yalıtım özellikli besleyici gömleklerin işlevini yansıtan çalışmaların yöntemi açıklanmıştır. İncelenen çalışmalarda genellikle benzeşim programından ve döküm denemelerinden ölçülen sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır. Döküm denemelerinde kullanılan besleyici gömleğin türüne göre soğuma eğrilerinin nasıl değiştiği sıcaklık-süre grafikleri ile ortaya konulmuştur. Döküm öncesi ve döküm sonrası besleyici gömleklerin karakterizasyon yöntemleri açıklanmıştır.

Khade ve Sawant, (2014) dökme demir fren diski parçasının üretilmesinde döküm verimini arttırmak amacıyla optimum silindirik besleyici boyutlarını belirlemişlerdir. Fren diski parçasının katı modellemesi yapılmıştır ve benzeşim programına tanıtılmıştır. Besleyici konumlarını belirlemek amacıyla besleyici kullanılmadan döküm parçasının katılaşması incelenmiştir. Benzeşim çalışmaları sonucunda sıcak nokta bölgesi belirlenmiştir ve besleyici konulması gereken yer tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada, besleme kuralları doğrultusunda tasarlanan farklı boyutlardaki (çap, yükseklik) besleyiciler parça üzerinde belirlenen sıcak nokta bölgesine ayrı ayrı yerleştirilerek parçanın katılaşma davranışları değerlendirilmiştir. Benzeşim çalışmalarıyla birlikte geleneksel olarak bilinen modül ve hacim kriteri esas alınarak hesaplar yapılmıştır. Benzeşim sonuçlarına göre optimum besleyici boyutları belirlenmiştir. Optimum besleyici tasarımı ile benzeşim çalışması sonucunda döküm verimi artırılmıştır (Khade ve Sawant, 2014).

Narwade ve diğer., (2014) döküm hatalarını eleme etmek ve döküm verimini arttırmak amacıyla optimum silindirik besleyici boyutlarını belirlemişlerdir. Optimum besleyici boyutlarının belirlenmesinde farklı boyutlarda besleyicilerin kullanıldığı tasarımların döküm benzeşim çalışmaları incelenmiştir. Yapılan deneysel ve benzeşim çalışmalarında, döküm parçası LM6 alüminyum alaşımı olup kalıp malzemesi olarak silis kumu kullanılmıştır. Benzeşim çalışmaları Auto-Cast programında yapılmıştır. Benzeşim çalışmalarında besleyici kullanılmadan katılma davranışı incelenen parçanın sıcak noktaları belirlenmiştir. Belirlenen sıcak noktalara farklı boyutlarda silindirik besleyiciler konularak döküm parçasının katılma davranışı ve döküm verimi incelenmiştir. Farklı boyutlarda besleyici kullanılarak yapılan tasarım denemelerinde kum besleyicilerin yanı sıra besleyici gömlekler de kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde büyük besleyici kullanılarak gerçekleştirilen tasarımın diğer tasarımlara göre veriminin daha düşük olduğu ve hata içermediği belirtilmiştir. Yazarlar bu doğrultuda Tablo 3.1’de büyük besleyici olarak adlandırılan tasarımın optimum tasarım olduğunu belirlemişlerdir (Narwade ve diğer., 2014).

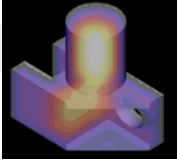
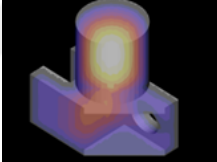
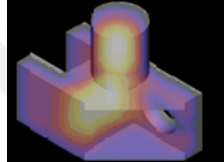
Tablo 3.1 Farklı besleyici tasarımlarından elde edilen sonuçların karşılaştırılması (Narwade ve diğer., 2014)

| Besleyici boyutu | İlk tasarlanan besleyici | Büyük besleyici | Küçük besleyici |
|---|---|--|---|
| Benzeşim sonucu |  |  |  |
| Besleyici ve boyun bölgesi boyutları (mm) | Besleyici(H)=55 Besleyici(D)=48 Boyun Bölgesi(H)=5 Boyun Bölgesi(D)=37 | Besleyici(H)=55 Besleyici(D)=74 Boyun(H)=5 Boyun(D)=60 | Besleyici(H)=55,28 Besleyici(D)=37,43 Boyun(H)=4,68 Boyun(D)=30,50 |
| Çekinti | Küçük çekinti | Çekinti yok | Büyük çekinti |
| Verim (%) | 62 | 58 | 70 |
| Sonuç | Kabul edilemez | Kabul edilebilir | Kabul edilemez |

Jadhao ve Salunke (2014) besleyici optimizasyonunda benzeşim programının önemini yansıtan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, döküm veriminin

arttırılması ve hataların azaltılması için benzeşim programı ile besleyici optimizasyonun etkinliğini yansıtmışlardır. Bu çalışmada, dökme demir malzemesi bilgisayar ortamında 3 boyutlu çizilerek benzeşim programına tanıtılmıştır. Öncelikle döküm parçası üzerindeki sıcak noktaları belirlemek amacıyla besleyicisiz olarak katılma davranışı incelenmiştir. Belirlenen sıcak noktalara farklı yükseklik ve çapa sahip silindirik besleyiciler yerleştirilmiştir. Farklı besleyici boyutları ile gerçekleştirilen tasarımların verimlilikleri ve çekinti miktarları karşılaştırılarak optimum besleyici boyutları belirlenmiştir. Tablo 3.2’de farklı tasarımlardan elde edilen sonuçlar yansıtılmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde büyük besleyici olarak adlandırılan tasarımın döküm verimi en düşük olup, çekinti hatalarının döküm parçasında oluşmadığı tespit edilmiştir (Jadhao ve Salunke, 2014).

Tablo 3.2 Farklı besleyici tasarımlarından elde edilen sonuçların karşılaştırılması (Jadhao ve Salunke, 2014)

| Besleyici boyutu | İlk tasarlanan besleyici | Büyük besleyici | Küçük besleyici |
|--|---|--|---|
| Benzeşim sonucu |  |  |  |
| Besleyici ve boyun bölgesi boyutları (mm) | Besleyici(H)=93 Besleyici(D)=62 Boyun Bölgesi(H)=10 Boyun Bölgesi(D)=49 | Besleyici(H)=112 Besleyici(D)=75 Boyun(H)=10 Boyun(D)=60 | Besleyici(H)=100 Besleyici(D)=50 Boyun(H)=10 Boyun(D)=40 |
| Çekinti | Küçük çekinti | Çekinti yok | Büyük çekinti |
| Verim (%) | 62 | 48 | 70 |
| Sonuç | Kabul edilemez | Kabul edilebilir | Besleyici gömlek ile kabul edilebilir |

Nandi ve diğer., (2011) benzeşim programı kullanarak üretimi planlanan plaka şeklindeki alüminyum parçanın katılma davranışını incelemişlerdir ve optimum silindirik besleyici boyutlarını belirlemişlerdir. Kalıp tasarımında farklı boyutlarda besleyiciler kullanılmıştır. Yapılan çalışmada alüminyum plakanın boyutları 100x100x20 mm, kalıp boyutları 330x330 mm olarak belirlenmiştir. Kalıp kumu olarak bentonit bağlayıcılı silis kumu kullanılmıştır. Geleneksel yöntemle besleyici modül hesapları yapılmıştır. ve döküm benzeşim programı ile döküm parçasının

sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Bu çalışmalara ek olarak farklı kalınlıklardaki alüminyum plakalar için optimum silindirik besleyici boyutları bulunmuştur. Benzeşim çalışmaları yapılan deneysel çalışmalarla desteklenmiştir. Farklı boyutlarda besleyici kullanımının çekinti görüntülerine etkisi ilişkilendirilmiştir. Yazarlar, LM6 alüminyum plaka için besleyici tasarımında güvenlik katsayısı 1,2 yerine 1,06 alındığında çekinti içermeyen sağlam bir parçanın üretilebileceğini yapılan benzeşim çalışmalarıyla göstermişlerdir (Nandi ve diğer., 2011).

Hussain ve Khandwawala, (2013) geleneksel modül yöntemini esas alarak hesaplanan besleyici verimi ile ANSYS 12.0 benzeşim programında hesaplanan besleyici verimini karşılaştırmışlardır. Kalıp tasarımında kalıp kumu olarak yaş kum seçilmiş olup çelik parça üzerinde benzeşim çalışmaları yapılmıştır. Benzeşim programında iki adet besleyici belirlenen sıcak noktalara yerleştirilmiştir ve parça üzerinde sıcaklık dağılımı gözlemlenmiştir. ANSYS 12.0 benzeşim programı ile hesaplanan silindirik besleyicilerin veriminin, modül yöntemine göre hesaplanan besleyici veriminden daha yüksek olduğu yansıtılmıştır. ANSYS 12.0 benzeşim programı kullanılarak optimum besleyici boyutları elde edilerek besleyici verimi %86 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma göstermektedir ki modül yöntemine göre daha verimli besleyici tasarımları benzeşim programı ile gerçekleştirilebilmektedir. Yazarlar, benzeşim programında besleyici veriminin arttırmaya yönelik yapılacak olan çalışmaların çok uzun sürelerde tamamlandığına vurgu yapmışlardır (Hussain ve Khandwawala, 2013).

Chudasama, (2013) Pro-Cast benzeşim programını kullanarak silindirik besleyici yüksekliğinin (H) ve düşey yolluk yüksekliğinin döküm parçası içerisindeki çekinti miktarına etkisini incelemiştir. Araştırmacı, benzeşim programlarından elde ettiği sonuçları deneysel çalışmalardan elde ettiği sonuçlarla karşılaştırmıştır. Besleyici ve döküm parçasının 3 boyutlu çizimi gerçekleştirilmiştir ve benzeşim programına tanıtılmıştır. Kalıp malzemesi olarak benzeşim programında ve deneysel çalışmalarda silis kumu kullanılmıştır. Yükseklikleri birbirinden farklı olan silindirik besleyici gömleklerin kullanılması sonucunda çekinti miktarlarının yüzdeleri yansıtılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda dökümü gerçekleştirilen parçaların

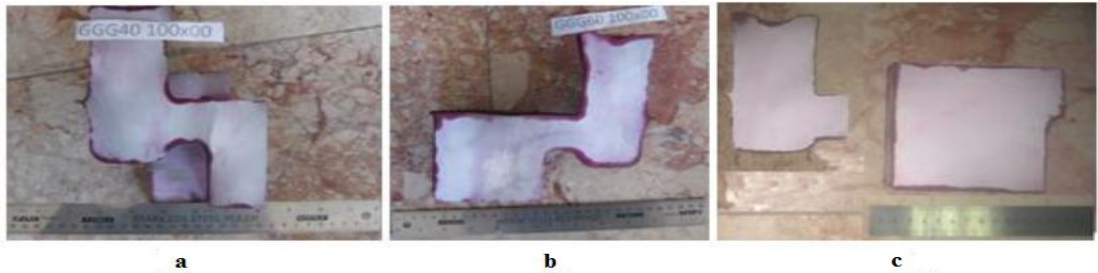
çekinti seviyeleri X radyografi yöntemi ile tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda üretilen parçaların çekinti yüzdesi ile benzeşim çalışmaları sonucunda elde edilen çekinti yüzdelerinin tutarlı olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak; gerçekleştirilen bu çalışmada silindirik besleyici yüksekliği ve yolluk yüksekliği optimize edilerek en düşük çekinti yüzdelerini veren tasarımlar belirlenmiştir (Chudasama, 2013).

Iqbal ve diğer., (2014) düşük alaşımlı çelik parçasını hatasız olarak minimum maliyetle üretilebilmek için optimum besleyici ve yolluk tasarımını belirlemeyi hedeflemiştir. Optimum besleyici boyutlarını belirlemek için yolluk tasarımı her tasarımda aynı kalacak şekilde farklı boyutlarda besleyici kullanılarak tasarımlar yapılmıştır. Yazarlar, silindirik besleyici tasarımı için modül hesaplamaları yapmışlardır. Aynı zamanda benzeşim programının kullanılması ile besleyici tasarımı yapılmıştır. Catia çizim programında döküm parçasının üç boyutlu çizimi oluşturularak benzeşim programına tanıtılmıştır. Benzeşim programında çelik parçanın sıcak noktaları belirlenerek silindirik besleyiciler belirlenen konumlara yerleştirilmiştir. Bu işlemlerin ardından döküm parçasının katılma davranışı incelenerek oluşan çekintilerin parça içinde olup olmadığı gözlemlenmiştir. Farklı silindirik besleyicilerle gerçekleştirilen tasarımların döküm verimleri ve çekinti miktarları birbirleriyle karşılaştırılmıştır ve bu veriler doğrultusunda optimum besleyici tasarımı yapılmıştır. Optimum silindirik besleyici kullanılarak gerçekleştirilen benzeşim çalışmalarında, döküm verimi diğer besleyici tasarımlarından elde edilen döküm verimlerinden daha düşük olduğu vurgulanmaktadır. Optimum besleyici ile gerçekleştirilen tasarımda, parçanın çekinti içermediği ve sağlam olarak üretilebileceği gösterilmiştir. Ayrıca araştırmacılar geleneksel modül yöntemiyle döküm verimini %70 hesaplarken, Pro-Cast benzeşim programı ile optimum silindirik besleyici kullanılarak gerçekleştirilen benzeşim çalışmaları sonuçlarında verimlilik değerini %72 olarak hesaplamışlardır. Yazarlar bu sonuçlar doğrultusunda benzeşim programı kullanılarak optimum besleyici boyutlarının belirlenebileceğini ve döküm maliyetlerinin azaltılabileceğini vurgulamışlardır (Iqbal ve diğer., 2014).

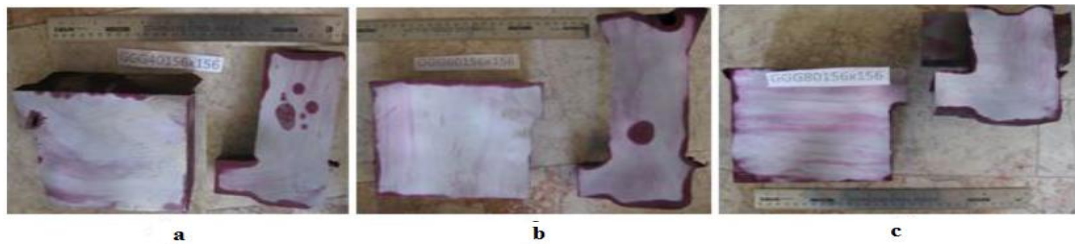
Kayıkçı ve diğer., (2007) benzeşim programını kullanarak farklı kesit kalınlıkları içeren AISI 1020 alaşımlı çelik parçasının katılma davranışını incelemişlerdir. SolidCast benzeşim programı ile farklı yolluk ve besleyici tasarımları gerçekleştirilmiştir. Farklı yolluk ve besleyici tasarımlarının benzeşim sonuçlarına göre dökümün katılma süresi, döküm verimi karşılaştırılarak en verimli dökümün gerçekleştirilebilmesi için uygun olan tasarıma karar verilmiştir. Besleyici tasarımları sıcak nokta, hacim, besleme yolu ve modül kriterleri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Benzeşim programında iki farklı besleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. İlk tasarımında silindirik besleyiciler, ikinci tasarımda oval besleyiciler kullanılmıştır. Gerçekleştirilen ikinci tasarımın döküm verimi ilk tasarıma göre daha yüksek bulunmuştur. Yapılan benzeşim çalışmaları incelendiğinde parçanın oval besleyiciler kullanılarak gerçekleştirilen ikinci tasarım ile makro ve mikro hata içermeyecek şekilde dökülebileceğine karar verilmiştir. Dökülen çelik parça işlenmemiş halde 3300 kg ağırlığa sahip olup sentetik reçine bağlayıcı kum kalıba dökülmüştür. Döküm işleminin ardından döküm parçasının ultrasonik muayene ile tahribatsız olarak kontrol edilip gözenek içermediği tespit edilmiştir (Kayıkçı ve diğer., 2007).

Arda ve diğer., (2011) GGG-40, GGG-60 ve GGG-80 alaşımlı üç farklı küresel grafitli dökme demir malzemenin 1 cm, 2,54 cm ve 3,5 cm modüllerine sahip sırasıyla 100 mm, 156 mm ve 216 mm boyutlarında küp şeklinde üç farklı döküm gerçekleştirmişlerdir. Dökümü gerçekleştirilen parçalar SolidCast benzeşim programında analiz edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Benzeşim sonuçları ve döküm parçalarının kimyasal analizleri doğrultusunda, modül değişiminin ve kimyasal kompozisyonun beslemeye ve genleşmeye etkisini incelemişlerdir. Döküm çalışmalarına geçilmeden önce ergimiş haldeki metalin safsızlıklarını gidermek için curuf giderme ve argon ile gaz giderme işlemleri yapılmıştır. Bu işlemlerin ardından 1380°C'de furan reçineli kalıba dökülmüştür. Modülün küreselleşmeye etkisini irdelemek amacıyla dökülen parçalardan numuneler çıkartılarak incelenmiştir. Elde ettikleri verileri doğrulamak amacıyla tahribatsız muayene yöntemi olan sıvı penetrant yöntemini kullanmışlardır. Sıvı metalin katılması sırasında katılma bilgilerini almak amacıyla benzeşim programı ile sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Bu

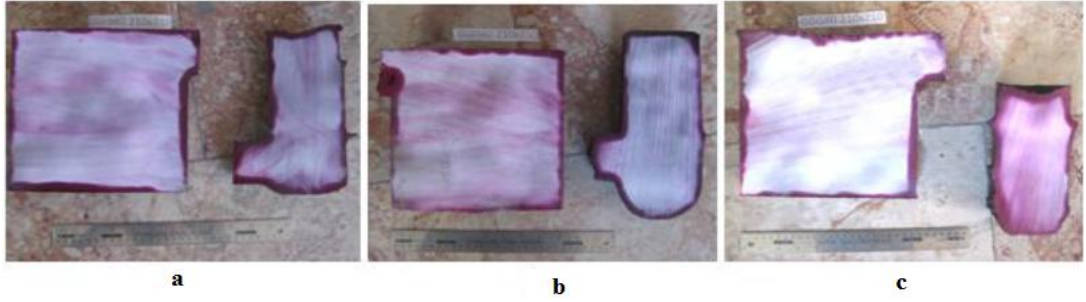
veriler doğrultusunda grafit genişmesi ile sıvı metal besleme gereksiminin değişimini tespit etmek için benzeşim çalışmaları yapılmıştır. SolidCast programı içinde bulunan besleyici tasarım programını kullanarak besleyici boyutları belirlenmiştir. Yazarlar, kullanılan döküm kumunun grafit oluşumuna dayanan döküm genişmesine karşı koyabildiği sonucuna varmışlardır. 100 mm boyutlarına sahip küp dökümlerin yüzeylerinde oluşan çöküntülere dayanarak bir miktar çekme etkisi altında katılaştığını ancak besleyicilerin bu çekintiyi karşılayabilecek boyutta olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.1). Gerçekleştirilen benzeşim çalışmalarında herhangi bir gözenekliliğin bulunmadığı görülmüştür. 156 mm boyutlarındaki küp dökümlerde prozite oluşmadığı ve besleyicilerin merkezlerinde çekinti hataları görülmüştür. Sadece dökülen GGG-40 alaşımın deney numunesinin besleyici bağlantı bölgesinde bir miktar çekinti hatası görülmüştür (Şekil 3.2). 210 mm boyutlarındaki küp dökümlerde herhangi bir boşluk görülmemiştir (Şekil 3.3). Araştırmacılar besleyicilerin çekinti miktarlarına bakarak modül büyümesinden kaynaklı genişlemenin arttığı sonucuna varmışlardır. İ. Arda ve arkadaşları benzeşim çalışmaları sonucunda 100 mm, 156 mm, 210 mm boyutlarındaki küp numunelerde çekinti riski oluşmadığını görmüşlerdir. Gerçek döküm sonuçları ile benzeşim sonuçlarının benzerlik gösterdiği sonucuna varmışlardır (Arda ve diğer., 2011).



Şekil 3.1 100x100x100 mm boyutlarındaki numunenin, a) GGG40, b) GGG60, c) GGG80 alaşımından dökülmüş görüntüsü (Arda ve diğer., 2011)



Şekil 3.2 156x156x156 mm boyutlarındaki numunenin, a) GGG40, b) GGG60, c) GGG80 alaşımından dökülmüş görüntüsü (Arda ve diğer., 2011)



Şekil 3.3 210x210x210 mm boyutlarındaki numunenin, a) GGG40, b) GGG60, c) GGG80 alaşımından dökülmüş görüntüsü (Arda ve diğer., 2011)

Evmez, (2014) küresel grafitli dökme demirlerde benzeşim çalışmalarının çekinti sonuçları ile gerçek dökümlerde görülen çekinti sonuçlarını karşılaştırarak, benzeşim ve deneysel çalışmaların tutarlılığını irdelemiştir. Yapılan çalışmada değişik boyutlarda GGG-60 alaşımı 1370°C, 1366°C, 1355°C, 1350°C olmak üzere dört farklı sıcaklık değerinde dökülmüştür. Yapılan ilk çalışmada benzeşim çalışmalarının çekinti sonuçları ile yapılan döküm çalışmalarının çekinti sonuçları incelendiğinde, 1355°C sıcaklıkta dökülen alaşımda çekinti hatasının diğer sıcaklıklarda dökülen parçaların çekinti hatalarına kıyasla en düşük olduğu belirlenmiştir. İlk çalışmadan farklı olarak yapılan diğer çalışmalarda benzeşim çalışmalarında görülen çekinti değerleri ile döküm çalışmalarının çekinti değerleri arasında farklılık olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak Serkan Evmez, döküm sıcaklığı ile çekinti miktarı arasında her zaman doğrusal bir ilişki olmadığını, benzeşim çalışmalarının gerçek döküm çalışmaları ile her zaman uyumlu olmadığını yaptığı çalışmalarla göstermiştir (Evmez, 2014).

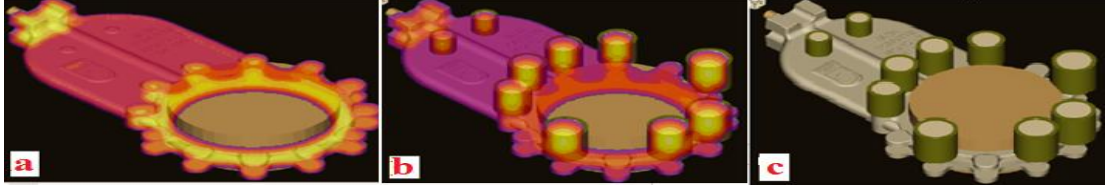
Perzyk ve diğer., (2014) benzeşim programı ile endüstriyel çalışmaların uyumluluğunu karşılaştırarak besleyici etkinliğini incelemiştir. Deneysel çalışmalarda levha şekilli AISI 1026 ve AISi10Mg alaşımlı parçalar üzerinde farklı H/D oranlarına sahip silindirik ve küresel besleyiciler kullanılmıştır. Silindirik besleyicilerin H/D oranı 1 ve 1,5 olacak şekilde değiştirilmiştir. NovaCast programı ile yapılan benzeşim çalışmaları sonucunda elde edilen görüntülere bakarak çekinti oluşumunun parça içinde olup olmadığı incelenmiştir. Parça içinde çekinti oluşumunu elimine etmek amacıyla besleyici boyutları arttırılmıştır. Benzeşim çalışmalarındaki çekinti görüntüleri ve besleyici verimleri ile gerçekte dökümü

yapılan alaşımların çekinti görüntüleri ve besleyici verimleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalara ek olarak silindirik ve küresel besleyicilerin verimleri literatür çalışmaları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak benzeşim programı verilerine göre hesaplanan besleyici verimliği literatür çalışmalarında verilen değerlerden daha yüksek olduğu yansıtılmıştır (Perzyk ve diğer., 2014).

Perzyk ve diğer., (2015) NovaCast benzeşim programı kullanarak farklı kalıp tasarımlarının çekinti oluşumuna etkisini incelemişlerdir. Döküm parçalarının boyutları, besleyici ve boyun bölgesi boyutları değiştirilerek tasarımlar yapılmıştır. Döküm parçalarının alaşımı düşük alaşımlı karbon çeliği ve gri dökme demir olmak üzere iki farklı alaşım seçilmiştir. Levha ve boru şeklinde olan parçaların benzeşim çalışmalarında kalıp kumu olarak yaş kum ile furan esaslı silis kumu kullanılmıştır. Yapılan kalıp tasarımlarında boyun bölgesi boyutları ve ekzotermik besleyici gömlek adedinin değiştirilmesi ile farklı H/D oranına sahip silindirik besleyici kullanımının çekinti oluşumuna etkisi benzeşim sonuçları incelenerek yorumlanmıştır. Benzeşim çalışmalarında kalıp tasarımları değiştirilmeden farklı alaşımların kullanılması ile farklı çekinti dağılımlarının görüldüğü belirtilmiştir. Aynı alaşımın farklı kalıp kumları kullanılarak yapılan çalışmada çekinti dağılımının benzer olduğu görülmüştür. Boyun bölgesi boyutlarının değişimi sonucunda gri dökme demir alaşımlı döküm parçalarında çekinti oluşumu görülmemiştir. Gri dökme demirlerde boyun bölgesi boyutunun arttırılması sonucunda çekinti oluşumunun besleyiciye doğru yöneleceği belirtilmiştir (Perzyk ve diğer., 2015).

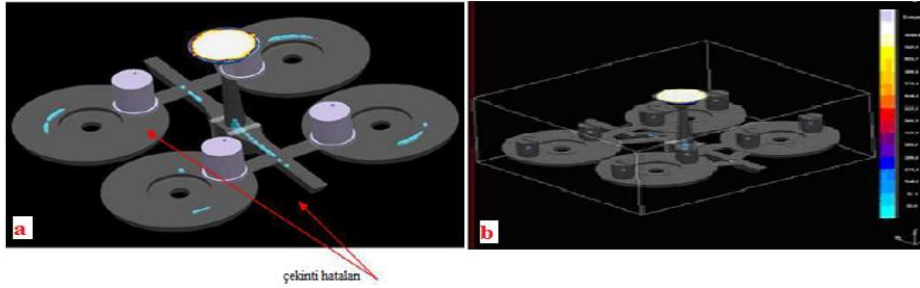
Amin ve diğer., (2014) endüstriyel alanda kullanılan AISI 430 ferritik paslanmaz çelik malzemesinden üretilen valf parçasını Auto-Cast benzeşim programı ile tasarlayarak hata içermeyecek şekilde sağlam olarak üretimini gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar ilk olarak besleyici konulması gereken yerleri belirlemek için besleyici kullanılmadan döküm parçasının katılaşma davranışını benzeşim programında incelemişlerdir. Şekil 3.4a'da gösterildiği gibi benzeşim programında döküm parçasının katılaşması tamamlandıktan sonra sıcak noktalar belirlenerek besleyici konulacak bölgeler tespit edilmiştir. Yazarlar, sıcak noktalara ayrı ayrı tasarımlar da kum ve ekzotermik silindirik besleyiciler koyarak benzeşim çalışmaları

gerçekleştirmişlerdir (Şekil 3.4b, Şekil 3.4c). Benzeşim programı tarafından hesaplanan optimum silindirik besleyiciler sıcak bölgelere yerleştirilerek döküm parçasının katılma davranışı incelenmiştir ve döküm parçasının sağlam olarak üretilbileceği sonucuna varılmıştır (Amin ve diğer., 2014).

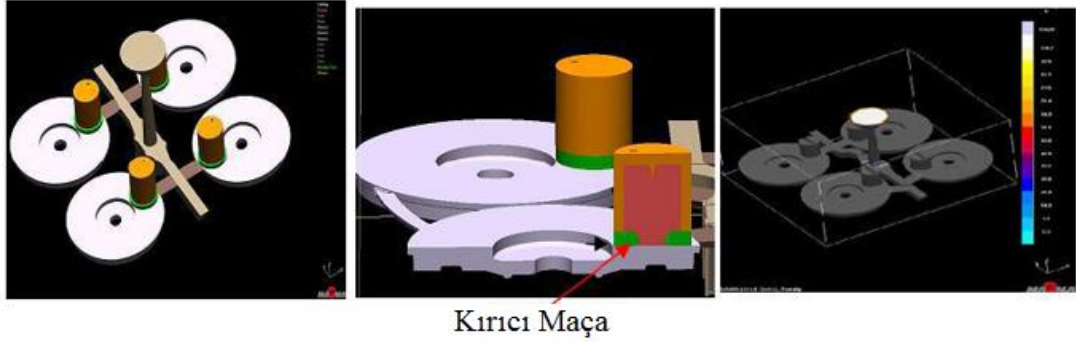


Şekil 3.4 a) Sıcak bölgelerin belirlenmesi, b) Kum besleyici kullanımı, c) Besleyici gömlek kullanımı (Amin ve diğer., 2014)

Ramu ve diğer., (2012) MagmaSoft benzeşim programını kullanarak küresel grafitli dökme demirden üretilen volan parçasının döküm maliyetini ve döküm hatalarını azaltmayı hedeflemişlerdir. Döküm hatalarını azaltmak ve hatasız döküm gerçekleştirmek için besleyici sayısını değiştirerek farklı tasarımlar denemişlerdir. Üç farklı tasarımın döküm verimi ve çekinti yüzdeleri karşılaştırılmıştır. T. Ramu ve arkadaşları tek besleyici kullanılması sonucunda parçada çekinti hatalarının oluştuğunu tespit etmişlerdir (Şekil 3.5a). İki besleyici kullanılarak gerçekleştirdikleri tasarımda çekinti hatalarının ihmal edilebilir seviyede olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 3.5b). Bu üç farklı tasarım içinden kırıcı maça kullanılarak gerçekleştirilen tasarımın döküm verimi en yüksek, çekinti değerinin en düşük olduğu sonucuna varmışlardır (Şekil 3.6). Ultrasonik muayene yöntemi ile dökülen parçalar kontrol edilmiştir ve benzeşim sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir. Benzeşim çalışmaları ile deneysel çalışmaların uyumlu olduğu belirtilmiştir (Ramu ve diğer., 2012).



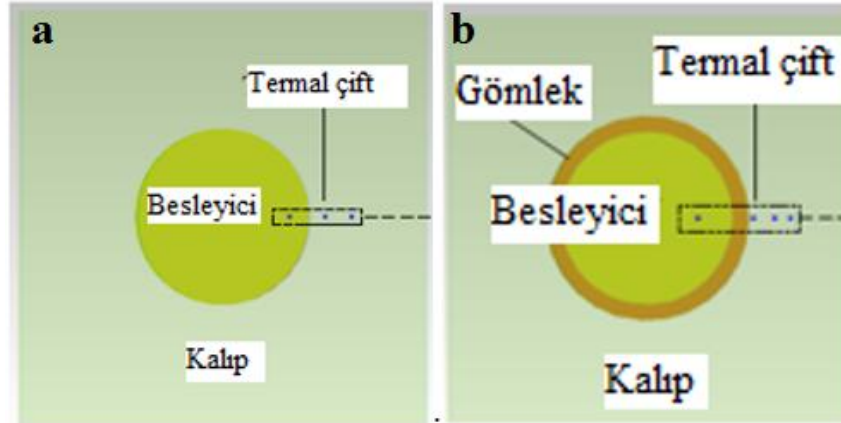
Şekil 3.5 a) Tek besleyici kullanılarak gerçekleştirilen benzeşim çalışmasında çekinti hatası görülen bölgeler, b) İki besleyici kullanılan benzeşim çalışmasında çekinti bölgeleri (Ramu ve diğer., 2012)



Kırıcı Maça

Şekil 3.6 Kırıcı maça kullanılarak yapılan tasarım (Ramu ve diğer., 2012)

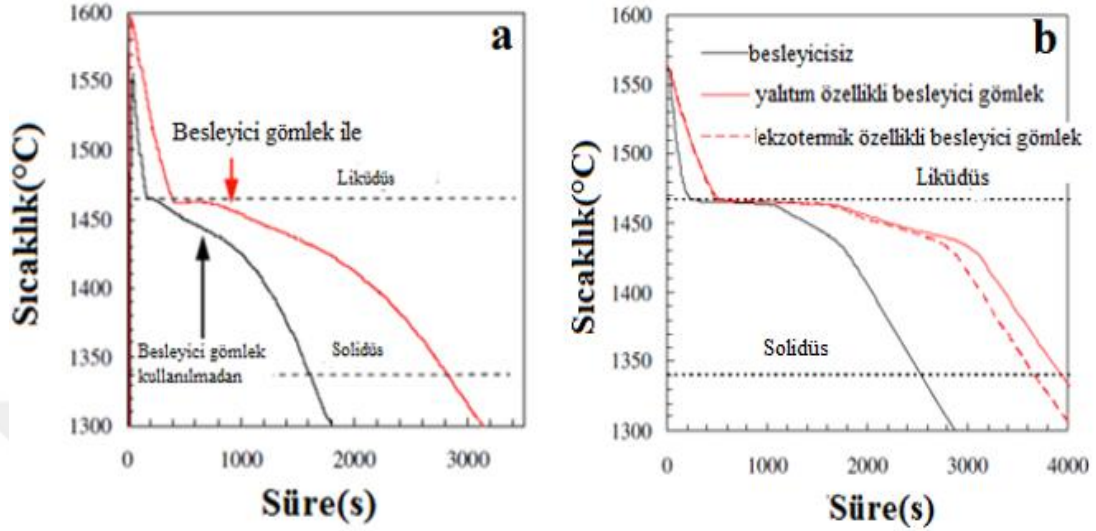
Hardin ve diğer., (2013) besleyici gömleklerin termofiziksel özelliklerini belirlemek için yapılan çalışmaları açıklamışlardır. Gerçekleştirilen çalışmada, besleyici gömleklerin farklı bölgelerinden termal çift yardımıyla sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Araştırmacılar referans dökümü kum besleyici kullanılarak yapılan döküm çalışması olduğunu belirtmişlerdir. Referans dökümün ve termal çiftlerin kalıptaki konumları Şekil 3.7a’da, besleyici gömlekler için sıcaklık ölçümü alınan bölgeler Şekil 3.7b’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 a) Referans dökümün üst görünüşü, b) Besleyici gömlek kullanılan dökümlerde termal çiftlerin kalıp içindeki pozisyonu (Hardin ve diğer., 2013).

Döküm çalışmalarında; metalin sıcaklığını ölçmek için B-tipi termal çift, kalıp kumundan sıcaklık verileri almak için K-tipi termal çift kullanılmıştır. Sıcaklık-süre grafikleri çizilerek referans dökümün, ekzotermik ve yalıtım özellikli besleyici gömleklerin soğuma eğrisi karşılaştırılmıştır (Şekil 3.8b) (Hardin ve diğer., 2013). Döküm çalışmalarında ekzotermik ve yalıtım özellikli besleyici gömlekler

kullanılmıştır ve döküm alaşımı AISI 1040'dır. Kalıp kumu olarak %1,25 pepset bağlayıcılı silis kumu kullanılmıştır (Hardin ve diğer., 2013).



Şekil 3.8 a) Sıvı metalin soğuma eğrisi, b) Farklı besleyici gömleklerin kullanılması sonucunda sıvı metalin soğuma eğrisi (Hardin ve diğer., 2013)

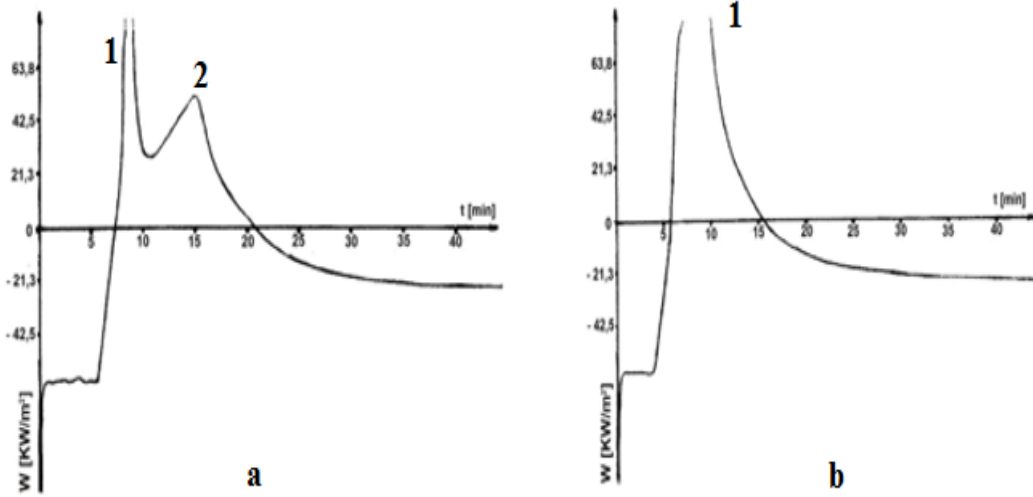
Besleyici gömlek kullanılmadan, ekzotermik ve yalıtım esaslı besleyici gömlek kullanılan üç farklı tasarım için benzeşim sonuçlarına bakılarak besleyicilerin çekinti görüntüleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde döküm parçası ile lunkerin bitiş noktası arasındaki mesafenin yalıtım esaslı gömlek kullanılan çalışmada en küçük olduğu belirlenmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmalara ek olarak araştırmacılar, döküm tasarımında kullanılan ekzotermik ve yalıtım özellikli besleyici gömleklerin küp ve levha şeklindeki döküm parçalarının verimine etkisini incelemiştir. Ekzotermik ve yalıtım özellikli besleyici gömleklerin işlevi karşılaştırılmıştır. Besleyici kullanılmadan gerçekleştirilen uygulamalarda küp dökümler için döküm verimi %45 iken, plaka dökümler için döküm verimi %80 civarında olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar, küp ve plaka parçalarda döküm veriminin farklı olmasının nedenini küp dökümün daha yüksek modüle sahip olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ekzotermik ve yalıtım özellikli besleyici gömlekler ile gerçekleştirilen döküm çalışmalarının verimlilik değerleri birbirine yakın olduğu sonucuna varılmıştır (Hardin ve diğer., 2013).

Lipowska ve diğer., (2010) yalıtım ve ısı verme özelliğine sahip ekzotermik

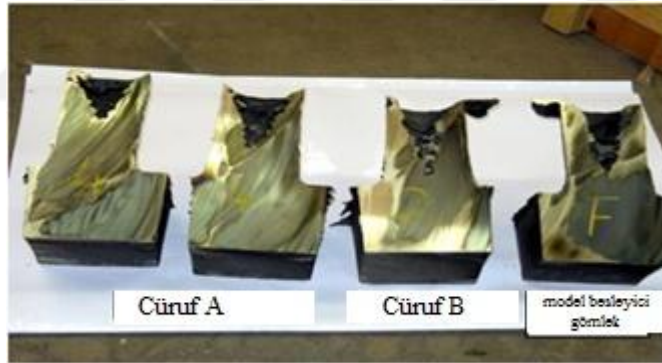
gömlek elde etmek için çalışmalar yapmışlardır. Deneysel çalışmalarında ham madde olarak 2 tür alüminyum cüruf kullanılmıştır. Bunlar; Cüruf A olarak adlandırılan alüminyum talaşının ergitilmesinde elde edilen cüruf ve Cüruf B olarak adlandırılan içecek kutularından elde edilen alüminyumun ergitilmesinden elde edilen cüruftur. Cürufların kimyasal bileşimleri birbirinden farklı olmakla birlikte en belirgin farklılığın metalik alüminyum olduğu belirtilmiştir. Cüruf A'nın içerdiği metalik alüminyum miktarının cüruf B bileşiminde bulunan metalik alüminyum miktarından %7 daha fazladır. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere farklı bileşimlerde hazırlanan çamur karışımların bileşiminde alüminyum cürufu, silis kumu, mineral yün, bağlayıcılar ve artık kağıt bulunmaktadır. Hazırlanan çamur karışımlarının bileşiminde %40 oranında alüminyum cüruf sabit olarak alınmakta olup diğer bileşenlerin miktarları farklılık içermektedir. Cürufun içeriğinde bulunan metalik alüminyum ekzotermik reaksiyon kaynağı olarak kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalar için yüksekliği ve çapı birbirini eşit olan 50 mm boyutunda silindirik numuneler çamur karışımlarının filtre edilmesiyle elde edilmiştir. Farklı çamur karışımlarından elde edilen numunelerden ısı kaybı-süre grafikleri üzerinden ekzotermik pikler yorumlanmıştır (Şekil 3.9) (Lipowska ve diğer., 2010).

Cüruf A ile üretilen numunede birbirini takip eden ısı kayıpları görülmüştür. 1 numaralı eğri 2. numaralı eğriye göre daha kısa sürede ve daha büyük değerlere erişmektedir (Şekil 3.9a). Besleyici gömleğin karışımında bulunan metalik alüminyumun metal oksit bileşeni ile reaksiyona girmesi sonucunda 1 numaralı eğri görülmektedir. Yazarlar Şekil 3.9a'da gösterilen 2 numaralı eğrinin 1 numaralı eğriye göre daha düşük değerlerde olmasını besleyici gömleğin karışımında bulunan metalik alüminyumun havadaki oksijenle reaksiyona girmesine dayandırmaktadır. Cüruf B ile üretilen numunelerde yüksek bir ekzotermik eğri görülmektedir (Şekil 3.9b). Farklı cüruf katkıları ile hazırlanan besleyici gömleklerin ekzotermik ve yalıtım özellikleri yapılan döküm çalışmaları ile irdelenmiştir. Yazarlar sonuç olarak farklı cüruf katkıları ile üretilen besleyici gömleklerin döküm parçası ile etkileşime girmediğini belirtmişlerdir. Cüruf A ve Cüruf B besleyici gömlekler kullanılan deneysel çalışmalar sonucunda döküm parçalarının hatasız olduğu belirtilmiştir. Pratikte kullanılan besleyici gömlekler ile Cüruf A ve Cüruf B ile üretilen besleyici

gömlükler kıyaslandığında her iki besleyici gömleğin iyi ekzotermik ve yalıtım özellikleri göstermekte olduğu belirtilmiştir (Lipowska ve diğer., 2010).



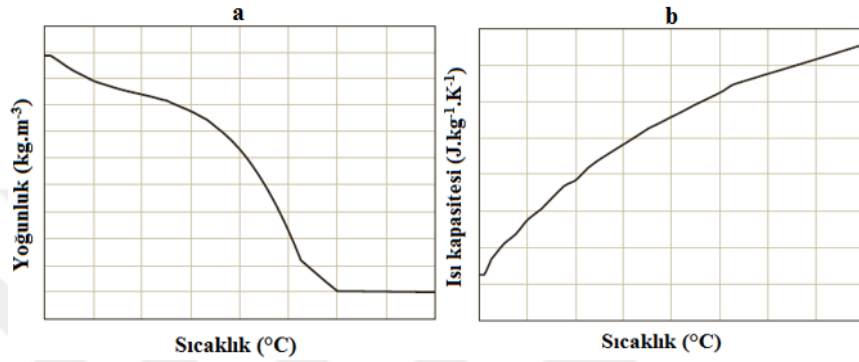
Şekil 3.9 a) Cüruf A ile üretilen besleyici gömleğin ısı kaybı-süre grafiği, b) Cüruf B ile üretilen besleyici gömleğin ısı kaybı-süre grafiği (Lipowska ve diğer., 2010)



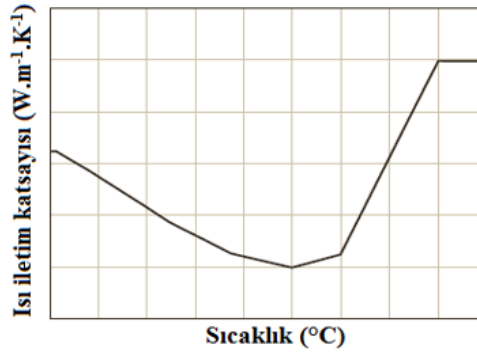
Şekil 3.10 Farklı besleyici gömlükler kullanılarak dökülen parçaların görüntüleri (Lipowska ve diğer., 2010)

Midea ve diğer., (2007) ekzotermik besleyici gömlüklerin termo-fiziksel özelliklerini belirlemişlerdir ve bu özelliklerin sıcaklıkla değişimini incelemişlerdir. Besleyici gömlüklerin termo-fiziksel özellikleri yoğunluk, ısı iletim katsayısı ve ısı kapasitesi olarak belirtilmiştir. Yoğunluğun sıcaklıkla değişimi push rod dilatometre ile yapılmıştır. Sıcaklığın artmasıyla yoğunluğun ilk başta azaldığı ve artan sıcaklıkla sabit kaldığı Şekil 3.11a’da görülmektedir. Isı kapasitesinin sıcaklıkla değişimi DSC analizi yapılarak incelenmiştir (Şekil 3.11b). Sıcaklığın artması ile ısı kapasitesi

parabolik olarak artmaktadır. Lazer flash yöntemi ile besleyici gömleğin ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi incelenmiştir. Isı iletim katsayısı değerinin sıcaklık ile ilişkisi, yoğunluk ve ısı kapasitesinin sıcaklık ile olan ilişkisinden farklı olduğu grafiklerden anlaşılmaktadır. Isı iletim katsayısı-sıcaklık grafiği incelendiğinde, ısı iletim katsayısı sıcaklık artışı ile ilk başta azalmaktadır, ancak sıcaklığın daha da artmasıyla ısı iletim katsayısı artmaktadır (Şekil 3.12).



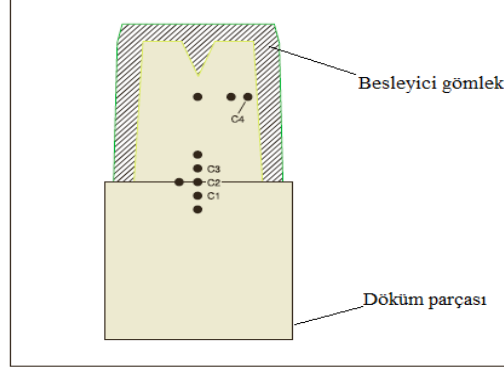
Şekil 3.11 a) Besleyici gömleğin yoğunluk-sıcaklık grafiği, b) Besleyici gömleğin ısı kapasitesi-sıcaklık grafiği



Şekil 3.12 Besleyici gömleğin ısı iletim katsayısı-sıcaklık grafiği

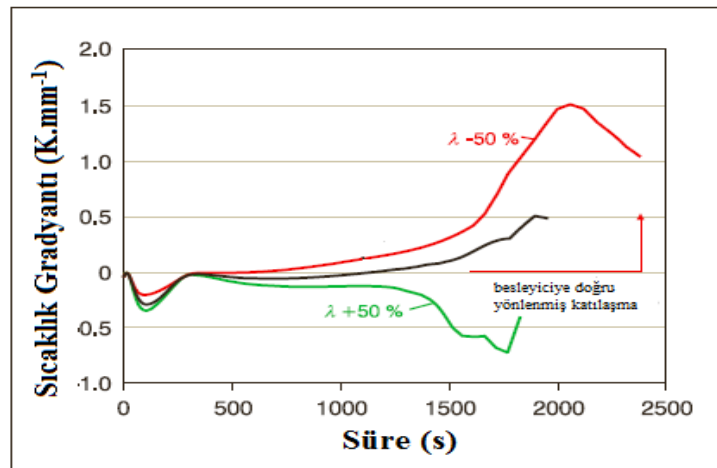
Yapılan bu çalışmada besleyici gömlek yoğunluğunun, ısı iletim katsayısının ve ısı kapasitesinin artış veya azalması durumunda metalin katılma süresinin nasıl değiştiği irdelenmiştir. Bu kapsamda döküm çalışmaları yapılmıştır. Döküm çalışmalarında 2 farklı ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılmıştır. İlk çalışmada kullanılan besleyici gömleklerin termo-fiziksel özellikleri değiştirilmemiş olup, ikinci çalışmada kullanılan besleyici gömleklerin termo-fiziksel özellikleri değiştirilmiştir. GS-52 alaşımlı boyutlarında küp şeklinde parçaların dökümleri yapılmıştır. Döküm kumu olarak furan esaslı silis kumu kullanılmıştır. Termal çiftler

besleyici-metal arası, besleyici kenarı, besleyici ortası ve besleyici altı olmak üzere farklı bölgelere yerleştirilmiştir ve sıcaklıklar ölçülmüştür (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 Katılaşma davranışının incelenmesi için sıcaklık ölçümü alınan bölgeler

Şekil 3.14'te gösterilen C1 ve C2 bölgelerinden ölçülen sıcaklık değerlerinden yararlanılarak Şekil 3.14'te gösterilen sıcaklık gradyanının süreye bağlı değişim grafiği çizilmiştir. Şekil 3.14'te görüldüğü gibi besleyici gömleğin ısı iletim katsayısının azaltılması sonucunda termal gradyanın arttığı görülmektedir. Sıcaklık gradyanının artması sonucunda yönlü katılaşma teorik olarak sağlanacaktır ve döküm parçasında hata oluşumu önlenecektir. Özellikleri değiştirilmeyen besleyici gömleğin ısı iletim katsayısının %50 artması durumunda döküm parçasında boşluk hatalarının görüleceği belirtilmiştir.



Şekil 3.14 Katılaşma sırasında besleyici gömleğin ısı iletim katsayısının C1 ve C2 bölgelerinden hesaplanan sıcaklık gradyanına etkisi

Besleyici gömleklerin termo-fiziksel özellikleri değerlendirildiğinde çıkan sonuç besleyici gömleklerin ısı iletim katsayı değeri ve enerji miktarları diğer özelliklere oranla daha çok besleme performansını değiştirmektedir (Midea ve diğer., 2007).

Thomas ve diğer., (2014) benzeşim programında kullanılan yalıtım ve ekzotermik esaslı besleyici gömleklerin ısı iletim katsayısı, yoğunluk, ısı kapasitesi gibi termo-fiziksel özelliklerini incelemiştir. Yapılan çalışmada deneme dökümleri yapılmıştır ve döküm sırasında sıcaklık ölçümleri termal çiftler yardımıyla döküm parçası, besleyici gömlek, kalıp kumundan olmak üzere 3 farklı bölgeden ölçülmüştür. Döküm sırasında sıcaklık ölçümü için B-tipi ve K-tipi termal çiftler kullanılmıştır. Kuvars tüple korunan B-tipi termal çiftler döküm parçasına ve besleyici gömleğe, K-tipi termal çift döküm kumuna yerleştirilmiştir. Döküm alaşımı AISI 1020 karbon çeliğidir ve kalıp kumu olarak silis kumu kullanılmıştır. Yapılan çalışmada benzeşim programının veri tabanında bulunan çelik ve kalıp kumu özelliklerini belirlemek için kontrol döküm olarak adlandırılan ve besleyici gömlek yerine kum besleyici ile hazırlanan kalıp tasarımı kullanılmıştır. Metalin ergimesi sırasında sıcaklığı artmasıyla besleyici gömleklerin ısı iletim katsayılarının arttığı ve yoğunluklarının parabolik olarak azaldığı belirlenmiştir. Sıcaklık-süre grafikleri incelendiğinde kontrol dökümlere kıyasla besleyici gömlekler ile yapılan dökümlerde ölçülen sıcaklıkların daha yüksek olduğu ve kontrol dökümlerin daha hızlı soğuma davranışı gösterdiği belirlenmiştir. Kontrol dökümler için sıvı metalin benzeşim ve deneysel sıcaklıkların karşılaştırılması sonucunda deneysel olarak ölçülen sıcaklıkların benzeşim çalışmalarından alınan sıcaklıklara kıyasla daha yüksek değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca benzeşim çalışmalarının daha hızlı soğuma davranışı gösterdikleri belirlenmiştir (Thomas ve diğer., 2014).

Yapılan bu çalışmada besleyici gömleklerin termo-fiziksel özellikleri sıcaklık ile ilişkilendirilerek irdelenmiştir. Besleyici gömlek yoğunluk değerinin oda sıcaklığında ölçülen yoğunluk değeri olduğunu ancak sıcaklığın artması ile besleyici gömlek kompozisyonunda bulunan malzemelerin etkileşimi sonucunda yoğunluk değerinin azalacağını bilmesi gerektiği üzerinde vurgu yapılmıştır. Besleyici gömleklerin ısı kapasitesinin yoğunluk ve ısı iletim katsayısına göre benzeşim

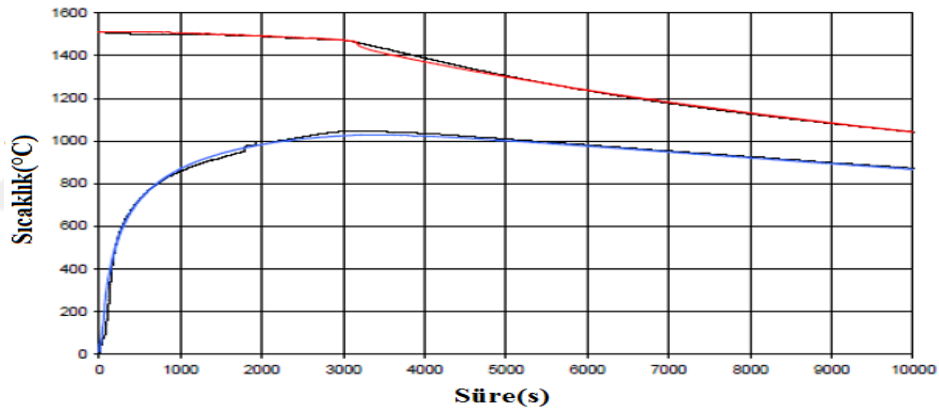
sonuçları üzerindeki etkisinin az olduğu belirtilmiştir. Deneysel çalışmalarda ölçülen sıcaklıkların benzeşim programı ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Sıcaklıkların uyumlu olması sonucunda besleyici gömlekler için ısı iletim katsayısının önemli olduğu vurgulanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan bütün besleyici gömleklerin termo-fiziksel özelliklerini belirlemek için termal difüzyivite testi yapılmıştır. Farklı besleyici gömleklerin yanma sıcaklıkları, yanma süreleri, ısı değerleri hesaplanmıştır. Besleyici gömleklerin farklı bölgelerinden sıcaklıklar ölçülmüştür. Ayrıca döküm kumundan da sıcaklıklar ölçülmüştür. Benzeşim çalışmalarında döküm kumunun sıcaklıkları ile döküm uygulamalarındaki sıcaklıkların arasında uyumsuzlukların olduğu belirlenmiştir. Yazarlara göre döküm kumunun gaz geçirgenlik özelliğinin ve ısı iletim katsayısının bu uyumsuzluğun nedeni olarak öne sürülmektedir. Ek olarak bu uyumsuzlukların deneysel çalışmalarda sıcaklık ölçümü sırasında termal çiftin başlangıçta belirlenen konumda olmamasında kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Yapılan bu çalışma göstermektedir ki endüstride kullanılan besleyici gömleklerin termo-fiziksel özellikleri belirlenerek benzeşim programına tanıtılması sonucunda benzeşim uygulamalarının doğruluğu arttırabilir. Besleyici gömleklerin termo-fiziksel özelliklerinin belirlenmesi sonucunda yapılan benzeşim çalışmaları ile deneysel uygulamaların birbiri ile uyumu artacaktır ve olası hatalı dökümlerin önüne geçilmesi söz konusu olacaktır (Thomas ve diğer., 2014).

Ignaszak ve diğer., (2005) besleyici gömleklerin ekzotermik ve yalıtım özelliklerine etki eden termofiziksel parametreleri belirlemişlerdir. Döküm sırasında kalıp içerisine yerleştirilen termal çiftler ile besleyici gömleğin farklı bölgelerinden sıcaklıklar ölçülmüştür (Şekil 3.15). Kalıbın farklı bölgeleri (döküm kalıp ara yüzeyinden 30 mm döküm parçasına doğru) delinerek PtRh-Pt termalçift ile sıcaklık ölçümleri alınmıştır. 2 adet K-tipi termal çift besleyici kalıp ara yüzeyine yerleştirilmiştir. Deneysel ve benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda L2 ve L5 olarak adlandırılan 2 farklı besleyici gömlek kullanılmıştır. 175 mm çapında 900 mm yüksekliğinde 6 adet çelik silindirin dökümü gerçekleştirilmiştir. Bir adet çelik silindirin kalıp tasarımı referans döküm olarak adlandırılmıştır. Referans dökümün kalıp tasarımında kum besleyici bulunmaktadır. Döküm çalışmalarında furan esaslı kalıp kumu kullanılmıştır. Diğer

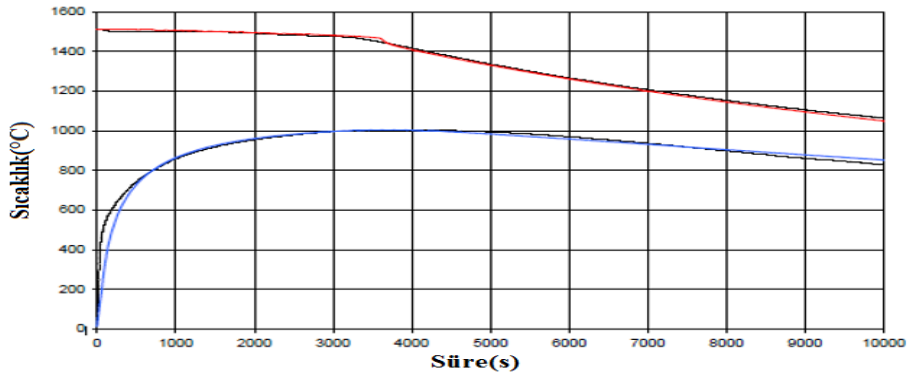
beş adet çelik döküm çalışması besleyici gömleklerin ekzotermik ve yalıtım özelliklerinin belirlenmesi için yapılmıştır. Besleyici gömlekler 25 mm et kalınlığına sahiptir. Ignaszak ve arkadaşları sonuç olarak döküm sırasında ölçülen sıcaklıklar ile benzeşim programından alınan sıcaklıkların uyumlu olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 3.16 ve Şekil 3.17) (Ignaszak ve diğer., 2005).



Şekil 3.15 Termal çiftlerin yerleştirilmesi (Ignaszak ve diğer., 2005)



Şekil 3.16 L2 olarak adlandırılan besleyici gömleğin deneysel ve benzeşim çalışmalarında ölçülen sıcaklıkların süreye bağlı değişimi (Ignaszak ve diğer., 2005)



Şekil 3.17 L5 olarak adlandırılan besleyici gömleğin deneysel ve benzeşim çalışmalarında ölçülen sıcaklıkların süreye bağlı değişimi (Ignaszak ve diğer., 2005)

Gwizdz ve diğeri., (2010) MagmaSoft benzeşim programı kullanarak GS20Mn5 alaşımlı çeliğin katılma davranışını incelemişlerdir. Yazarlar hata içermeyen mekanik özellikleri standartlar içerisinde olan parça üretmeyi hedeflemişlerdir. İlk olarak benzeşim çalışmaları sonucunda parça içinde sıcak noktalar tespit edilmiştir. Belirlenen sıcak noktaların ekzotermik besleyici gömlek ve çil kullanılmasıyla besleyici içine yönlendirilmesi sağlanmıştır. Yapılan iyileştirmelerin ardından alaşımın dökümü gerçekleştirilmiştir. Döküm parçasının kalitesi yapılan mikroyapı incelemeleri ve mekanik test sonuçları doğrultusunda değerlendirilmiştir.

Narayan ve diğeri., (2013) karbon çeliklerinde kullanılan besleyici gömleklerin etkinliğini arttırmayı amaçlamışlardır. Döküm denemelerinde besleyici gömleklerin boyutları ve adetleri değiştirilerek döküm parçasının çekinti seviyesini X radyografi yöntemi ile belirlemişlerdir. Sonuç olarak yapılan farklı kalıp tasarımları ile besleyici gömleklerin etkinliği artırılarak döküm parçasının çekinti seviyesi azaltılmıştır ve döküm parçasının mikroyapı görüntülerinde üniform yapıların görüldüğü belirtilmiştir.

Sandell (2008) hatalı olarak üretilen düşük alaşımlı karbon çelik mil parçasında çekinti oluşumunu azaltmak amacıyla ekzotermik besleyici kullanımının etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmada, kum besleyici ve ekzotermik besleyici kullanımının termal gradyanta etkisi vurgulanarak çekinti oluşumu üzerinde açıklamalar yapılmıştır. Kalıp tasarımında ekzotermik besleyici kullanılarak dökülen parçanın çekinti seviyesinin kum besleyici kullanılarak dökülen parçanın çekinti seviyesinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Çekinti seviyelerini belirlemede X ışınları kontrol yöntemi kullanılmıştır. Sonuç olarak besleyici gömlek kullanımı sonucunda merkez çekinti hatalarının önlenildiği belirtilmiştir.

Sola (2014) döküm öncesi ve döküm sonrası ekzotermik besleyici gömleklerin kimyasal bileşenlerini X ışınları kırınım desenleri ile irdelenmiştir. Döküm alaşımı CF-8M paslanmaz çeliktir. Döküm sıcaklığı 1540°C olup kum kalıba döküm yapılmıştır. Döküm çalışmalarında seramik fiber ve mineral yün esaslı iki farklı besleyici gömlek kullanılmıştır. Döküm öncesi her iki ekzotermik besleyici gömlek

için yapılan X ışınları kırınım desenleri incelendiğinde metalik alüminyum fazı tespit edilmiştir. Döküm sonrası her iki besleyici gömleğin X ışınları kırınım desenlerinde Al_2O_3 fazı belirlenmiştir. Ancak mineral yün esaslı besleyici gömleğin X ışınları kırınım desenlerinde Al_2O_3 fazının yanısıra Fe ve Mn elementleri tespit edilmiştir. Mineral yün esaslı ekzotermik besleyici gömlek ile sıvı metalin teması sonucunda mineral yünün ergidiği belirtilmiştir. Yazarlar bu etkileşim sonucunda ergiyik metalin ekzotermik besleyici gömleğin yapısına penetre olduğu ve X ışınları kırınım desenlerinde tespit edilen Mn ve Fe elementlerinin bu nedenlerden dolayı görüldüğünü belirtmişlerdir (Sola, 2014).

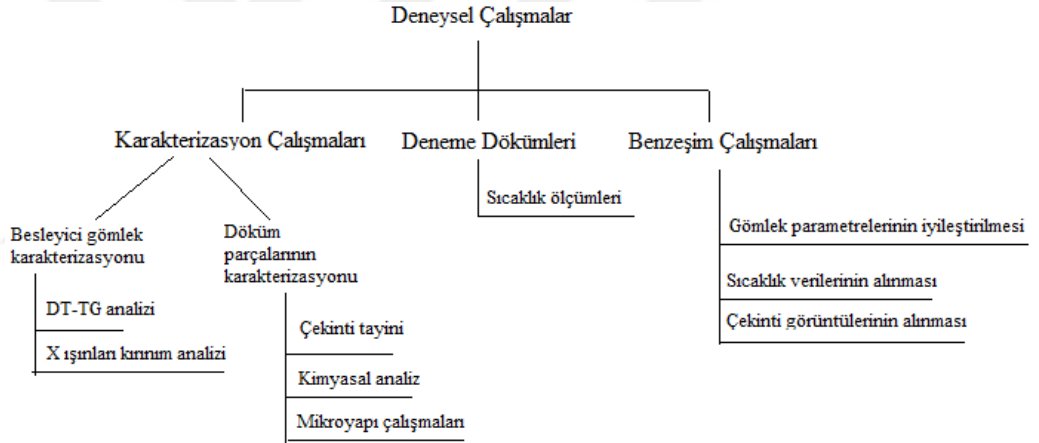
Literatür çalışmaları incelendiğinde deneme dökümlerinde kullanılan besleyici gömlek özellikleri ile benzeşim çalışmalarında kayıtlı besleyici gömlek özelliklerinin uyumunu irdeleyen çalışmaların azlığı dikkat çekmektedir. Ayrıca yapılan çalışmalarda döküm alaşımları genel olarak küresel grafitli dökme demir ve karbon çelikleridir. Besleyici gömleklerin çelik alaşımları ile etkileşimi üzerine yapılan çalışmaların çok az olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada literatür çalışmalarında belirtilen yöntemler incelenerek farklı çelik alaşımlarında kullanılan besleyici gömlek özellikleri ile benzeşim çalışmalarında seçilen besleyici gömlek özelliklerinin uyumluluğunun artırılması amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır.

BÖLÜM DÖRT

MALZEME VE YÖNTEM

Döküm benzeşim programına besleyici gömleklerin tanıtılması veya mevcut verilerin iyileştirilmesi için özelliklerinin karakterize edilmesi ve uygulamalı olarak irdelenmesi gerekmektedir. Besleyici gömleklerin işlevinin optimizasyonu için gömlek karakterizasyonu, deneme dökümleri, dökülen metalin karakterizasyonu ve benzeşim çalışmaları yapılmıştır. Deneysel çalışmaların akış şeması Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Deneme dökümleri için, parça ve besleyici boyutlarının belirlenmesi ile kalıp tasarımı yapılmıştır. Deneme dökümlerinde elde edilen veriler, gömleklerin karakterizasyon verileri ile harmanlanarak benzeşim programı parametreleri iyileştirilmiştir.



Şekil 4.1 Deneysel çalışmaların akış şeması

Karakterizasyon çalışmaları kapsamındaki DT(diferansiyel termal)-TG(termal gravimetrik) analizleri, X ışınları kırınım analizleri, numune hazırlama işlemleri, optik mikroskop incelemeleri ve EDS(elektron dağılım spektrometresi) çalışmaları ile döküm benzeşim çalışmaları Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarları’nda, gama radyografi çekinti tayini Erma Teknik Şirketinde yapılmıştır. Benzeşim çalışmalarında Medöksan Metal Döküm Sanayi ve Tic. Ltd. Şti’den destek alınmıştır. Düşük alaşımlı karbon çeliği, östenitik mangan çeliği ve östenitik paslanmaz çelik deneme dökümleri Derman Döküm Yedek Parça İmalat Ltd. ve Pınar Döküm Sanayi ve Ticaret A.Ş.’de yapılmıştır. Optik emsiyon

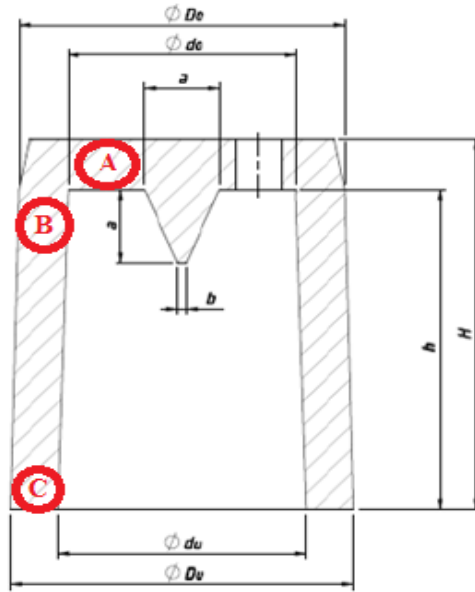
spektrometresi çalışmaları Celal Bayar Üniversitesi Deneysel Fen Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezinde yapılmıştır.

4.1 Karakterizasyon Çalışmaları

4.1.1 Besleyici Gömleklerin Karakterizasyonu

4.1.1.1 Numune Hazırlama

Çukurova Kimya Endüstrisi A.Ş. tarafından ön şekillendirilmiş olarak vakum sistemi yöntemi ile orta ve yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yalıtım ve ekzotermik özellikli bileşenlerden oluşan besleyici gömleklerin, karışımında bulunan malzemelerin yoğunlukları birbirinden farklıdır. Yoğunlukları farklı olan malzemelerin yapı içinde nasıl dağıldığı ve gömleklerin ısıl davranışına etkisi DT-TG eğrileri incelenerek yorumlanabilir ve besleyici gömleğin homojenliği değerlendirilebilir. Bu amaçla Şekil 4.2’de gösterilen A, B ve C bölgelerinden besleyici gömlek numuneleri hazırlanmıştır. Döküm öncesi ve döküm sonrası besleyici gömleklerinden numuneler çıkarılarak öğütülmüştür ve X ışınları kırınım desenlerinin incelenmesi için kullanılmıştır.



Şekil 4.2 DT-TG analizi için numune çıkarılan besleyici bölgeleri

4.1.1.2 DT-TG Analizi

Besleyici gömleklerin sıcaklık artışına bağlı olarak yapısında meydana gelen reaksiyonların türü, reaksiyonların başlama-bitiş sıcaklıkları ve süreleri, gerçekleşen reaksiyonlara bağlı olarak besleyici gömlek kompozisyonunda meydana gelen ağırlık değişimlerini belirlemek amacıyla DT-TG analizi yapılmıştır. Orta ve yüksek ekzotermik özellikliğe sahip besleyici gömleklerin DT-TG analizleri Shimadzu DTG 60H cihazında yapılmıştır. Besleyici gömlek numuneleri 25°C-1200°C arasında azot atmosferi altında dakikada 30 °C artışla tarama yapılmıştır.

4.1.1.3 X Işınlari Kırınım Desenleri

Reaksiyon öncesi ve reaksiyon sonrası ortaya çıkan fazları inceleyerek besleyici gömleklerin ekzotermik karakteristiğini yansıtan alüminotermik reaksiyonun gerçekleşip gerçekleşmediği yorumlamak amacıyla X ışınları kırınım analizi yapılmıştır. Döküm öncesi ve döküm sonrası besleyici gömleklerden numuneler alınmıştır. Alınan numuneler öğütülerek toz haline getirilmiştir. Toz partiküllerin X ışınları kırınım analizi Cu K α ışınması ile Rigaku D Max 2200 cihazı kullanılarak yapılmıştır. Yapılan analizlerde tarama hızı 4 derece/dak olarak belirlenmiştir.

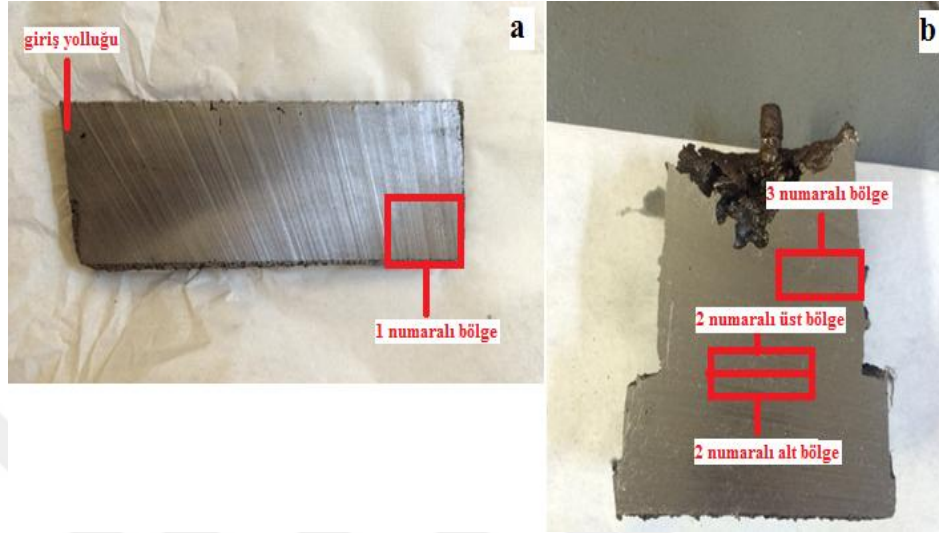
4.1.2 Döküm Parçalarının Karakterizasyonu

4.1.2.1 Numune Hazırlama

Döküm parçasının besleyiciye en uzak bölgesinden ve besleyicinin farklı bölgelerinden numuneler çıkarılarak sırasıyla zımparalama ve parlatma yapılmıştır (Şekil 4.3). Zımparalama işlemlerinde SiC esaslı 80, 200, 400, 800, 1000, 1200, 2000 numaralı zımparalar kullanılmıştır. Zımparalama işleminin ardından numuneler parlatma işlemine hazır hale getirilmiştir. Parlatma işlemlerinde 1 µm elmas pasta kullanılmıştır.

Döküm parçalarının kalın olması kesme işlemlerini zorlaştırmıştır. Kesme işlemlerinde yaşanan sıkıntılardan dolayı AISI 4130 alaşımlı 2. döküm

denemesinde üretilen döküm parçalarının 1 numaralı bölgeler çıkarılamamıştır. Ayrıca paslanmaz ve östenitik mangan çelik alaşımlı döküm parçalarının kesme işlemleri tamamlanamamıştır.



Şekil 4.3 a) Parçadan alınan bölge, b) Besleyici metalinden alınan bölgeler

4.1.2.2 Mikroyapı İncelemeleri

Çelik dökümlerde ekzotermik besleyici gömleklerin mikroyapı üzerine etkilerini incelemek amacıyla Şekil 4.3'te gösterilen 1, 2, 3 numaralı bölgelerden mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Mikroyapı görüntüleri karşılaştırılarak besleyici bölgeleri ve döküm parçasındaki çekinti boşluğu gibi hataların nitel incelemesi yapılmıştır. Mikroyapı görüntüleri OLYMPUS GX51 marka cihaz ile çekilmiştir.

4.1.2.3 Kimyasal Analizler

Deneme dökümleri öncesinde indüksiyon ocağında ergitilen metalden alınan numuneler çalışmaların yapıldığı dökümhanelerdeki optik emisyon spektrometreleri ile analiz edilmiştir. Derman Döküm Ltd.Şti'de GNR-ML300 marka optik emisyon cihazı ile, Pınar Döküm Sanayi ve Ticaret A.Ş.'de bulunan OBLF marka optik emisyon cihazı ile yapılmıştır.

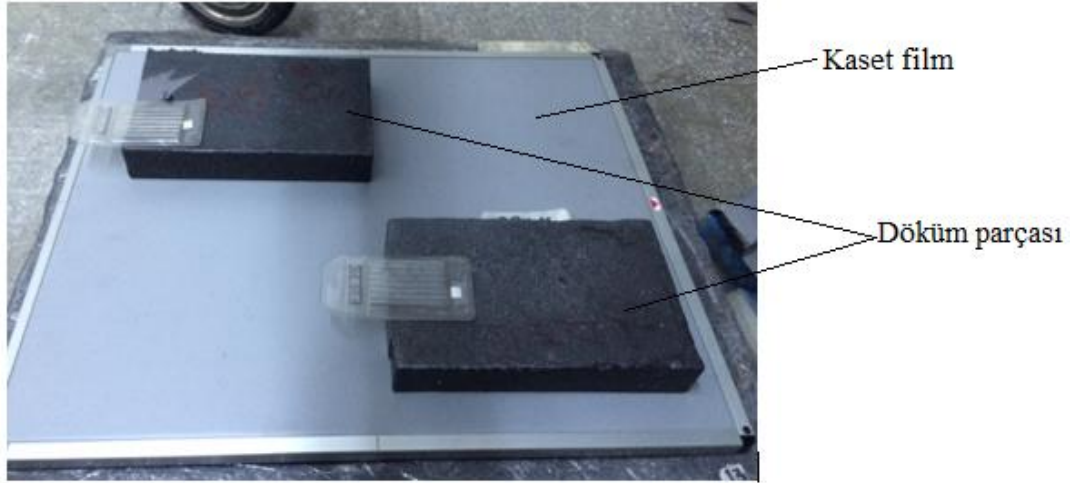
Ayrıca döküm sonrasında döküm parçasından ve besleyici metalden çıkartılan numunelerde (Şekil 4.3) Bruker, Q4 TASMEN marka optik emisyon cihazı kullanılarak tarama yapılmıştır.

Mikroyapı görüntüleri çekilen bölgelerin kimyasal analizleri EDS analizi ile yapılmış ve farklı gömlek bileşimleri kullanılan metaller için karşılaştırılmıştır. Ekzotermik besleyici gömlek karışımının metal üzerinde kimyasal etkisi Şekil 4.3'te belirtilen 3 numaralı bölgeden çıkarılan numunelere EDS analizi yapılarak belirlenmiştir.

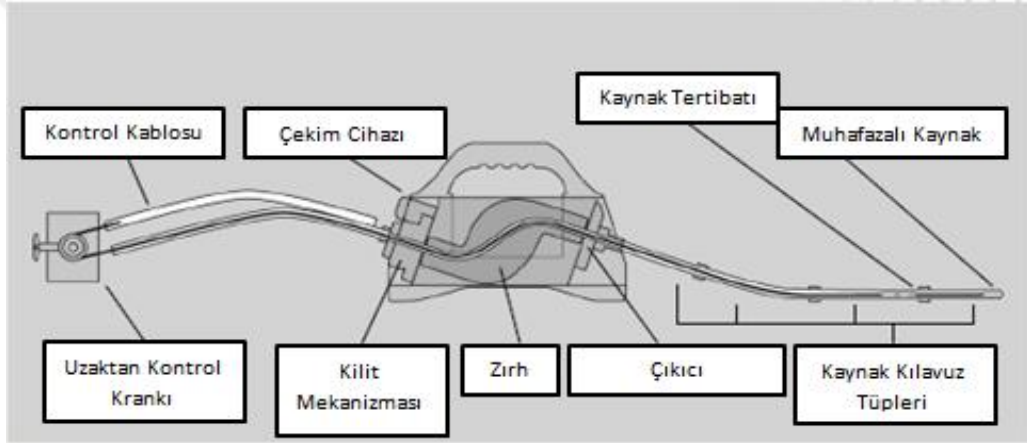
4.1.2.4 Çekinti Tayini

Radyografik muayene, X veya gama ışınları kullanılarak malzeme içindeki süreksizliklerin görüntüsünün bir röntgen filmi üzerine aktarılmasıyla gerçekleştirilen bir tahribatsız muayene yöntemidir. Radyasyon kaynağı ile film arasında muayene edilecek parça yerleştirilir ve ışınların bir kısmı parça tarafından engellenirken bir kısmı da parçayı geçerek filme ulaşır. Parçanın yoğunluğu daha yüksek veya daha kalın kesitinden geçen ışınlar filme daha az ulaşırken daha düşük yoğunluklu veya daha ince kesitlerden daha fazla ışın filme ulaşır. Böylece film üzerinde farklı kontrastlarda bölgeler oluşur. Bu kontrast farklılıkları döküm parçası içerisindeki çekinti bölgelerinin seviyelendirilmesine ve besleyicilerin besleme mesafelerinin karşılaştırılmasına olanak sağlar (EN ISO 5579, 2014). Verilen bu bilgiler doğrultusunda deneme dökümlerinden üretilen parçalarının çekinti seviyelerini ve besleyici gömleklerin besleme mesafelerini incelemek amacıyla EN ISO 5579 standartına göre gama ışınları ile kontrol testleri yapılmıştır.

Gama radyografi deneyleri Şekil 4.4'te gösterildiği kaset tipi film üzerine döküm parçalarının yerleştirilmesi ile kaynak uzaklığı 300 mm olacak şekilde 18 dakika boyunca döküm parçaları üzerine ışınlar gönderilmiştir. Deneyin tamamlanmasının ardından kaset film Kodak Industrex HPC-1 marka cihaza yerleştirilerek bilgisayar ortamında çekinti görüntüleri incelenmiştir. Şekil 4.5'te ışın gönderen düzeneğe ilişkin şematik görüntü verilmektedir.



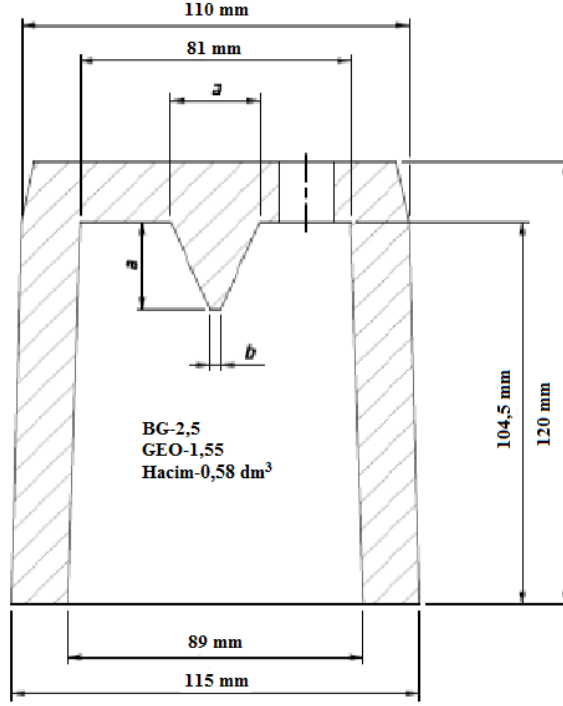
Şekil 4.4 Gama radyografi deneyinde döküm parçalarının yerleştirilmesi



Şekil 4.5 Gama radyografi deneyinde ışın gönderen düzenek

4.2 Deneme Dökümleri

Deneme dökümlerinde düşük alaşımli karbon çeliği olarak Amerikan Demir ve Çelik Entstitüsü standartı AISI 4130, östenitik mangan çeliği olarak Amerikan Malzeme ve Testleri Derneği standartı ASTM-A128M-93A ile ASTM-A128M-93-C ve paslanmaz çelik olarak Döküm Alaşımı standardı ACI CF-8M alaşımı seçilmiştir. Deneme dökümlerindeki kalıp tasarımı benzeşim programı ile belirlenmiştir. Deneme dökümlerinde kullanılan besleyici gömleklerin modül ve boyutları Şekil 4.6'da gösterilmektedir.

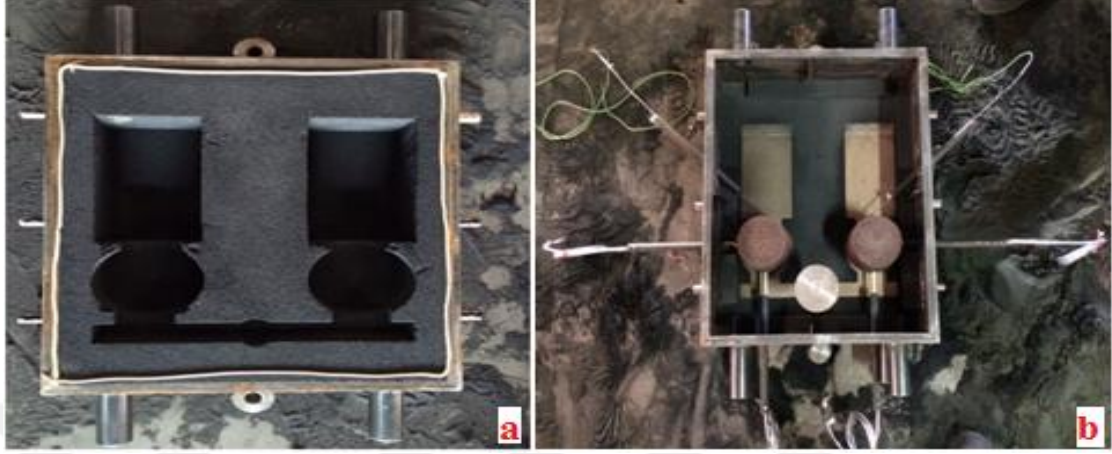


Şekil 4.6 Ekzotermik besleyici gömleklerin geometrik ve modül özellikleri

Düşük alaşımlı çelik ve östenitik mangan çeliği deneme dökümlerinde kalıplamada silis esaslı kalıp kumu ve bağlayıcı olarak furan esaslı reçine kullanılmıştır. Paslanmaz çelik deneme dökümlerinde kalıplamada silis esaslı kalıp kumu ve bağlayıcı olarak alphaset reçine kullanılmıştır. Üst derecede düşey yolluk, ekzotermik besleyici gömlekler ve termal çiftler bulunmaktadır. Alt derecede yatay yolluk ve giriş yollukları ile döküm parçası bulunmaktadır Yapılan tüm döküm denemelerinin kalıplama işlemlerinde model ile ekzotermik besleyici gömleklerin dereceye olan uzaklıkları aynıdır. Alt ve üst derecelerin görünümü Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Döküm çalışmalarında sıcaklık ölçümünün alınması için termal çiftlerin herhangi bir mekanik zorlama sonucunda kırılmasını önlemek amacıyla derecelerin dış ve iç kısımlarında bulunan metalik borular kullanılmıştır.

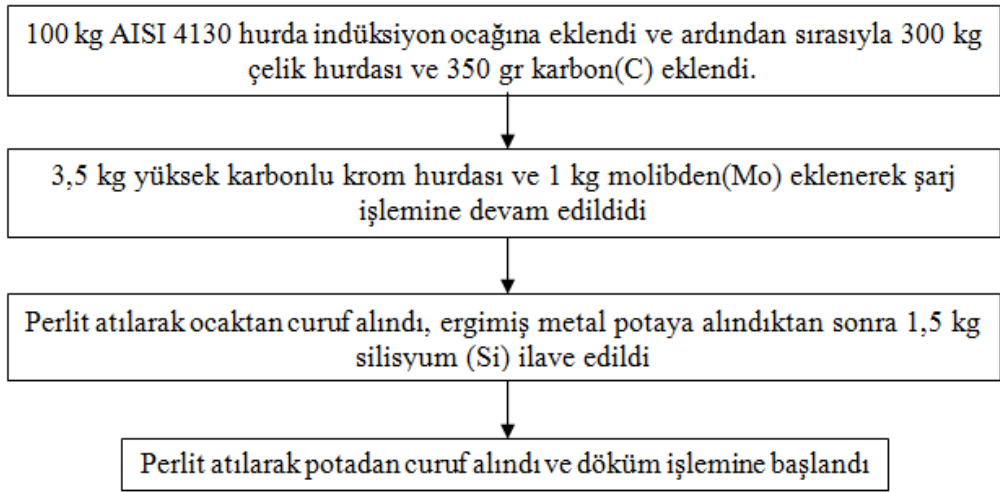
Deneme dökümlerinde sıcaklıklar 3 adet farklı termal çift kullanılarak ölçülmüştür. Sıvı metalden, besleyici gömlek-sıvı metal arayüzeyinden ve besleyici gömleğin dış yüzeyinden sıcaklıklar sırasıyla B-tipi, S-tipi ve K-tipi termal çiftler kullanılarak Datataker DT85 cihazına aktarılmıştır. Saniyede 2 veri olacak şekilde sıcaklıklar ölçülmüştür. Sıvı metalden ölçülen sıcaklıklar “merkez”, besleyici

gömlek-sıvı metal arayüzeyinden ölçülen sıcaklıklar “iç yüzey”, besleyici gömleğin dış yüzeyinden ölçülen sıcaklıklar “dış yüzey” olarak adlandırılmaktadır.

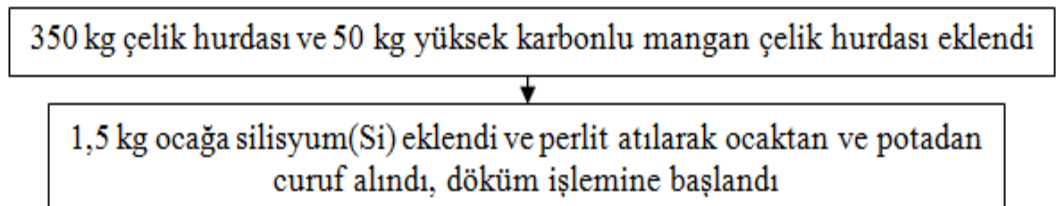


Şekil 4.7 a) Alt derecenin görüntüsü, b) Üst derecenin görüntüsü

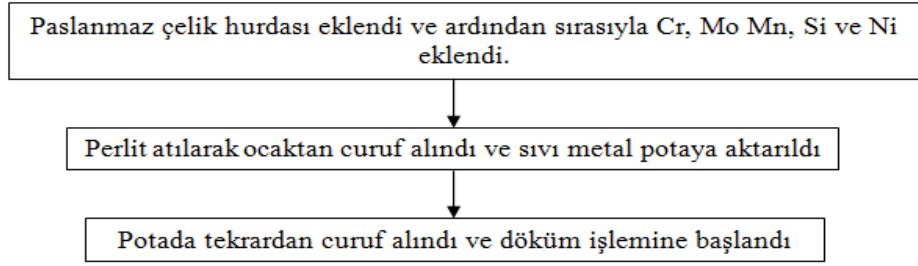
Döküm öncesinde sıvı metallerin hazırlanma aşamaları Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.8 AISI 4130 üretim prosesi akış şeması

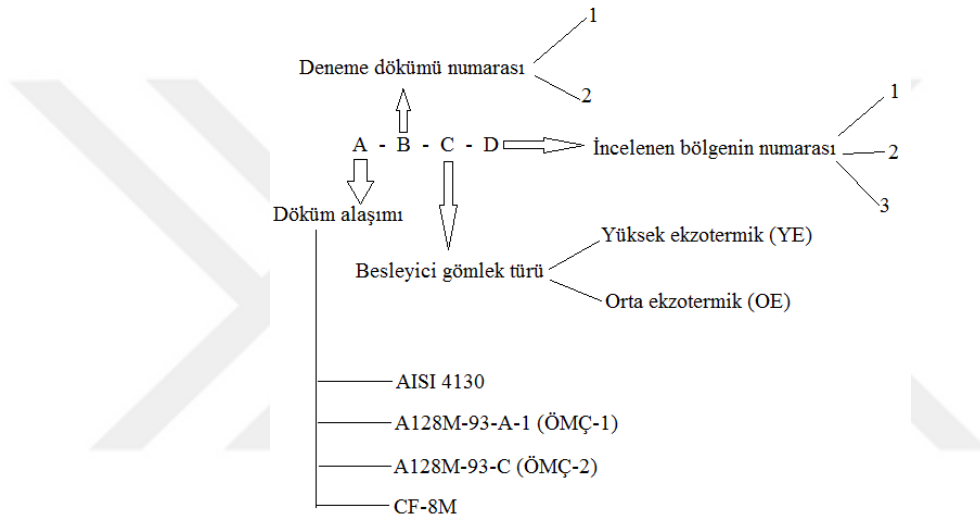


Şekil 4.9 Östenitik mangan çeliği üretim prosesi akış şeması



Şekil 4.10 CF-8M alaşımlı çeliğin üretim prosesi akış şeması

Şekil 4.11’de deneme dökümlerinin ve numunelerinin nasıl isimlendirildiği gösterilmektedir.



Şekil 4.11 Deneme dökümlerinin ve numunelerinin kodlanması

Tablo 4.1’de deneme dökümleri sırasında ölçülen ocak sıcaklıkları ve döküm süreleri, Tablo 4.2’de döküm potasından alınan numunelerin kimyasal analiz sonuçları verilmektedir.

Tablo 4.1 Ocak sıcaklıkları ve döküm süreleri

| Döküm Alaşımı | Ocak sıcaklığı (°C) | Ölçülen döküm süresi (s) |
|----------------------|------------------------|--------------------------|
| AISI 4130-1 | 1655 | 17,78 |
| AISI 4130-2 | 1650 | 17,73 |
| A128M-93-A-1 (ÖMÇ-1) | 1574 | 19,36 |
| A128M-93-C (ÖMÇ-2) | 1570 | 38,12 |
| CF-8M-1 | 1650 | 25,11 |
| CF-8M-2 | 1640 | 17,86 |

Tablo 4.2 Döküm potasından alınan numunelerin kimyasal kompozisyonu

| Alaşım | % ağırlık | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | C | Si | Mn | Cr | Mo | Ni | Al | Ti | S | P |
| AISI 4130-1 | 0,30 | 0,33 | 0,87 | 0,75 | 0,16 | 0,001 | 0,004 | 0,001 | 0,015 | 0,018 |
| AISI 4130-2 | 0,28 | 0,47 | 0,76 | 0,61 | 0,15 | 0,008 | 0,004 | 0,001 | 0,009 | 0,013 |
| A128M-93-A-1 | 1,15 | 0,35 | 10,50 | 0,2 | - | 0,010 | 0,020 | - | 0,010 | 0,022 |
| A128M-93-C | 1,14 | 0,69 | 13,2 | 0,81 | - | 0,139 | 0,006 | - | 0,029 | 0,031 |
| CF-8M-1 | 0,06 | 1,17 | 1,10 | 18,8 | 2,26 | 9,71 | 0,009 | 0,001 | 0,005 | 0,038 |
| CF-8M-2 | 0,04 | 1,10 | 1,09 | 18,8 | 2,24 | 9,61 | 0,013 | 0,001 | 0,005 | 0,030 |

4.3 Döküm Benzeşim Çalışmaları

4.3.1 Döküm Parçası ve Kalıp Tasarımı

Deneme dökümleri yapılmadan önce kalıp ve parça boyutlarının belirlenmesi için benzeşim çalışmaları yapılmıştır. Kalıp tasarımında döküm parçasının en kritik çekinti mesafesini belirleyerek farklı ekzotermik karaktere sahip olan besleyici gömleklerin besleme mesafelerini ve çekinti seviyelerini karşılaştırılması amaçlanmıştır. Besleme mesafesini incelemek amacıyla literatür çalışmaları doğrultusunda levha şekilli parçalar üzerinde boyutsal değişimler yapılmıştır.

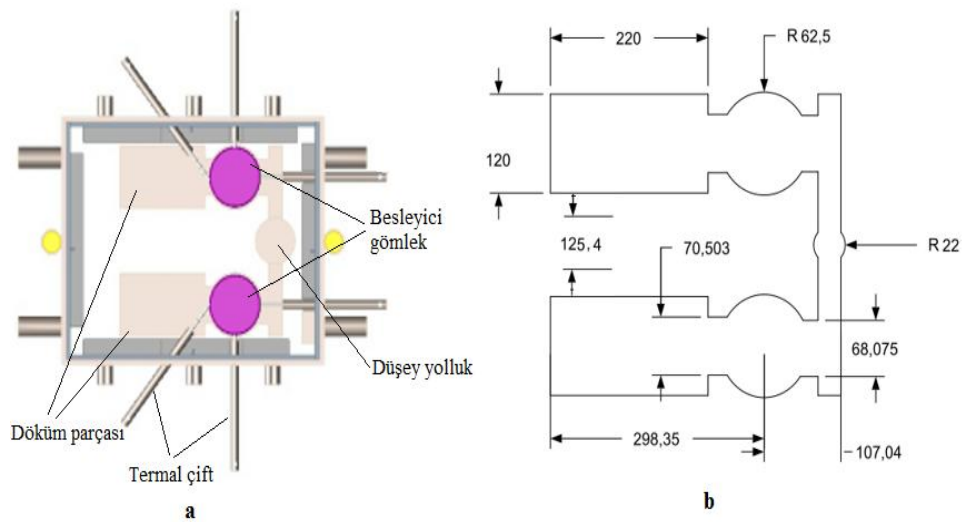
Bölüm 2’de Carlson ve ekibinin 2002 yılında yaptığı çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda döküm parçasının sağlam olarak üretilmesi için kalıp tasarımında kullanılan besleyicinin modül kriteri, hacim kriteri ve besleme mesafesi kriterini karşılaması gerekmektedir. Benzeşim programları yardımıyla döküm parçasının katılma analizinin bilgisayar ortamında yapılabileceği ve döküm parçasında oluşması muhtemel hataların farklı kalıp tasarımları ile benzeşim denemeleri yapılarak kısa sürede giderilebilmektedir (Carlson ve diğer., 2002).

Literatür çalışmalarının sonucunda döküm parça boyutları gerçekçi kısıtlar göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Deneme dökümlerinde besleyici gömleğin 3 farklı bölgesinden sıcaklık ölçümü alınması planlandığı için termal çiftlerin boyutsal özelliklerine uygun besleyici gömlek boyutu belirlenmiştir.. Bununla birlikte

yapılacak olan döküm denemelerinin karakterizasyon işlemlerinin yürütülebilmesi için toplam döküm ağırlığı mümkün mertebe düşük tutulmaya çalışılmıştır. Belirtilen kısıtlar göz önünde bulundurularak besleyici gömlek boyutu sabit olacak şekilde döküm parçasının geometrisi literatür çalışmaları doğrultusunda besleyici tasarım kriterleri ve benzeşim sonuçlarının incelenmesi ile belirlenmiştir. Tablo 4.3'te parçaların boyutları gösterilmektedir. Tablo 4.3'te belirtilen boyutlar kullanılarak modül hesaplamaları ve benzeşim çalışmaları yapılmıştır. Şekil 4.12'de parça şekli ve kalıp tasarımı gösterilmektedir. Deneme dökümleri için Tablo 4.3'deki 6. parça seçilmiştir.

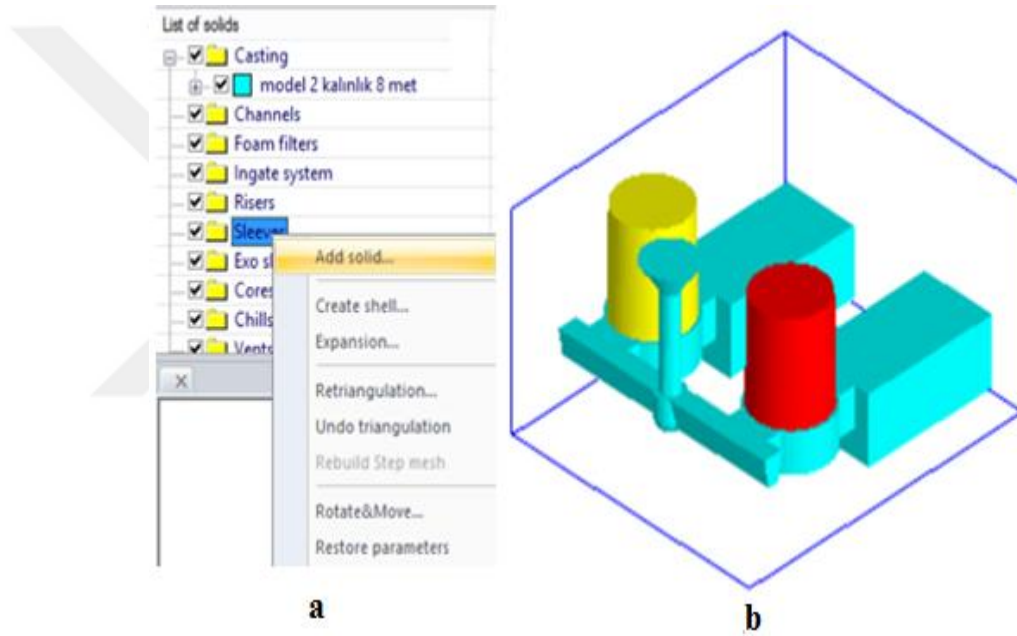
Tablo 4.3 Deneme dökümleri için tasarlanan döküm parçasının boyutları ve döküm modülleri

| Deneme Numarası | Boyut (cm) | | | V_d (cm ³) | A_d (cm ²) | M_b (cm) |
|-----------------|------------|----|---|--------------------------|--------------------------|------------|
| | L | W | T | | | |
| 1 | 15 | 12 | 3 | 540 | 522 | 1,24 |
| 2 | 18 | 12 | 3 | 648 | 612 | 1,27 |
| 3 | 19 | 12 | 3 | 684 | 642 | 1,28 |
| 4 | 16 | 14 | 3 | 672 | 628 | 1,28 |
| 5 | 17 | 14 | 3 | 714 | 662 | 1,29 |
| 6 | 22 | 12 | 8 | 2112 | 1072 | 1,97 |



Şekil 4.12 Deneysel ve benzeşim çalışmalarında kullanılan a) derecenin üstten görünüşü ve b) kalıp tasarımı (mm)

Döküm benzeşim çalışmalarında NovaFlow&Solid programı kullanılmıştır. Benzeşim çalışmalarında kullanılan besleyici gömlek, döküm parçası ve yolluk tasarımının 3 boyutlu katı modeli IronCad çizim programında oluşturulmuş ve “.stl” (stereolitografi) uzantılı olarak kaydedilmiştir. Benzeşim programında ilk aşamada kalıp tasarımını programa tanıtmak amacıyla “Import 3D files” sekmesi seçilmiştir. Döküm alaşımı ile besleyici gömlekler sırasıyla Şekil 4.13a’da gösterildiği gibi ayrı ayrı benzeşim programına tanıtılmış ve kaydedilmiştir. Yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin benzeşim ve deneme döküm çalışmalarının karşılaştırılmasında Şekil 4.13b’deki kalıp tasarımı kullanılmıştır.



Şekil 4.13 a) Döküm metali ve besleyici gömleklerin benzeşim programına tanıtılması, b) Kalıp tasarımı (NovaCast, 2016)

4.3.2 Döküm Benzeşim Parametreleri

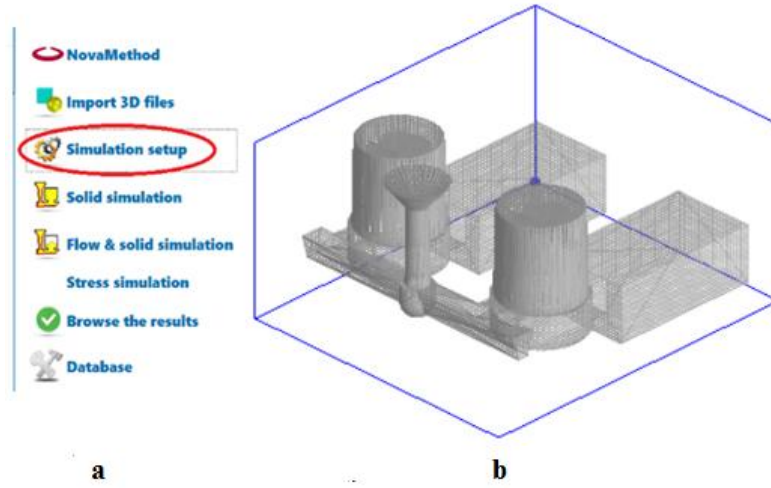
Döküm benzeşim çalışmalarının sonucuna etki eden parametreler malzeme, döküm ve benzeşim olmak üzere 3 ana başlık altında toplanabilir. Döküm malzemesi, kalıp malzemesi ve kalıp elemanları (besleyici gömlek, çiller, filtreler gibi) ile kalıp boşluğunun durumu (straför, hava ile dolu olması gibi) malzeme parametreleri olarak değerlendirilebilir. Döküm sıcaklığı, döküm hızı, döküm yapılan potanın durumu ve kalıp sıcaklığı döküm parametreleri, hücre sayısı, hücre boyutu ve

ısı yayılımı durumları da benzeşim parametreleri olarak değerlendirilebilir. Benzeşim sonuçlarının güvenilirliğini arttırmak amacıyla söz konusu parametreler dökümhane koşullarına göre değiştirilebilir. Dökümü planlanan parçanın kalıp tasarımı dikkate alınarak kalıp malzemesi seçimi yapılır. Benzeşim programında her alaşım için döküm sıcaklığı kayıtlıdır. Kalıp tasarımında kullanılması düşünülen diğer malzemelerin özelliklerinin benzeşim programında belirtilen özellikler ile aynı olması benzeşim sonuçlarının güvenilirliğini arttıracaktır.

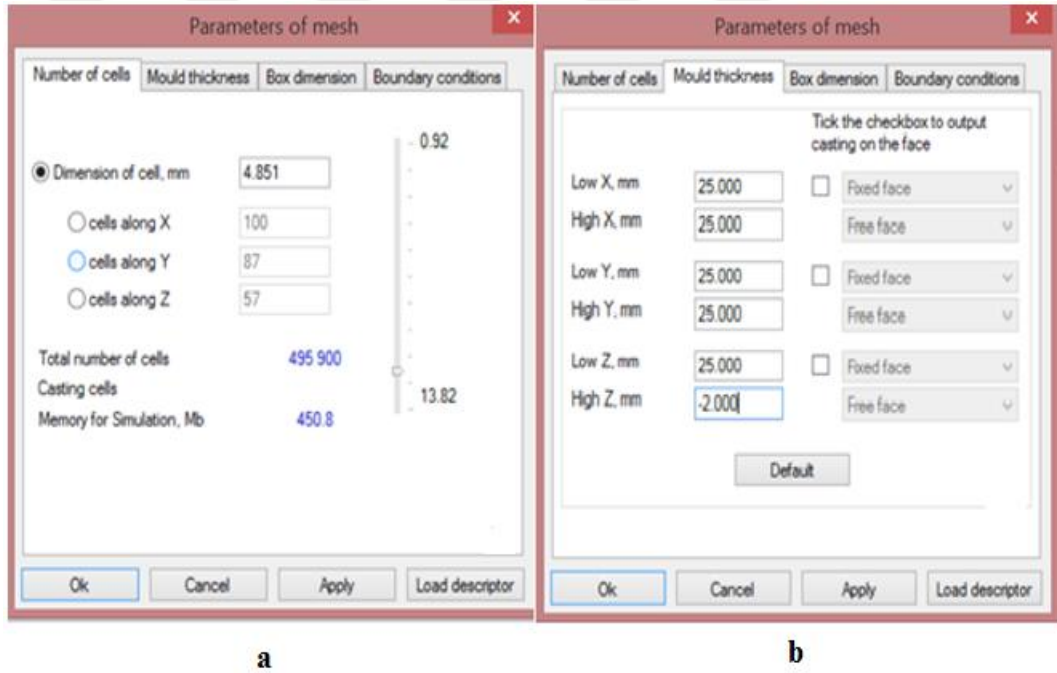
Benzeşim hesaplama süresi açısından önemli parametreler hücre sayısı ve hücre boyutudur. Hücre sayısı ile benzeşim çalışmasının tamamlanma süresi doğru orantılı olacak şekilde değişmektedir. Hücre sayısının az olması durumunda benzeşim çalışmaları kısa sürelerde tamamlanacaktır. Ancak elde edilecek sonuçlar kullanıcıyı yanıltabilir. Bundan dolayı yapılacak olan benzeşim çalışmasının hücre sayısının belirlenmesinde kullanıcının tecrübesi oldukça önemlidir.

4.3.2.1 Döküm Benzeşim Programında Kullanılan Parametrelerin Belirlenmesi

Benzeşim programında parametrelerin belirlenmesi için “Simulation setup” sekmesi seçilerek 3 boyutlu katı modeli oluşturulan kalıp tasarımı programda açılır (Şekil 4.14a). Döküm metali ve besleyici gömlekler “build mesh” sekmesi tıklanarak hücrelere ayrılır (Şekil 4.14b). Hücre boyutu 4,85 mm ve sayısı 495.000 alınarak döküm boşluğu ile derece yüzeyi arasındaki en yakın mesafe 25 mm olacak şekilde girilmiştir (Şekil 4.15a, Şekil 4.15b). Belirlenen bu değer üzerinde ısı özelliklerin değişmediği kabul edilir (NovaCast, 2016). Döküm alaşımı, besleyici gömlek türü, kalıp kumu, kalıp boşluğunun durumu, döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve giriş yolluğunun yeri gibi parametreler döküm şartlarıyla uyumlu olacak şekilde benzeşim programında seçilmiştir.



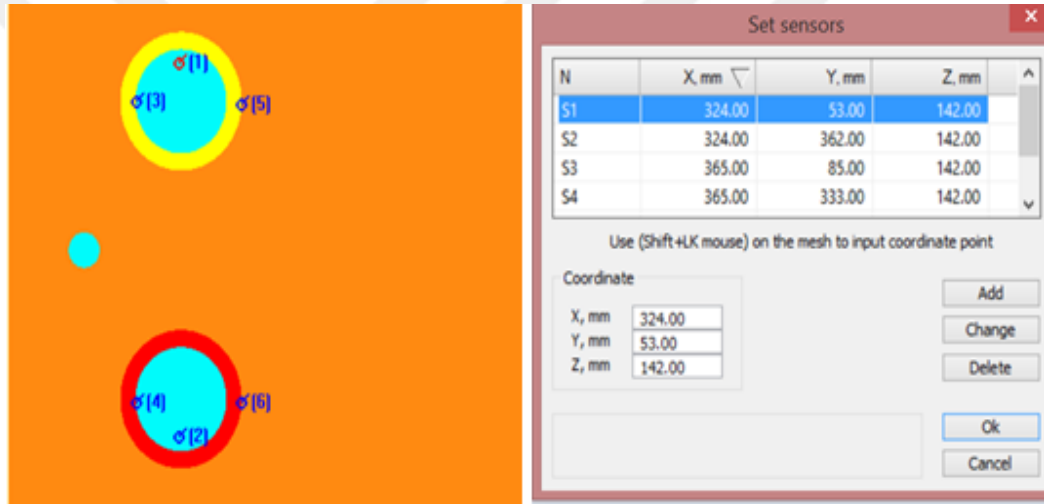
Şekil 4.14 a) Döküm parametrelerinin belirlenmesi b) Döküm metalinin ve besleyici gömleklerin hürelere ayrılması (NovaCast, 2016)



Şekil 4.15 a) Hücre sayısı, b) Döküm boşluğu ile kalıp yüzeyi arasındaki mesafe (NovaCast, 2016)

Benzeşim çalışmalarında düşük alaşımli karbon çeliği, östenitik mangan çeliği ve paslanmaz çelik olmak üzere 3 farklı döküm alaşımı seçilmiştir. Benzeşim çalışmalarındaki döküm sıcaklığı deneme dökümlerindeki en yüksek sıcaklık göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. AISI 4130 ve östenitik mangan çeliklerinin benzeşim çalışmalarında deneme dökümlerine benzer biçimde furan esaslı reçine ve

silis kumu, CF-8M alaşımı için alphaset esaslı reçine ve silis kumu seçilmiştir. Besleyici gömlek seçiminde, benzeşim programının veri tabanında bulunan düşük, yüksek, orta ve exokal besleyici gömleklerden uygun olanları seçilmiş ve deneme döküm sonuçları göz önünde bulundurularak çeşitli değişiklikler yapılmıştır. Döküm yöntemi “Gravity Casting” seçilerek döküm hızı deneme dökümlerindeki toplam döküm süresi göz önünde bulundurularak programa girilmiştir. Deneme dökümlerinde sıcaklık ölçülen bölgelerden benzeşim programından da sıcaklık verisi alınabilmesi için sensörler tanımlanmıştır (Şekil 4.16). Şekil 4.16’da gösterilen 1 ve 2 numaralı bölgeler “merkez”, 3 ve 4 numaralı bölgeler “iç yüzey”, 4 ve 5 numaralı bölgeler “dış yüzey” olarak adlandırılmıştır.



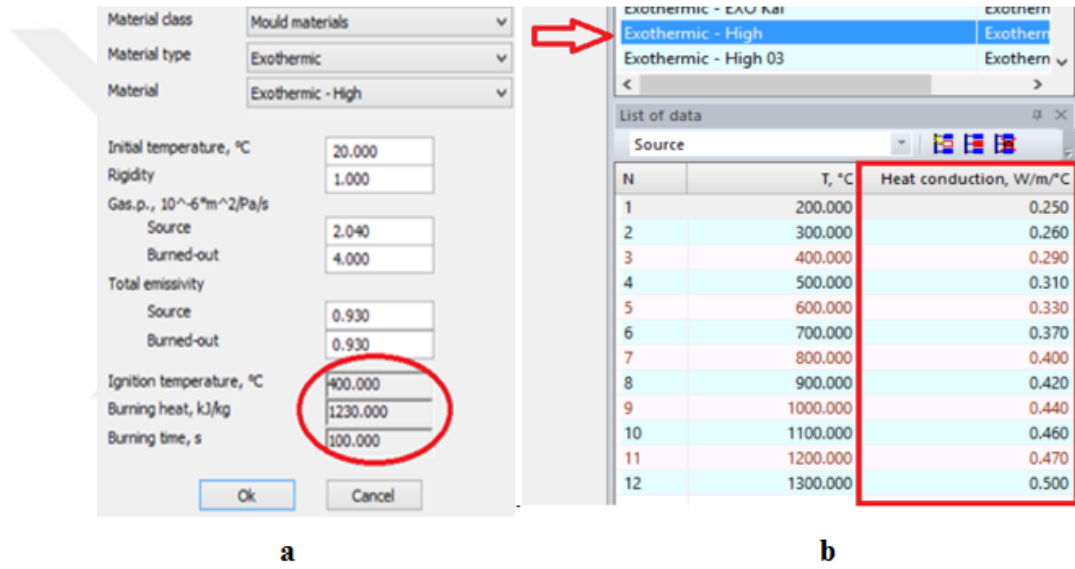
Şekil 4.16 Benzeşim programındaki sıcaklık sensörlerinin kalıp içerisindeki konumları (NovaCast, 2016)

4.3.2.2 Döküm Benzeşim Programında Besleyici Gömleğin İşlevine Etki Eden Parametrelerin Değiştirilmesi

Bölüm 3’te J. W. Thomas ve arkadaşlarının 2014 yılında yayınladıkları makalede kalıp tasarımından bağımsız olarak besleyici gömleğin işlevine etki eden ısı iletim katsayısı, yoğunluk, ısı kapasitesi, ateşleme sıcaklığı, yanma süresi, enerji kapasitesi olmak üzere 6 parametrenin olduğu belirtilmiştir. Bu parametreler değiştirilerek benzeşim denemeleri yapılmıştır. Benzeşim çalışmaları sonucunda sıcaklık-süre

grafikleri çizilmiştir ve çekinti görüntüleri kaydedilmiştir. Benzeşim sonuçları kendi içlerinde karşılaştırılarak deneme dökümlerine en uygun olanı tespit edilmiştir.

Döküm benzeşim programında ilk aşamada veri tabanında bulunan yüksek, orta ve exokal besleyici gömlekler kullanılmıştır. İkinci aşamada Şekil 4.17a’da gösterildiği gibi “Database” sekmesi seçilerek yüksek, orta ve exokal besleyici gömleklerin yanma sıcaklığı, yanma süresi ve enerji kapasitesi değiştirilmiştir. Üçüncü aşamada besleyici gömleklerin ısı iletim katsayısı ve yoğunluğu değiştirilmiştir (Şekil 4.17b).



Şekil 4.17 Benzeşim programında besleyici gömlek özelliklerinin değiştirilmesi a) Ateşleme sıcaklığı, yanma süresi, enerji kapasite b) Isı iletim katsayısı ve yoğunluk parametrelerinin değiştirilmesi (NovaCast, 2016).

Tablo 4.4’te benzeşim programının veri tabanına tanıtılan yüksek ve orta ekzotermik besleyici gömleklerin özellikleri gösterilmektedir. “Yüksek ekzotermik-0”, “Orta ekzotermik-0” ve “exokal-0” olarak adlandırılan besleyici gömlekler benzeşim programının veri tabanında bulunan besleyici gömleklerdir. “Yüksek ekzotermik-1” ve “Yüksek ekzotermik-2” olarak benzeşim programının veri tabanında oluşturulan besleyici gömleklerin ateşleme sıcaklığı, yanma ısı ve yanma süresi değiştirilmiştir. “Yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek-3,4,5,6” olarak adlandırılan besleyici gömleklerde ateşleme sıcaklığı, yanma ısı ve yanma süresi

sabit tutularak ısı iletim katsayısı ve yoğunluk değerleri değiştirilmiştir. Benzer şekilde orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin özelliklerinde değişimler yapılarak benzeşim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Her iki besleyici gömlek için sıcaklık-süre grafikleri incelenmiştir. Tablo 4.4'te gösterilen parametrelerdeki değişimlere rağmen yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin sıcaklık-süre grafiklerinde belirgin bir değişim görülmemiştir. Bundan dolayı Tablo 4.5'te gösterilen değişiklikler yapılarak benzeşim çalışmalarına geçilmiştir.

Döküm benzeşim programında besleyici gömlek türü haricinde seçilen parametreler Tablo 4.6'da verilmektedir. Başlangıç sıcaklık değerleri farklı alaşımlar için ölçülen en yüksek sıcaklık değeri dikkate alınarak belirlenmiştir. Döküm parçasının toplam ağırlığı yaklaşık 50 kg'dir. Metal akış hızı hesaplanırken toplam ağırlık döküm süresine oranlanmıştır.

Tablo 4.4 Benzeşim programının veri tabanında oluşturulan yüksek, orta ve exokal besleyici gömleklerin özellikleri

| Besleyici gömlek türü | Ateşleme Sıcaklığı (°C) | Yanma Isısı (kJ/kg) | Yanma süresi (s) |
|-----------------------|--|---------------------|------------------|
| YE-0 | 400 | 1230 | 100 |
| YE-1 | 700 | 1300 | 100 |
| YE-2 | 750 | 1300 | 100 |
| YE-3 | benzeşim programının veri tabanında bulunan yüksek ekzotermik besleyici gömleğin her sıcaklıktaki ısı iletim katsayı değeri 0,40 W °C/m artırıldı, yoğunluk 0,20 kg/m ³ azaltıldı | | |
| YE-4 | benzeşim programının veri tabanında bulunan yüksek ekzotermik besleyici gömleğin her sıcaklıktaki ısı iletim katsayı değeri 0,10 W °C/m artırıldı, yoğunluk 0,20 kg/m ³ azaltıldı | | |
| YE-5 | benzeşim programının veri tabanında bulunan yüksek ekzotermik besleyici gömleğin her sıcaklıktaki ısı iletim katsayı değeri 0,18 W °C/m artırıldı, yoğunluk 0,20 kg/m ³ azaltıldı | | |
| YE-6 | benzeşim programının veri tabanında bulunan yüksek ekzotermik besleyici gömleğin her sıcaklıktaki ısı iletim katsayı değeri 0,20 W °C/m artırıldı, yoğunluk 0,20 kg/m ³ azaltıldı | | |
| YE-7 | 800 | 1230 | 100 |
| YE-8 | 900 | 1230 | 100 |
| OE-0 | 400 | 707 | 200 |
| exokal-0 | 400 | 2200 | 30 |

Tablo 4.5 Benzeşim programının veri tabanında oluşturulan yüksek, orta ve exokal besleyici gömleklerin özellikleri

| Besleyici gömleğin adı | Değiştirilen özellik |
|-------------------------------|--|
| OE-1 | yanma ısı 93 kJ/kg artırıldı, ateşleme süresi 50 saniye artırıldı |
| OE-2 | ateşleme sıcaklığı 400°C artırıldı, ateşleme süresi 50 saniye artırıldı |
| OE-3 | benzeşim programının veri tabanında bulunan orta ekzotermik besleyici gömleğin her sıcaklıktaki ısı iletim katsayı değeri 0,2 W °C/m azaltıldı |
| OE-4 | benzeşim programının veri tabanında bulunan orta ekzotermik besleyici gömleğin her sıcaklıktaki ısı iletim katsayı değeri 0,7 W °C/m artırıldı |
| exokal-1 | ateşleme sıcaklığı 400°C artırıldı |
| exokal-2 | ateşleme sıcaklığı 900°C artırıldı |
| exokal-3 | ateşleme sıcaklığı 200°C artırıldı |

Tablo 4.6 Benzeşim programında seçilen parametreler

| Döküm alaşımı | Mesh boyutu (mm) | Başlangıç sıcaklığı (°C) | Döküm süresi (s) | Metal akış hızı (kg/s) |
|----------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| AISI 4130 | 4,851 | 1505 | 17,78 | 2,81 |
| A128M-93-A | 4,851 | 1459 | 19,36 | 2,58 |
| CF-8M | 4,851 | 1503 | 17,86 | 2,79 |

BÖLÜM BEŞ

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalar ve karakterizasyon çalışmaları sonucunda, karakterize edilen besleyici gömlekler deneme dökümlerinde uygulanmıştır. Sonuçta ortaya çıkan parametreler döküm benzeşim programına aktarılmıştır. Benzeşim ve gerçek döküm şartları arasında uyumsuzluklar karakterizasyon çalışmaları da göz önünde bulundurularak iyileştirilmiştir. Böylece soğuma davranışı ve besleme mesafesi gerçek döküm şartlarına en yakın benzeşim sonuçları elde edilmiştir.

Besleyici gömlek ısıl özellikleri karakterize edilmiş ve reaksiyon etkinliği belirlenmiştir. Döküm metalinin çeşitli bölgelerinden soğuma eğrileri çıkartılarak gömleklerin soğuma üzerine etkisi incelenmiştir. Gömlek ve metal arasındaki etkileşimi belirlemek için metalografik ve kimyasal incelemeler yapılmıştır. Elde edilen parametreler benzeşim programı ile karşılaştırılarak iyileştirme çalışmaları yapılmıştır.

5.1 Karakterizasyon Sonuçları

5.1.1 Besleyici Gömlek Karakterizasyon Sonuçları

Besleyici gömleklerin karışımında metalik alüminyum, metal oksit, bağlayıcı, ateşleyici, yalıtım bileşenlerinin ve dolgu malzemelerin olduğu bilinmektedir (Lipowska ve diğer., 2010). Besleyici gömleklerin yapısında bulunan metal ve metal oksit bileşenleri metalotermik reaksiyona girerek yüksek ısılar ortaya çıkarmaktadır. Ortaya çıkan bu ısı besleyici metalinin uzun süre yüksek sıcaklıklarda kalmasını sağlayarak besleyiciden döküm parçasına sıvı metalin aktarılmasına ve hata içermeyen döküm parçasının üretimine olanak sağlamaktadır (Candeğer., 2001).

Deneme dökümlerinde besleyici gömleklerin enerji üretebilmesi için yapısında bulunan metalik alüminyum ve metal oksit bileşenlerinin reaksiyona girmesi gerekmektedir. Bundan dolayı gömleklerin ekzotermik özelliklerinin belirlenmesi

amacıyla deneme dökümlerine geçilmeden önce gömlek numunelerine DT-TG analizleri yapılmıştır. Döküm öncesi ve döküm sonrası faz değişimleri X ışınları kırınım desenleri üzerinden incelenmiştir.

5.1.1.1 DT-TG Analiz Sonuçları

DT-TG analizleri ile besleyici gömleklerin reaksiyona girme süreleri, reaksiyon sıcaklıkları ve süreleri incelenmiştir. DT (mavi eğri)-TG (yeşil eğri) analiz sonuçları sıcaklık değişimleri (kırmızı eğri) ile birlikte süreye bağlı olarak Şekil 5.1-Şekil 5.6'da gösterilmektedir.

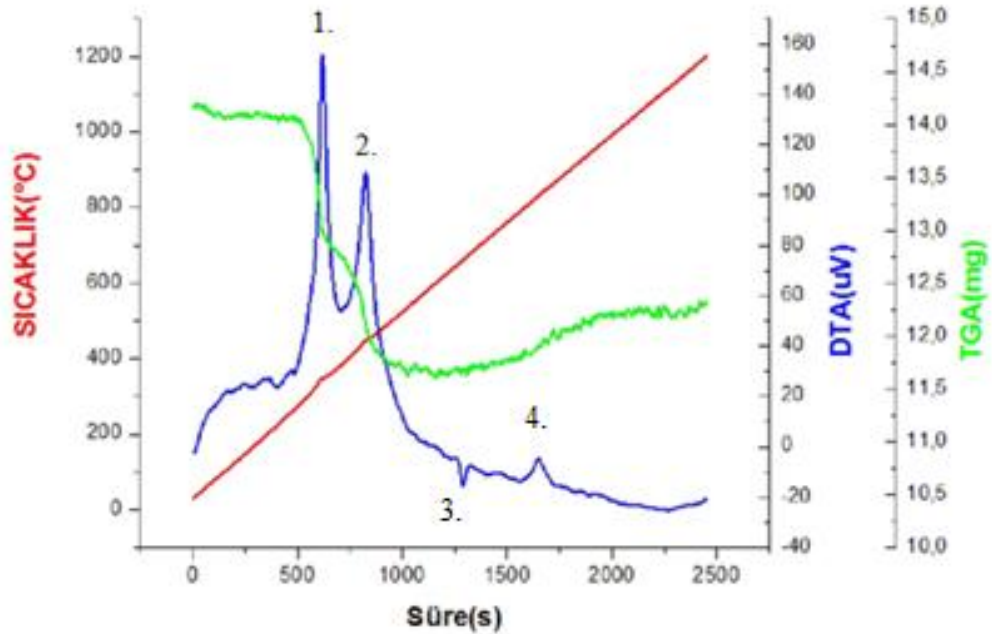
Yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleğin DT-TG analizi sonucunda elde edilen grafikler Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te verilmiştir. Şekil 5.1 incelendiğinde kademeli olarak ilk iki pikte kütle azalışının olduğu ve üçüncü pikte kütle artışının olduğu görülmektedir. İlk kütle azalışı yaklaşık 300°C'de, ikinci kütle azalışı yaklaşık 400°C'de meydana gelmektedir. 1. ve 2. pikteki kütle azalması besleyici gömleğin karışımında bulunan polimerik bağlayıcının ve diğer organiklerin yapıdan uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. 3. pikte asıl ekzotermik reaksiyonun başlatıcısı konumundaki ateşleyici bileşenin reaksiyon öncesinde gösterdiği endotermik reaksiyon görülmektedir. Besleyici gömleklerin karakteristik özelliği olan alüminotermik reaksiyon 4. pikte yaklaşık 800°C'de başlamaktadır. Literatürde benzer çalışmalarda da alüminotermik reaksiyonun başlama sıcaklığının kullanılan ateşleyiciye bağlı olarak metalik alüminyum ergime sıcaklığına yakın sıcaklıklarda olduğundan bahsedilmektedir (Hahma ve diğer., 2006).

B ve C bölgelerinde meydana gelen reaksiyonlar sonucu kütle kayıpları A bölgesin ile benzerlik gösterdiği görülmektedir (Tablo 5.1). DTA piklerinin şiddeti ve altında kalan alan reaksiyon enerjileri hakkında bilgi vermektedir (Haines, 1995). B ve C bölgelerinde ekzotermik özelliğin karakteristik reaksiyonu olan alüminotermik reaksiyon pik şiddeti ve altında kalan alanın (4 numaralı) A bölgesi ile karşılaştırıldığında daha büyük olduğu görülmektedir. C bölgesi, besleyici gömleğin vakum üretim yöntemine göre alt tarafta kalan bölgedir. Gömlek

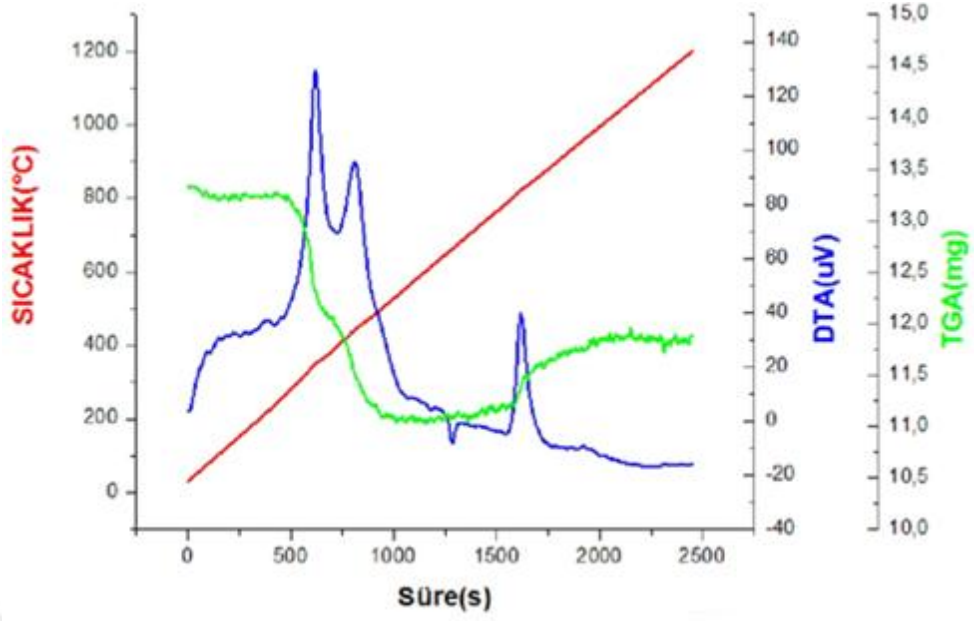
karışımında bulunan malzemelerden daha ince olan malzemelerin vakumun en yüksek olduğu kısımlarda toplanmaktadır. Ekzotermik reaksiyonların bileşenleri diğer bileşenlere göre daha ince olarak seçilmektedir. Reaksiyon durumları karşılaştırıldığında A ve B bölgelerine kıyasla C bölgesinden daha fazla enerji saplandığı görülmektedir. Ancak yüksek ekzotermik özellikli besleyicinin A, B ve C bölgelerindeki 4. piklerde görülen farklılıkların döküm çalışmalarında besleyici gömlek fonksiyonu etkilemeyeceği düşünülmektedir. Metal ile etkileşim düşünüldüğünde en uzun süre temasın olduğu C bölgesinde olmaktadır.

Tablo 5.1 Yüksek ekzotermik gömleklerin kütle değişimi (%)

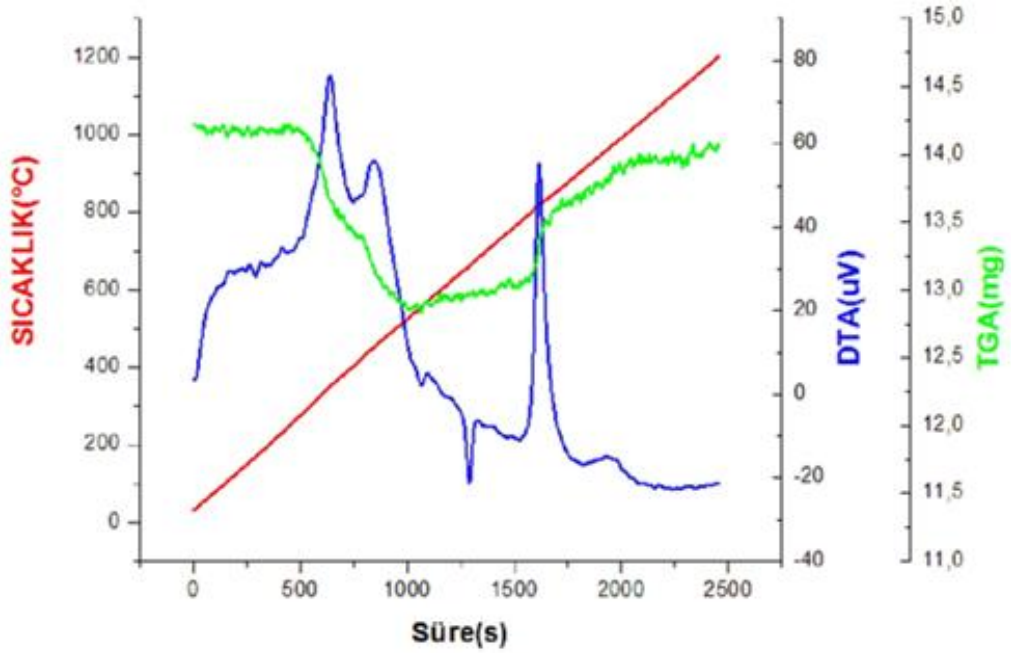
| Besleyici gömlek türü | Nunune alınan bölge | 1. Pik kütle değişimi (%) | 2. Pik kütle değişimi (%) | 4. pik kütle değişimi (%) |
|-----------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Yüksek ekzotermik | A | -9 | -7 | +2 |
| | B | -9 | -7 | +2 |
| | C | -3,5 | -3,5 | +3,5 |



Şekil 5.1 Yüksek ekzotermik besleyici, Şekil 4.2 A bölgesi DT-TG grafiği



Şekil 5.2 Yüksek ekzotermik besleyici, Şekil 4.2 B bölgesi DT-TG grafiği



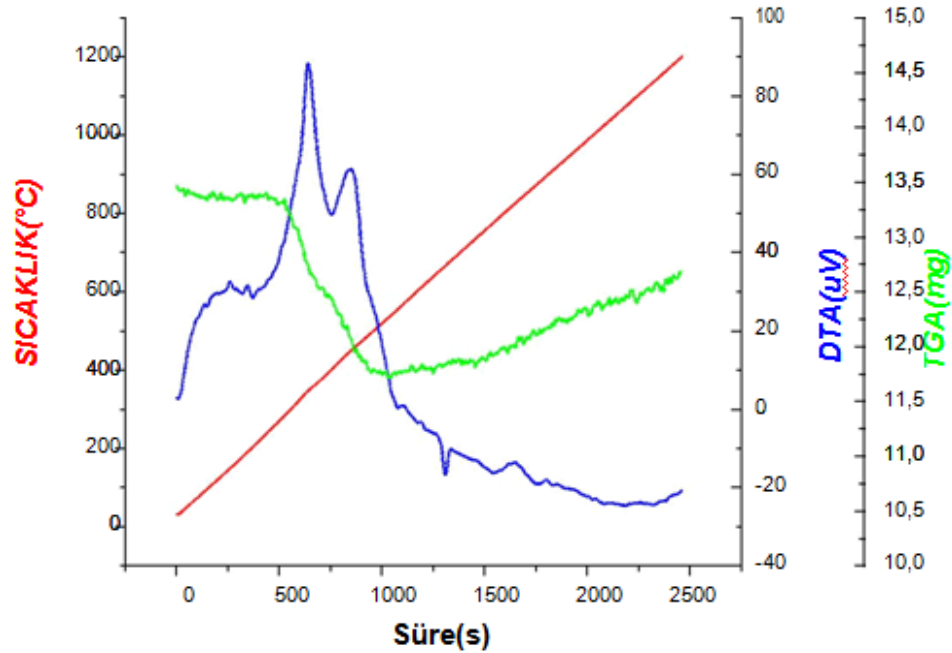
Şekil 5.3 Yüksek ekzotermik besleyici, Şekil 4.2 C bölgesi DT-TG grafiği

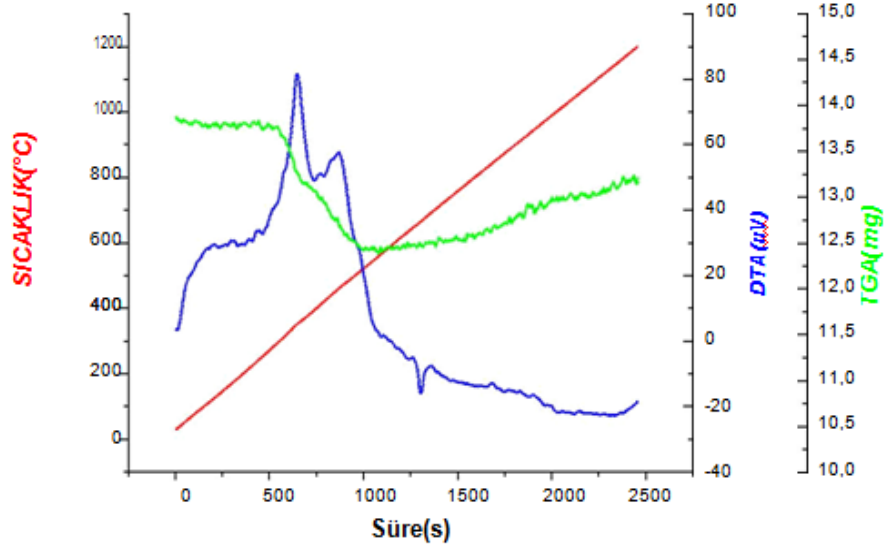
Orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin DT-TG analiz sonuçları Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir. Orta ve yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklere kullanılan bileşenler aynı olup miktarları farklıdır. Bundan dolayı

piklerin gösterdiği davranışlar benzer olmakla birlikte alüminotermik reaksiyon pik şiddetleri farklıdır. Her üç şekildeki 1. 2. 3. ve 4. pikler yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleğin grafiklerine benzer davranış göstermektedir. Orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin 4. pikleri incelendiğinde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin 4. piklerine göre daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin karışımında bulunan alüminyum miktarının az olması alüminotermik reaksiyonun verimini etkilediği görülmektedir (Duares, 2007). Orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin A, B, C bölgelerindeki piklerinin benzer değerlerde olmasından dolayı homojen olduğu sonucuna varılmıştır (Tablo 5.2).

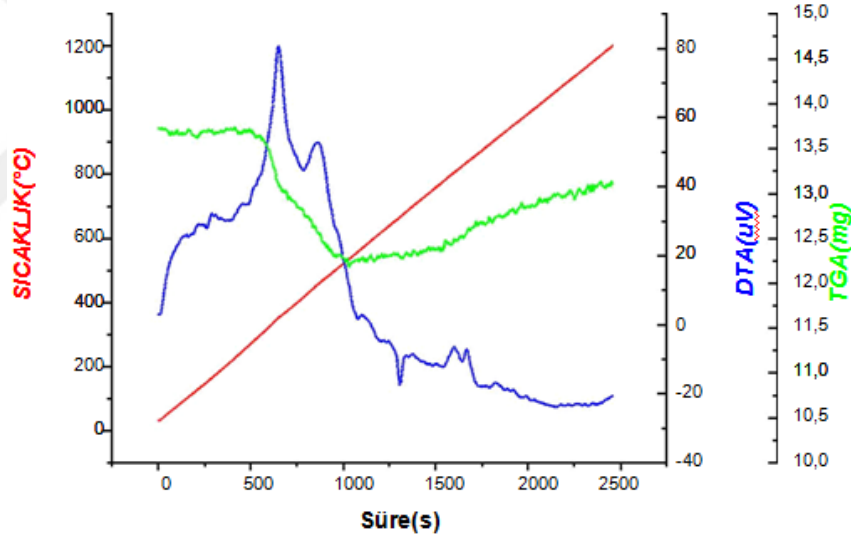
Tablo 5.2 Orta ekzotermik gömleklerin kütle değişimi (%)

| Besleyici gömlek türü | Nunune alınan bölge | 1. Pik kütle değişimi (%) | 2. Pik kütle değişimi (%) | 4. pik kütle değişimi (%) |
|-----------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Orta ekzotermik | A | -5,5 | -5,5 | +2 |
| | B | -5 | -3,5 | 0 |
| | C | -5 | -3,5 | +2 |





Şekil 5.5 Orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek, Şekil 4.2 B bölgesi DT-TG grafiği



Şekil 5.6 Orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek, Şekil 4.2 C bölgesi DT-TG grafiği

Yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin farklı bölgelerinin DTA eğriler karşılaştırıldığında yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleğin her üç bölgedeki (A, B, C) ekzotermik özelliğinin orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklere göre daha fazladır. Yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin DTA eğrisi değerlerinin daha yüksek olması yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin daha yüksek enerjilere ulaştığını göstermektedir (Haines, 1995).

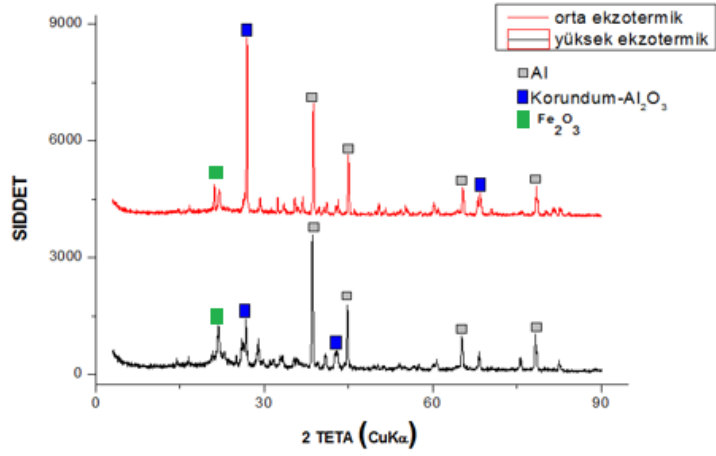
Literatür çalışmaları incelenmesi sonucunda yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin karışımında bulunan alüminyumun orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin karışımında bulunan alüminyuma göre daha ince ve daha fazla olmasından dolayı alüminotermik reaksiyonun orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğe göre daha etkin bir şekilde gerçekleştiği düşünülmektedir. Bu nedenle yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin pik şiddetlerinin orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklere göre daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür (Haines, 1995).

5.1.1.2 X Işınları Kırınım Sonuçları

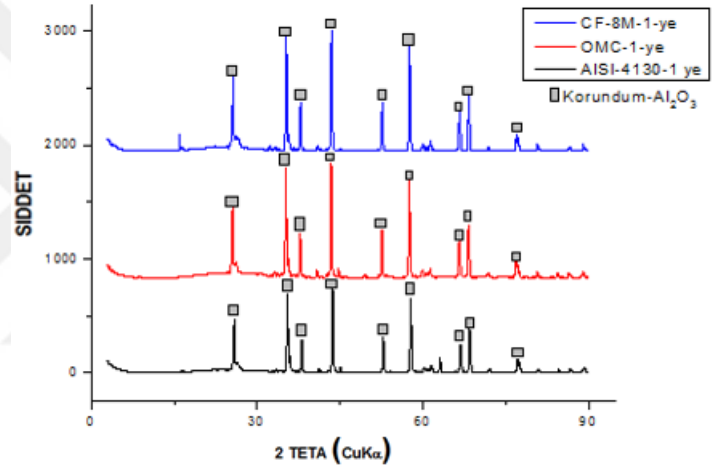
Yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerde döküm öncesi ve sonrası faz bileşenleri X-ışınları kırınım desenleri incelenerek belirlenmiştir (Şekil 5.7-Şekil 5.9).

Şekil 5.7’de döküm öncesi her iki besleyici karışımında metalik alüminyum ve metal oksit bileşenlerin varlığı tespit edilmiştir. Döküm öncesi yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin metalik alüminyum pik şiddetleri incelendiğinde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek karışımının orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek karışımına göre daha fazla ve daha ince alüminyum içermesinden dolayı daha yüksek pik şiddetlerine ulaştığı görülmüştür. Yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin karışımında bulunan yalıtım özelliğine sahip bileşenlerin alümina (Al_2O_3) esaslı olduğu bilinmektedir (Lipowska ve diğer., 2010). Bu nedenle faz analizinde yüksek oranda korundum fazı görülmektedir.

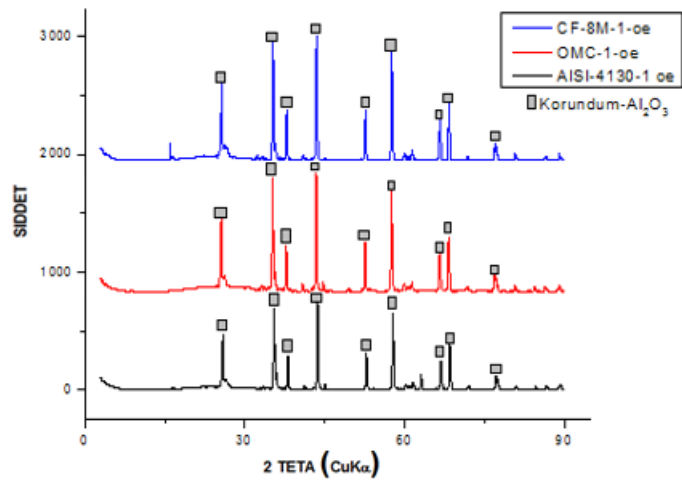
Farklı alaşımların deneme dökümlerinde kullanılan besleyici gömleklerin döküm sonrası X ışınları kırınım desenleri incelendiğinde korundum (Al_2O_3) fazları görülmüştür (Şekil 5.8, Şekil 5.9). Döküm sonrası besleyici gömleklerin kırınım desenlerinde metalik alüminyum görülmemiştir. Böylece alüminotermik reaksiyonun tam olarak gerçekleştiği ve korundum fazına sahip Al_2O_3 bileşiğinin oluştuğu tespit edilmiştir (Sola, 2014).



Şekil 5.7 Döküm öncesi yüksek ve orta ekzotermik besleyici gömleklerin X ışınları kırınım deseni



Şekil 5.8 Döküm sonrası yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin X ışınları kırınım desenleri



Şekil 5.9 Döküm sonrası orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin X ışınları kırınım desenleri

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 incelendiğinde yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömlelerde döküm sonrası literatür çalışmalarına benzer şekilde korundum (Al_2O_3) fazı görülmektedir. Benzer çalışmaların aksine döküm sonrası analizlerde Fe, Mn elementleri görülmemiştir (Sola, 2014). Bundan dolayı döküm sırasında döküm metali ile besleyici gömleklerin etkileşime girmediği sonucunda varılmıştır (Sola, 2014). Her iki besleyici gömleğin döküm sonrası X ışınları kırınım desenlerine dayanarak alüminotermik reaksiyonun gerçekleştiği ve besleyici gömleklerin işlevini tam olarak yerine getirdiği anlaşılmaktadır.

5.1.2 Döküm Parçalarının Karakterizasyon Sonuçları

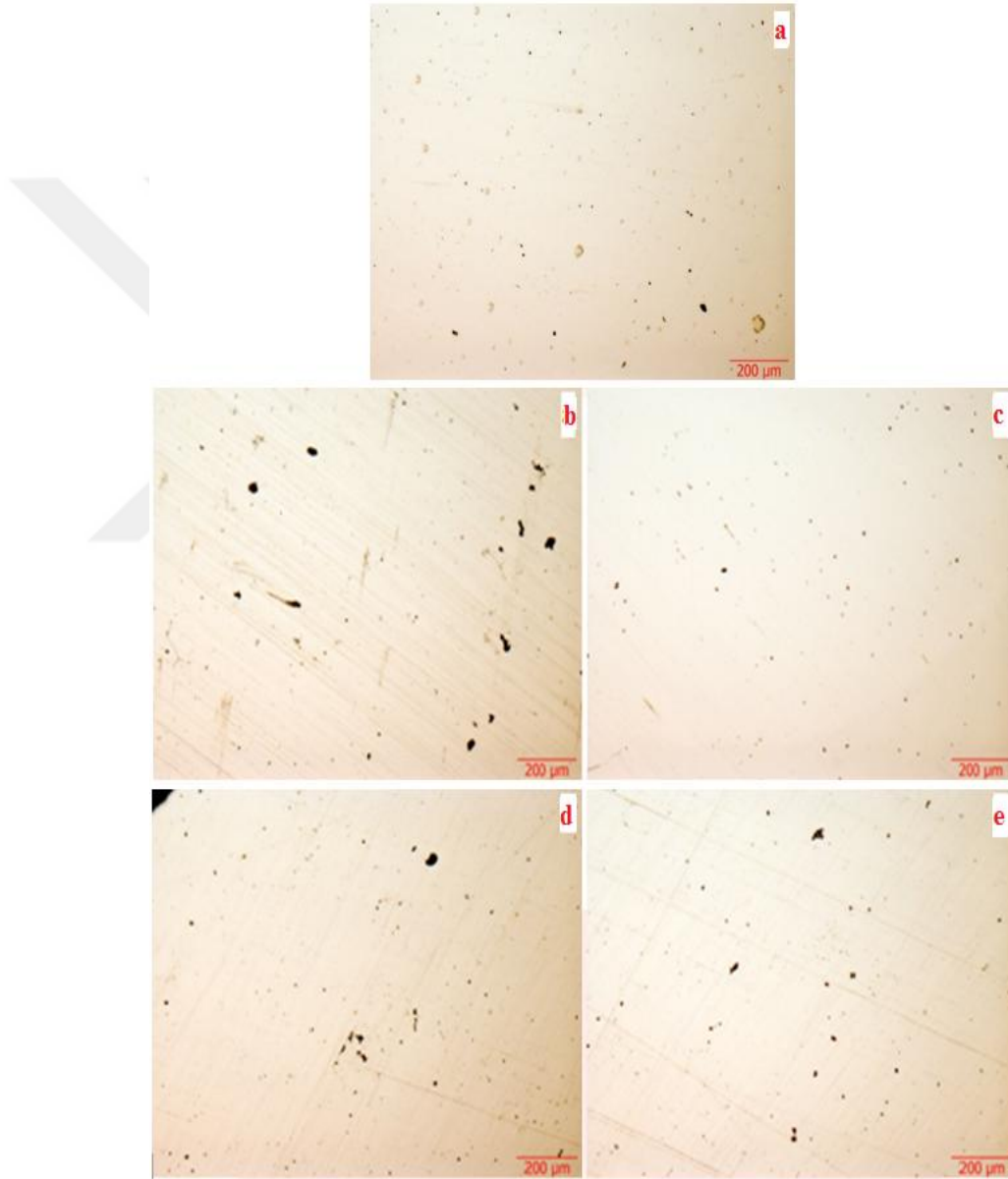
Küresel grafitli dökme demir uygulamalarında kullanılan ekzotermik besleyici gömleklerin döküm alaşımı ile etkileşime girmesi sonucunda besleyici gömleğin alt bölgesi ile döküm parçasının kesiştiği bölgede flake (bozulmuş) grafit olarak adlandırılan bozuk grafit yapısı görülmektedir (Kahraman ve diğer., 2014). Bozulan grafit yapısı mekanik özelliklerin kötüleşmesine sebep olmaktadır. Benzer durumun çelik alaşımları ile gerçekleşebileceği dikkate alınarak mikroyapı ve kimyasal incelemeleri yapılmıştır.

5.1.2.1 Mikroyapı Görüntüleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğin kullanıldığı besleyici metalinin ve döküm parçasının farklı bölgelerinden çıkartılan numunelerde mikroyapı görüntüleri çekilmiş ve karşılaştırılmıştır (Şekil 5.10-Şekil 5.12). Gömleklerin döküm metalinin mikroyapısı üzerine etkisi faz farklılıkları ve döküm boşlukları göz önünde bulundurularak incelenmiştir.

AISI 4130-1 deneme dökümünde orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılan çalışmada döküm parçasının mikroyapı görüntüsü incelendiğinde Şekil 5.10a'da döküm parçası uç bölgesinin (1 nolu bölge) Şekil 5.10b'deki besleyici altı bölgesinden (2 nolu üst bölge) daha küçük ve daha az boşluk içerdiği görülmektedir. Besleyici altı mikroyapı görüntüsünün (Şekil 5.10b) besleyici bağlantı bölgesine

oranla (2 nolu alt bölge) (Şekil 5.10c) daha fazla boşluk içerdiği görülmektedir. Böylece katılma sırasında besleyicide oluşan çekinti oluşumunun parçaya ulaşmadığı görülmüştür. Tablo 5.3'te görüldüğü gibi Besleyici metalinin gömleğe temas eden bölgesinin (3 nolu bölgede) farklı yerlerinden alınan mikroyapı görüntüleri incelendiğinde birbirine benzer boyutlarda boşlukların olduğu görülmektedir (Şekil 5.10d ve Şekil 5.10e).

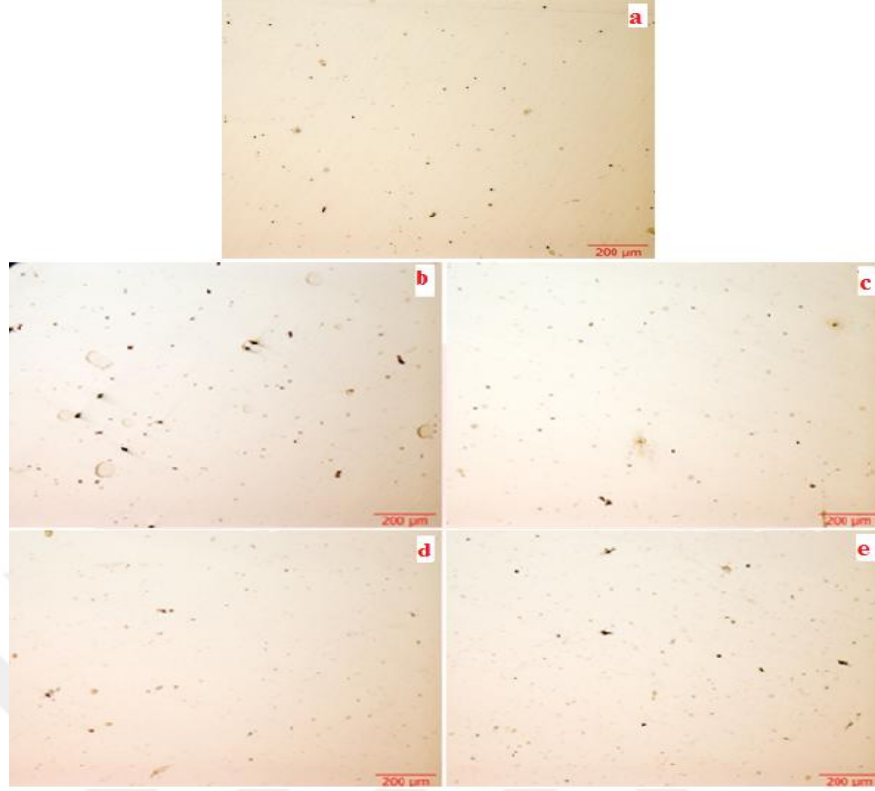


Şekil 5.10 AISI 4130-1 deneme dökümünde orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak üretilen döküm parçası ve besleyici metalinin mikroyapı görüntüsü a) 1 nolu bölge, b) 2 nolu üst bölge, c) 2 nolu alt bölge, d) 3 nolu besleyici gömleğe temas eden yüzey, e) 3 nolu iç kısım (50 büyütme)

Tablo 5.3 Orta ekzotermik besleyici gömlek kullanılan döküm metalinin mikroyapı görüntülerinin kantitatif analizleri

| | Ortalama hata çapı (μm) | Hata oranı (%) |
|--|--|-----------------------|
| 1 nolu bölge | 4,2939 | 0,1225 |
| 2 nolu üst bölge | 7,3268 | 0,8222 |
| 2 nolu alt bölge | 2,7156 | 0,0519 |
| 3 nolu besleyici gömleğe temas eden kısım | 2,1461 | 0,3238 |
| 3 nolu iç kısım | 5,7007 | 0,2403 |

AISI 4130-1 yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılan çalışmada hazırlanan numunelerin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde 1 nolu bölge mikroyapı görüntüsünün 2 nolu üst bölge 2 nolu alt bölge ve 3 nolu bölge mikroyapı görüntülerine kıyasla daha küçük ve daha az boşluk içerdiği görülmektedir (Şekil 5.11). Tablo 5.4'te görüldüğü gibi besleyici altı mikroyapı görüntüsünün besleyici bağlantı bölgesine oranla daha fazla ve daha büyük boşluk içerdiği görülmektedir (Şekil 5.11b ve Şekil 5.11c). Orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek çalışmaları sonucunda görülen mikroyapı görüntülerine benzer olarak yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlekler ile yapılan çalışmalardaki mikroyapı görüntülerinin katılaşma sırasında besleyicide çekinti oluşumunun döküm parçasına etkilediği söylenebilir. Besleyici gömleğe temas eden bölgenin mikroyapı görüntüsü ile iç kısmın mikroyapı görüntüsü karşılaştırıldığında benzer boşluk görüntülerinin olduğu görülmektedir (Şekil 5.11d ve Şekil 5.11e). Besleyici gömleğe temas eden bölgeye kıyasla besleyicinin iç kısım bölgesi daha fazla boşluk içerdiği belirlenmiştir (Şekil 5.11d ve Şekil 5.11e).



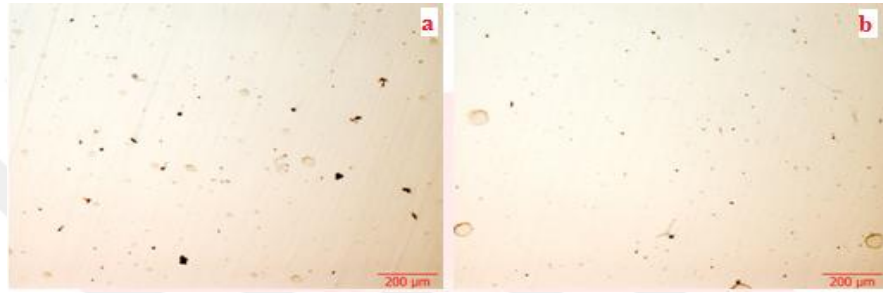
Şekil 5.11 AISI 4130-1 deneme dökümünde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak üretilen döküm parçası ve besleyici metalinin mikroyapı görüntüsü a) 1 nolu bölge, b) 2 nolu üst bölge, c) 2 nolu alt bölge, d) 3 nolu besleyici gömleğe temas eden yüzey, e) 3 nolu iç kısım (50 büyütme)

Tablo 5.4 Yüksek ekzotermik besleyici gömlek kullanılan döküm metalinin mikroyapı görüntülerinin kantitatif analizleri

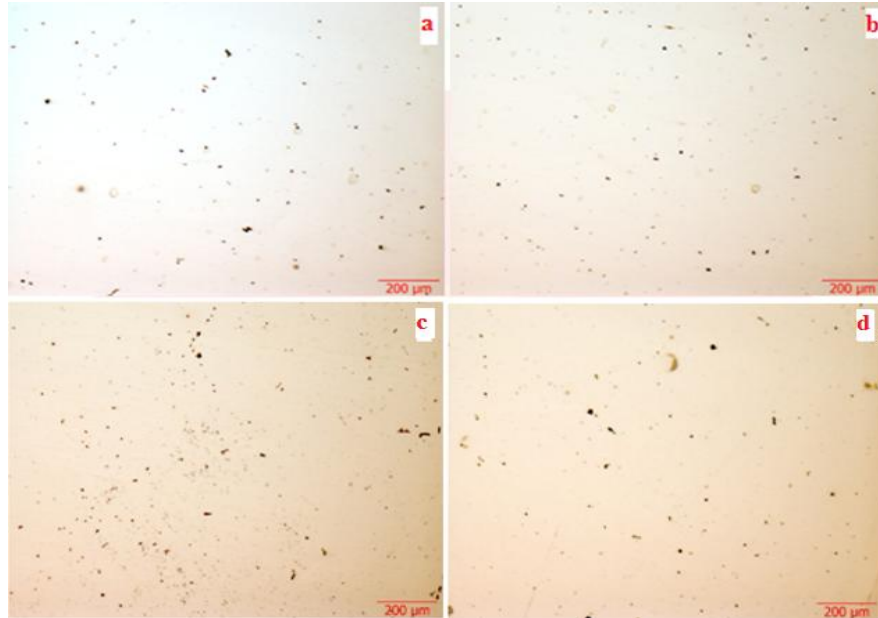
| | Ortalama hata çapı (µm) | Hata oranı (%) |
|--|--------------------------------|-----------------------|
| 1 nolu bölge | 4,9634 | 0,2249 |
| 2 nolu üst bölge | 5,7536 | 0,3201 |
| 2 nolu alt bölge | 5,0656 | 0,1273 |
| 3 nolu besleyici gömleğe temas eden kısım | 5,4186 | 0,3104 |
| 3 nolu iç kısım | 6,7651 | 1,0726 |

AISI 4130-2 deneme dökümünde orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılan çalışmada besleyici alt ve besleyici bağlantı bölgesi incelendiğinde besleyici altı mikroyapı görüntüsünün besleyici bağlantı bölgesine oranla daha fazla

boşluk içerdiği görülmektedir (Şekil 5.12a ve Şekil 5.12b). AISI 4130-2 yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılan çalışmada besleyici altı ve besleyici bağlantı bölgesinin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde boşluk yoğunluğunun nitel olarak benzer olduğu ancak besleyici altı olarak adlandırılan bölgede boşluk yoğunluğunun fazla olduğu görülmüştür. (Şekil 5.13a ve Şekil 5.13b). Besleyici gömleğe temas eden mikroyapı görüntüsü incelendiğinde boşluk yoğunluğunun besleyici altı ve besleyici bağlantı bölgesinden çekilen mikroyapı görüntülerine kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 5.13).



Şekil 5.12 AISI 4130-2 deneme dökümünde orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak üretilen döküm parçası ve besleyici metalinin mikroyapı görüntüsü a) 2 nolu üst bölge, b) 2 nolu alt bölge (50 büyütme)



Şekil 5.13 AISI 4130-2 deneme dökümünde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak üretilen döküm parçası ve besleyici metalinin mikroyapı görüntüsü a) 2 nolu üst bölge, b) 2 nolu alt bölge, c) 3 nolu besleyici gömleğe temas eden yüzey, d) 3 nolu iç kısım (50 büyütme)

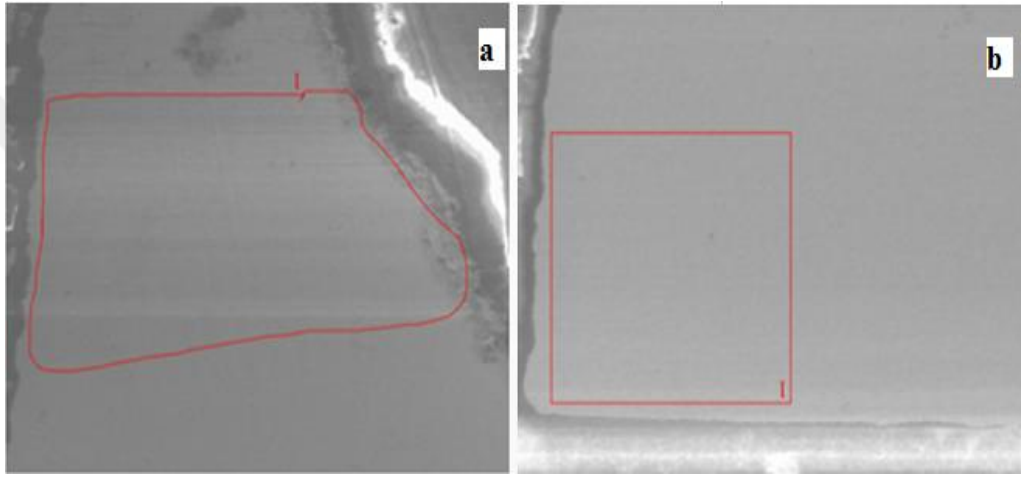
5.1.2.2 Kimyasal Analiz Sonuçları

AISI 4130-1 deneme dökümünde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılan döküm metalinin 1, 2 ve 3 nolu bölgelerinin kimyasal analiz sonuçları karşılaştırıldığında ekzotermik reaksiyonun temel girdilerinden ve gömlek bileşimindeki tek metalik eleman olan alüminyum elementi dışında bütün elementlerin birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir (Tablo 5.1). Besleyici metalinin 2 ve 3 numaralı bölgelerinin alüminyum miktarlarının parçadan alınan 1 numaralı bölgeye göre daha fazladır. AISI 4130-2 deneme dökümünden alınan numunelerin (1, 2 ve 3 nolu bölgeler) kimyasal analiz sonuçlarındaki element miktarlarının birbirine yakın olduğu belirlenmiştir AISI 4130-2 deneme dökümünde orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak üretilen parça ve besleyici metalinin (1, 2 ve 3 nolu bölgeler) kimyasal analiz sonuçları incelendiğinde her üç bölgenin element miktarlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir (Tablo 5.1).

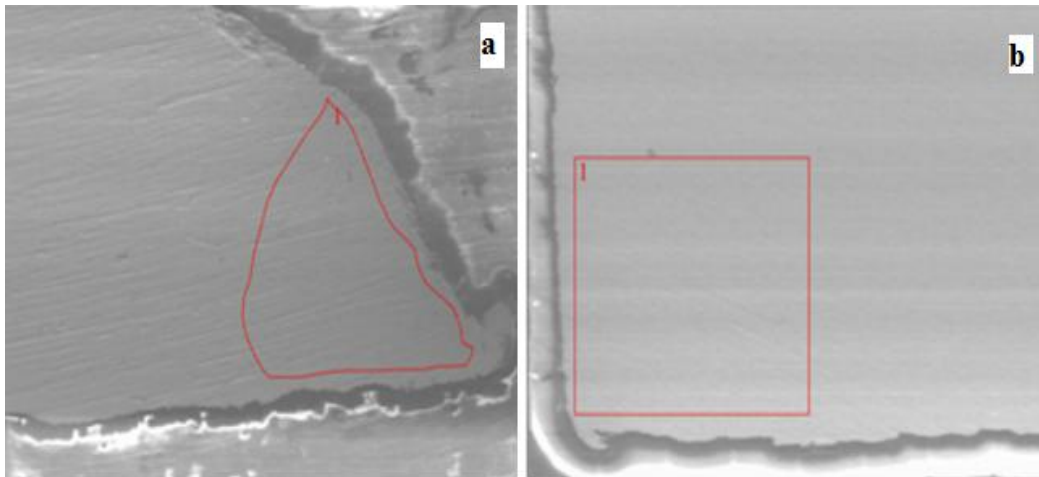
Tablo 5.5 Parça ve besleyicinin farklı bölgelerinden alınan numunelerin kimyasal analiz sonuçları

| Alaşım | %ağırlık | | | | | | | | |
|-------------------|----------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | C | Si | Mn | Cr | Mo | Ni | Al | S | P |
| AISI 4130-1-YE -1 | 0,28 | 0,47 | 0,87 | 0,73 | 0,16 | 0,027 | 0,007 | 0,005 | 0,015 |
| AISI 4130-1-YE -2 | 0,29 | 0,50 | 0,87 | 0,73 | 0,16 | 0,027 | 0,051 | 0,004 | 0,014 |
| AISI 4130-1-YE -3 | 0,27 | 0,49 | 0,88 | 0,73 | 0,16 | 0,027 | 0,044 | 0,003 | 0,016 |
| AISI 4130-1-OE -1 | 0,28 | 0,48 | 0,88 | 0,73 | 0,16 | 0,028 | 0,006 | 0,004 | 0,015 |
| AISI 4130-1-OE -2 | 0,28 | 0,50 | 0,88 | 0,73 | 0,16 | 0,028 | 0,007 | 0,005 | 0,016 |
| AISI 4130-1-OE -3 | 0,27 | 0,49 | 0,88 | 0,73 | 0,16 | 0,027 | 0,008 | 0,004 | 0,016 |
| AISI 4130-2-YE -2 | 0,25 | 0,42 | 0,99 | 0,62 | 0,16 | 0,026 | 0,026 | 0,003 | 0,013 |
| AISI 4130-2-YE -3 | 0,25 | 0,42 | 0,95 | 0,60 | 0,15 | 0,026 | 0,026 | 0,002 | 0,010 |
| AISI 4130-2-OE -2 | 0,27 | 0,44 | 0,98 | 0,61 | 0,16 | 0,027 | 0,026 | 0,002 | 0,012 |
| AISI 4130-2-OE -3 | 0,24 | 0,42 | 0,97 | 0,61 | 0,16 | 0,026 | 0,006 | 0,001 | 0,011 |

Deneme dökümlerinde kullanılan yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin besleyici metali ile etkileşimini incelemek amacıyla her iki besleyici gömlek metalinden numuneler hazırlanarak EDS analizi yapılmıştır (Şekil 4.3 3 nolu bölge). EDS analizinde yararlanılan görüntüler Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te gösterilen kırmızı çizgilerin içinde kalan bölgelerdir. Yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleğin iç kısmı ile besleyici gömleğe temas eden bölge arasındaki alüminyum farkı % 0,059 iken orta ekzotermik özellikli besleyici gömlekte bu oran % 0,269'dur (Tablo 5.6).



Şekil 5.14 AISI 4130-1 deneme dökümü yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek metali SEM görüntüsü a) 3 nolu bölge besleyici gömleğe temas eden kısım, b) 3 nolu bölge besleyici gömleğe temas eden iç kısım



Şekil 5.15 AISI 4130-1 deneme dökümü orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek metali SEM görüntüsü a) 3 nolu bölge besleyici gömleğe temas eden kısım, b) 3 nolu bölge besleyici gömleğe temas eden iç kısım

Tablo 5.6 AISI 4130 alaşımlı besleyici metallerinin EDS sonuçları

| Besleyici Gömlek | 3 numaralı bölge | | | | | |
|------------------|------------------------------------|------------------|--|----------------|------------------|--|
| | Besleyici gömleğe temas eden bölge | | | İç kısım | | |
| AISI 4130-1-OE-1 | <i>Element</i> | <i>% ağırlık</i> | | <i>Element</i> | <i>% ağırlık</i> | |
| | Fe | 96,145 | | Fe | 97,192 | |
| | Ni | 0,697 | | Ni | 0,966 | |
| | Al | 0,208 | | Al | 0,149 | |
| | S | 0,000 | | S | 0,000 | |
| | P | 0,450 | | P | 0,190 | |
| | Mo | 2,500 | | Mo | 1,503 | |
| AISI 4130-1-YE-1 | <i>Element</i> | <i>% ağırlık</i> | | <i>Element</i> | <i>% ağırlık</i> | |
| | Fe | 95,493 | | Fe | 98,169 | |
| | Ni | 0,607 | | Ni | 0,534 | |
| | Al | 0,321 | | Al | 0,052 | |
| | S | 0,000 | | S | 0,000 | |
| | P | 0,375 | | P | 0,072 | |
| | Mo | 3,204 | | Mo | 1,173 | |

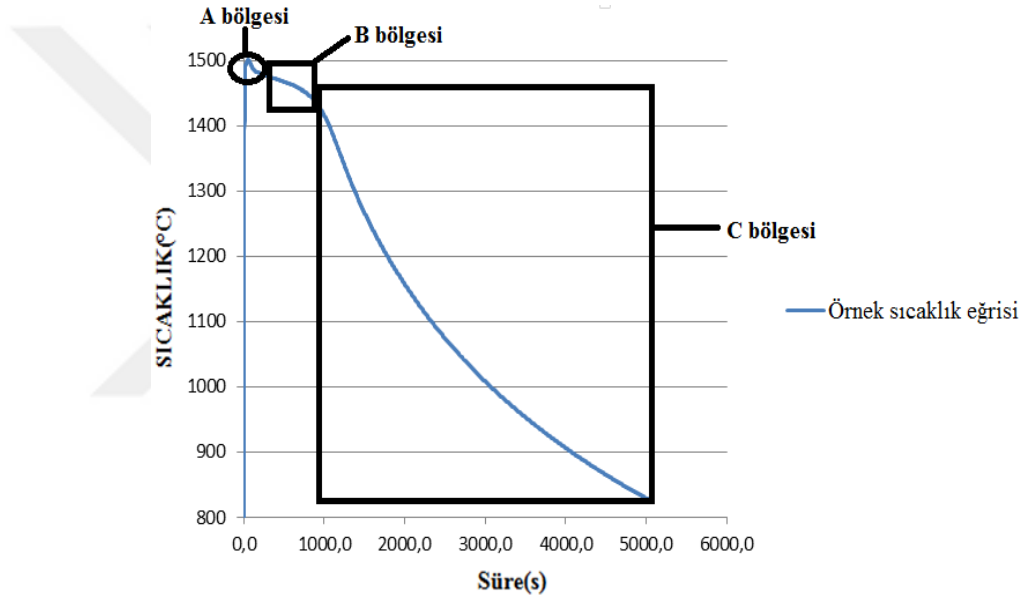
Besleyici gömlek bileşiminde ekzotermik bileşen olarak bulunan metalik alüminyumun döküm metalindeki varlığı gömlek ve metal arasındaki etkileşimin en önemli kanıtıdır. Fakat alüminyum metalinin çelik alaşımları için genellikle oksit giderici olarak kullanılması ve yapıya katılmasının faz yapısını olumsuz etkilemediği bilinmektedir (Zhang ve Chou, 2015). Ekzotermik besleyici gömleklerin iç kısım ile besleyici gömleğe temas eden bölgenin Al oranları arasındaki farkın ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmüştür.

5.2 Deneme Dökümleri

Benzeşim programında kullanılan besleyici gömlekler ile deneme dökümünde kullanılan besleyici gömleklerin uyumluluğunu irdelemek amacıyla belirli bölgelerden sıcaklık ölçümleri alınmıştır. AISI 4130, A128M-93-A, A128M-93-C ve CF-8M olmak üzere dört farklı alaşımda uygulanan besleyici gömleklerin farklı bölgelerinden ölçülen sıcaklıkların süreye bağlı değişimi Şekil 5.16 ile Şekil 5.21 arasında gösterilmektedir.

Döküm alaşımlarının katılaşması sırasında besleyicilerin aktif olarak rol aldıkları kısım, sıvı metal hareketinin olduğu sıvı büzülmesi ve sıvı-katı büzülmesinin olduğu bölümlerdir (Campbell, 2003). Bu nedenle soğuma eğrilerinde sıvının soğuması ve sıvı-katı aralığında soğuma incelenmiştir (Şekil 5.16 A ve B bölgesi).

Şekil 5.16'da C bölgesi olarak belirtilen katı büzülmesi olarak ifade ettiği bölgedeki soğuma hızlarının hesaplanmasındaki amaç yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin belirtilen bölgede sıcaklık davranışlarının ortaya konulmasıdır (Campbell, 2003).



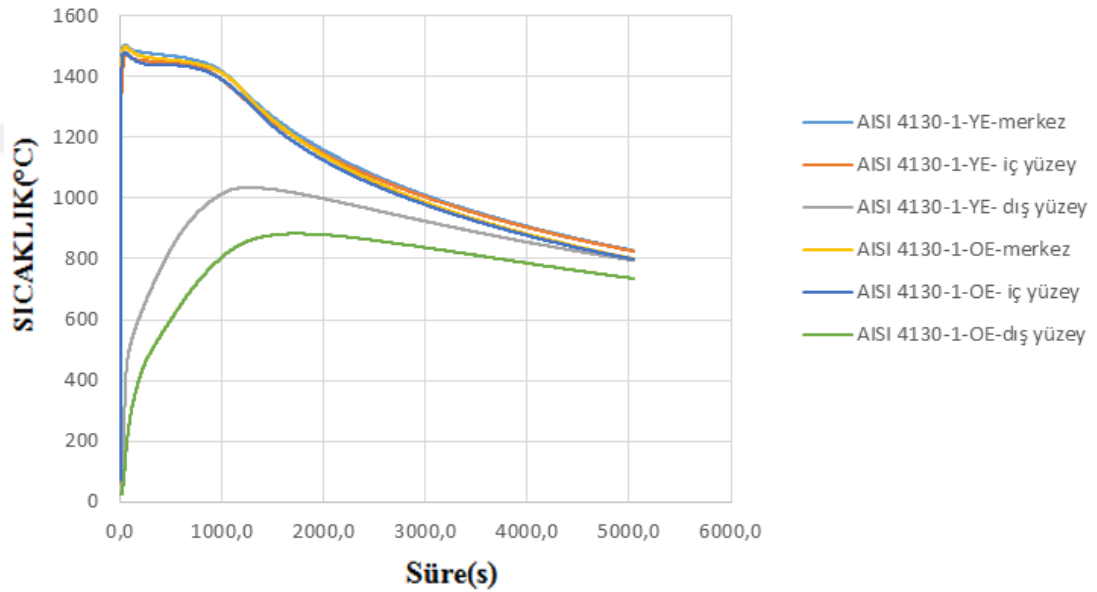
Şekil 5.16 Soğuma hızlarının hesaplandığı bölgeler

Deneme dökümleriyle aynı alaşım ve döküm şartları benzeşim programında seçilerek yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerden ölçülen soğuma eğrileri karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda döküm benzeşim programında besleyici gömlek parametreleri değiştirilmiştir.

5.2.1 Deneme Dökümlerinin Sıcaklık-Süre Grafikleri

Deneme dökümleri socunda oluşturulan soğuma eğrileri merkez, iç yüzey, dış yüzey olmak üzere 3 bölge için karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. AISI 4130-1

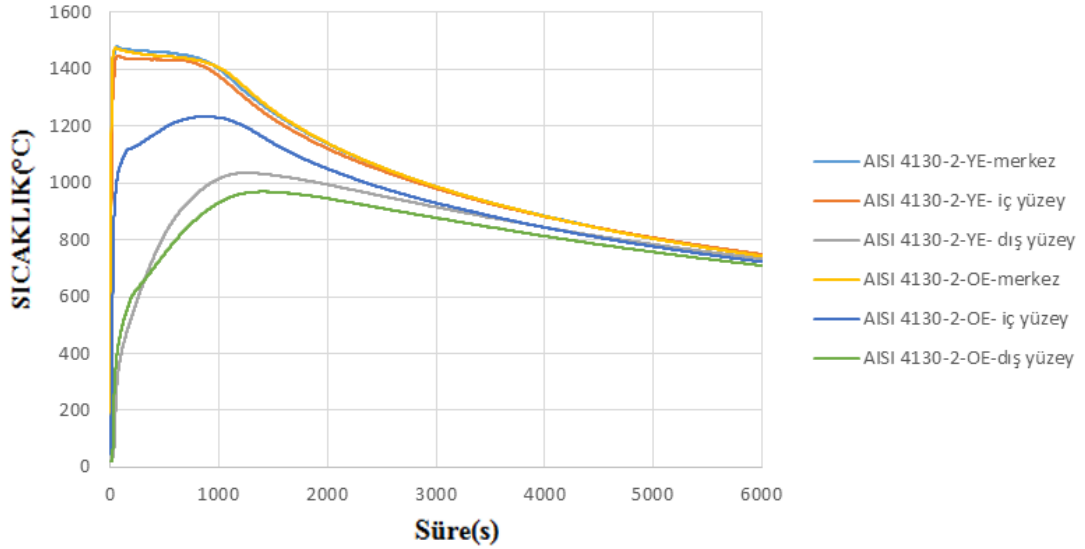
deneme dökümü sıcaklık-süre grafiği Şekil 5.17’de gösterilmektedir. Yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleğin orta ekzotermik özellikli besleyiciye göre iki bölgeden (merkez, iç yüzey) ölçülen sıcaklıkların daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Tablo 5.7). Yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin merkez ile iç yüzey sıcaklıklarının birbirine yakın olduğu ve dış yüzey sıcaklıklarının daha düşük olduğu belirlenmiştir. Tablo 5.7 incelendiğinde merkez ve iç yüzey sıcaklıkları 1473°C ile 1500°C arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 5.17 AISI 4130-1 deneme dökümü sıcaklık-süre grafiği

Şekil 5.18’de gösterilen AISI 4130-2 deneme dökümünün sıcaklık değerleri incelendiğinde merkez ve dış yüzey sıcaklık değerlerinin AISI 4130-1 deneme dökümü sıcaklık değerlerine yakın olduğu görülmüştür. 3 farklı bölgeden ölçülen sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında en yüksek sıcaklık değerleri merkez ölçümlerde elde edilmiştir. Orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğin iç yüzey sıcaklık ölçümleri incelendiğinde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleğin iç yüzeyine göre daha düşük değerlerde kaldığı görülmektedir (Şekil 5.18). AISI 4130-1 ve AISI 4130-2 deneme dökümünde kullanılan orta ekzotermik karakterli besleyici gömleklerin iç yüzey sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında AISI 4130-2 deneme dökümünde ölçülen sıcaklık değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir (Tablo 5.7). Deneme dökümleri sırasında termal çiflerin hareketini önlenmeye çalışılmasına rağmen orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğin iç yüzey sıcaklık ölçümü için

kullanılan termal çiftin bir miktar geriye kayarak besleyici gömleğin merkezinden uzaklaştığı ve bunun sonucunda ölçülen sıcaklık değerlerinin düştüğü düşünülmektedir (Şekil 5.18).



Şekil 5.18 AISI 4130-2 deneme dökümü sıcaklık-süre grafiği

Tablo 5.7'de ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri incelendiğinde AISI 4130-1 deneme dökümünde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleğin eriştiği en yüksek sıcaklık değerinin orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğin eriştiği en yüksek sıcaklık değerinden 4°C daha büyük olduğu görülmektedir. Benzer şekilde AISI 4130-2 isimli deneme dökümünde kullanılan yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleğin eriştiği en yüksek sıcaklık değerinin orta ekzotermik özellikli besleyiciye göre 7°C daha fazla olduğu görülmektedir. Yolluk tasarımı sırasında gömleklerin aynı sürede dolması hedeflendiği için oluşan sıcaklık farklarının göz ardı edilebilir seviyelerde olduğu görülmüştür.

AISI 4130-1 deneme dökümünde sıvı metalin soğuma hızları karşılaştırıldığında orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğin merkez ve iç yüzey sıcaklık ölçümleri esas alınarak hesaplanan soğuma hızlarının (sıvı metalin ve sıvı-katı metalin soğuma hızı) yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Buradan yalıtım elemanı oranının fazla olduğu orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğin yalıtım özelliğinin daha iyi olduğu çıkarılabilir.

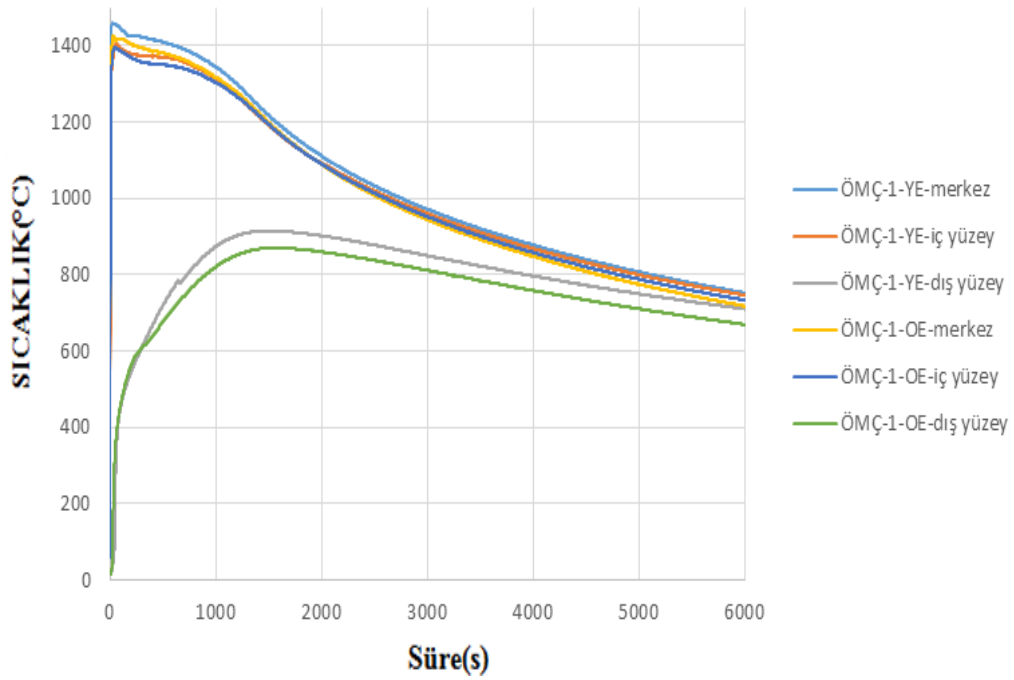
AISI 4130-2 deneme dökümünde sıvı metalin soğuma hızı orta ekzotermik özellikli besleyici gömlelerde daha yavaştır. Hesaplanan soğuma hızları AISI 4130-1 deneme dökümü ile benzerlik göstermektedir (Tablo 5.7). AISI 4130-1 ve AISI 4130-2 deneme dökümlerinin sıvı-katı aralığındaki sıcaklık davranışları karşılaştırıldığında her iki besleyici gömlek türünün sıcaklık-süre grafiğinden hesaplanan eğimin sifıra yakın olduğu görülmektedir. Bu da seçilen alaşımın ötektığe yakın bir alaşım olduğu anlamına gelir (Hardin ve diğer., 2013).

Tablo 5.7 AISI 4130 alaşımı seçilerek yapılan deneme dökümlerinde ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri ve hesaplanan soğuma hızları

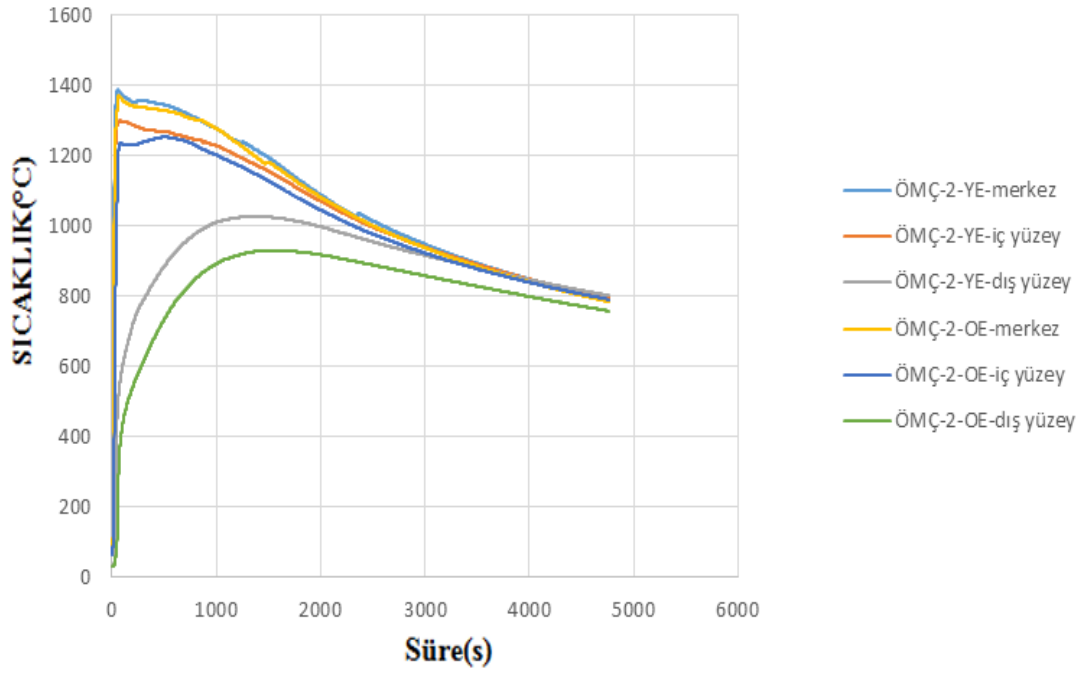
| Deneme Dökümü | Besleyici | Ölçülen en yüksek sıcaklık (°C) | Sıvı metalin soğuma hızı (°C/s) | Sıvı katı aralığındaki soğuma hızı (°C/s) | Katı metalin soğuma hızı (°C/s) |
|---------------|--------------|---------------------------------|---------------------------------|---|---------------------------------|
| AISI-4130-1 | YE(merkez) | 1505 | 0,242 | 0,050 | 0,243 |
| AISI-4130-1 | YE(iç yüzey) | | 0,267 | 0,021 | 0,250 |
| AISI-4130-1 | OE(merkez) | 1497 | 0,231 | 0,042 | 0,248 |
| AISI-4130-1 | OE(iç yüzey) | | 0,190 | 0,019 | 0,232 |
| AISI-4130-2 | YE(merkez) | 1480 | 0,220 | 0,028 | 0,247 |
| AISI-4130-2 | YE(iç yüzey) | | 0,156 | 0,009 | 0,253 |
| AISI-4130-2 | OE(merkez) | 1473 | Belirlenemedi | 0,044 | 0,252 |
| AISI-4130-2 | OE(iç yüzey) | | Belirlenemedi | 0,019 | 0,200 |

A128M-93-A(ÖMÇ-1), A128M-93-C(ÖMÇ-2) östenitik mangan çeliği alaşımı seçilerek yapılan deneme dökümlerinden ölçülen sıcaklıkların süre bağlı değişim

grafikleri Şekil 5.19 ve Şekil 5.20 gösterilmektedir. Grafikler incelendiğinde deneme dökümlerinde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin her üç bölgesinden ölçülen sıcaklık değerlerinin orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. ÖMÇ-1 ve ÖMÇ-2 merkez sıcaklık ölçümlerinin birbirleri ile benzer olduğu görülmektedir. ÖMÇ-2 deneme dökümünde ölçülen iç yüzey sıcaklık değerlerinin ÖMÇ-1 deneme dökümünde ölçülen sıcaklık değerlerine kıyasla daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. AISI 4130-2 deneme dökümünde orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğin iç yüzey ölçümüne benzer şekilde termal çiftlerin besleyici merkezinden uzaklaşarak belirlenen iç yüzey ölçüm bölgesinin dışına çıkması sonucunda sıcaklık değerlerinde düşüslere sebep olduğu düşünülmektedir (Şekil 5.20). ÖMÇ-2 deneme dökümünde yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin dış yüzey sıcaklık ölçümleri arasındaki farkın ÖMÇ-1'e göre daha fazla olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.19 ÖMÇ-1 deneme dökümü sıcaklık-süre grafiği



Şekil 5.20 ÖMÇ-2 deneme dökümü sıcaklık-süre grafiği

Tablo 5.8’de östenitik mangan çeliği alaşımının deneme dökümünde kullanılan besleyici gömleklerin farklı bölgeleri için ölçülen en yüksek sıcaklıkları ve soğuma hızları gösterilmektedir. Ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri incelendiğinde ÖMÇ-1 deneme dökümündeki yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleğin orta ekzotermiğe göre 34°C daha yüksek sıcaklığa ulaştığı, ÖMÇ-2 deneme dökümünde ise ÖMÇ-1 dökümüne benzer şekilde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleğin 18°C daha yüksek sıcaklığa ulaştığı görülmektedir. ÖMÇ-1 ve ÖMÇ-2 deneme dökümlerinde kullanılan yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin merkez ve iç yüzey bölgelerinden ölçülen en yüksek sıcaklık verileri karşılaştırıldığında aradaki farkın sırasıyla 72°C ve 46°C olduğu görülmektedir (Tablo 5.8). Bunun sebebinin dökümhane şartlarında sıvı metalin potaya alınıp döküm işlemine başlamasına kadar geçen süreden kaynaklandığı söylenebilir. ÖMÇ-2 deneme dökümünde sıvı metalin kalıp doldurma süresinin uzun olması nedeniyle ölçülen merkez ve iç yüzey sıcaklık değerlerinin düşük kaldığı düşünülmektedir (Tablo 5.8).

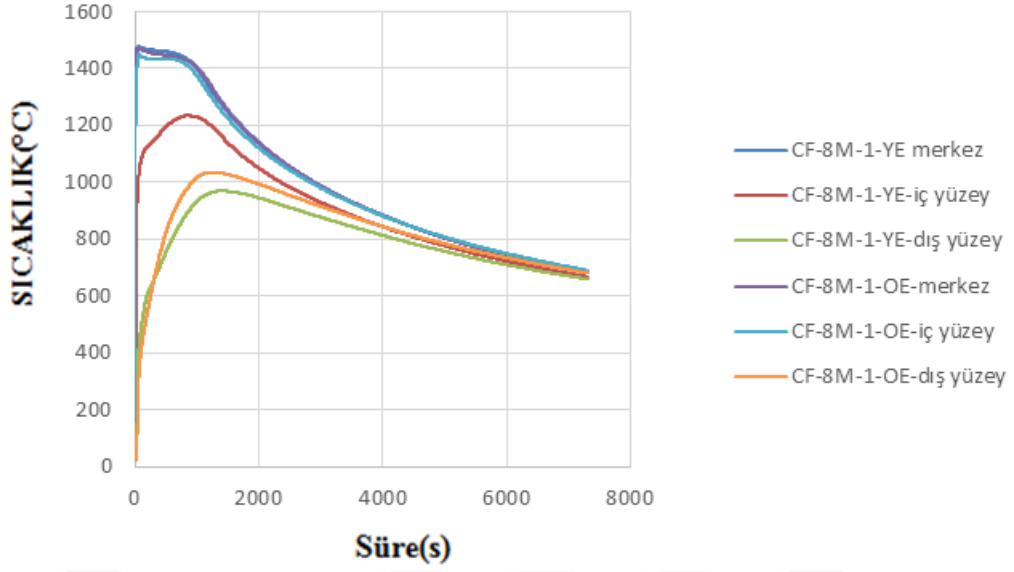
ÖMÇ-1 ve ÖMÇ-2 deneme dökümlerinde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin daha hızlı soğuma davranışı gösterdiği belirlenmiştir. AISI 4130 alaşımı

sonuçlarına benzer şekilde sıvı-katı aralığında her iki besleyici türünün eğimlerinin sıfır değerine yakın olduğu görülmektedir (Tablo 5.8).

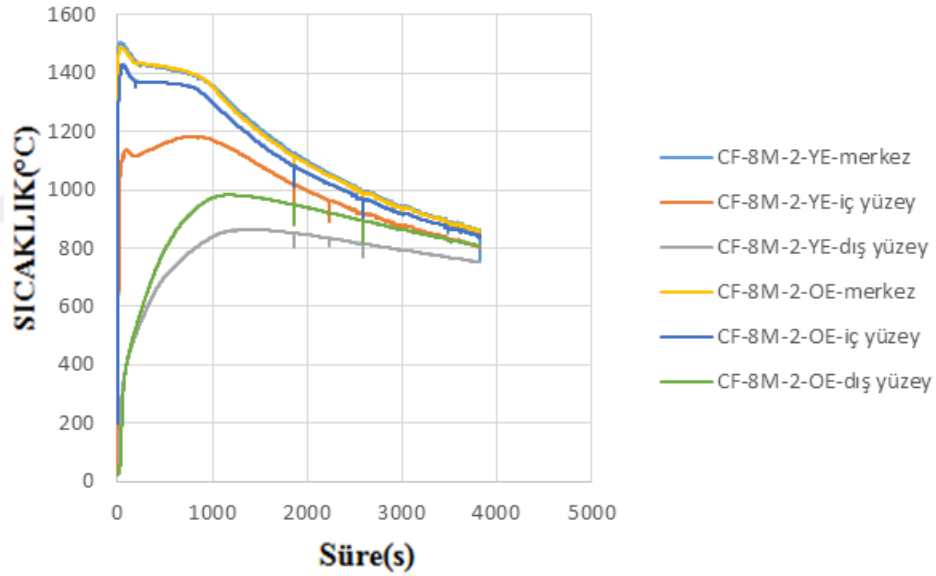
Tablo 5.8 Östenitik mangan çeliği alaşımı seçilerek yapılan deneme dökümlerinde ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri ve soğuma hızları

| Deneme Dökümü | Besleyici | Ölçülen En yüksek sıcaklık (°C) | Sıvı metalin soğuma hızı (°C/s) | Sıvı katı aralığındaki soğuma hızı (°C/s) | Katı metalin soğuma hızı (°C/s) |
|---------------|--------------|---------------------------------|---------------------------------|---|---------------------------------|
| ÖMÇ-1 | YE(merkez) | 1459 | 0,254 | 0,041 | 0,214 |
| ÖMÇ-1 | YE(iç yüzey) | | 0,210 | 0,029 | 0,215 |
| ÖMÇ-1 | OE(merkez) | 1425 | 0,197 | 0,068 | 0,204 |
| ÖMÇ-1 | OE(iç yüzey) | | 0,167 | 0,036 | 0,196 |
| ÖMÇ-2 | YE(merkez) | 1387 | 0,241 | 0,060 | 0,172 |
| ÖMÇ-2 | YE(iç yüzey) | | 0,183 | 0,069 | 0,155 |
| ÖMÇ-2 | OE(merkez) | 1369 | 0,230 | 0,053 | 0,186 |
| ÖMÇ-2 | OE(iç yüzey) | | Belirlenemedi | 0,081 | 0,137 |

CF-8M östenitik paslanmaz çelik alaşımı seçilerek yapılan deneme dökümlerinden ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.21 ve Şekil 5.22 gösterilmektedir. Sıcaklık ölçümleri AISI 4130 ve östenitik mangan çeliği alaşımından alınan sıcaklık değerleri ile benzer şekilde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin sıcaklık değerlerinin orta ekzotermik besleyici gömleklerin sıcaklık değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Her iki deneme dökümünde iç yüzey ölçümlerinden alınan sıcaklık değerlerindeki düşmelerden dolayı termal çiftlerin merkezden uzaklaştığı düşünülmektedir.



Şekil 5.21 CF-8M-1 deneme dökümü sıcaklık-süre grafiği



Şekil 5.22 CF-8M-2 deneme dökümü sıcaklık-süre grafiği

Tablo 5.9’de östenitik paslanmaz çelik alaşımının deneme dökümünde kullanılan besleyici gömleklerin farklı bölgeleri için ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri ve soğuma hızı değerleri gösterilmektedir. Sonuçlar incelediğinde, önceki alaşımların sonuçlarına benzer şekilde bu çalışmada da yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin en yüksek sıcaklık değerlerinin daha fazla olduğu görülmektedir (Tablo 5.9). Sıvı metalin soğuma hızları incelendiğinde CF-8M-1 ve CF-8M-2 deneme dökümlerinde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin orta ekzotermik

özelliikli besleyici gömleklere göre daha hızlı soğuma davranışı gösterdiği tespit edilmiştir (Tablo 5.9). AISI 4130 alaşımı ve östenitik mangan çeliği alaşımları (ÖMÇ-1 ve ÖMÇ-2) için yapılan ölçümlere benzer şekilde östenitik paslanmaz çelik dökümlerinde de sıvı-katı aralığında her iki besleyici gömleğin içindeki metalin soğuma eğrilerinin eğimlerinin sıfıra yakın olduğu belirlenmiştir (Tablo 5.9). CF-8M-1 deneme dökümünde yüksek ekzotermik besleyici gömlek ile orta ekzotermik besleyici gömleklerin ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri arasındaki farkın 8°C, CF-8M-2 için ise 17°C olduğu tespit edilmiştir. Sıvı metali soğuma hızları incelendiğinde orta ekzotermik özelliikli besleyici gömlekler daha yavaş soğuma davranışı sergiledikleri görülmüştür (Tablo 5.9). Böylece orta ekzotermik özelliikli besleyici gömleklerin ısı yalıtımının yüksek ekzotermik besleyici gömleklerden daha iyi olduğu söylenebilir (Hardin, 2013).

Tablo 5.9 Östenitik paslanmaz çelik alaşımı seçilerek yapılan deneme dökümlerinde ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri ve soğuma hızları

| Deneme Dökümü | Besleyici | Ölçülen en yüksek sıcaklık (°C) | Sıvı metalin soğuma hızı (°C/s) | Sıvı katı aralığındaki soğuma hızı (°C/s) | Katı metalin soğuma hızı (°C/s) |
|---------------|--------------|---------------------------------|---------------------------------|---|---------------------------------|
| CF-8M-1 | YE(merkez) | 1387 | 0,251 | 0,064 | 0,160 |
| CF-8M-1 | YE(iç yüzey) | | 0,220 | 0,021 | 0,132 |
| CF-8M-1 | OE(merkez) | 1369 | 0,191 | 0,043 | 0,179 |
| CF-8M-1 | OE(iç yüzey) | | Belirlenemedi | 0,062 | 0,141 |
| CF-8M-2 | YE(merkez) | 1503 | 0,444 | 0,068 | 0,266 |
| CF-8M-2 | YE(iç yüzey) | | 0,535 | 0,015 | 0,263 |
| CF-8M-2 | OE(merkez) | 1486 | 0,355 | 0,053 | 0,297 |
| CF-8M-2 | OE(iç yüzey) | | Belirlenemedi | 0,090 | 0,224 |

Şekil 5.16'da her alaşım için hangi bölgelerin soğuma hızlarının hesaplandığı temsili olarak gösterilmektedir. Her üç alaşımda ölçülen sıcaklık değerleri incelendiğinde; sıvı metalin katılaşması sırasında sıcaklığın azaldığı, sıvı-katı

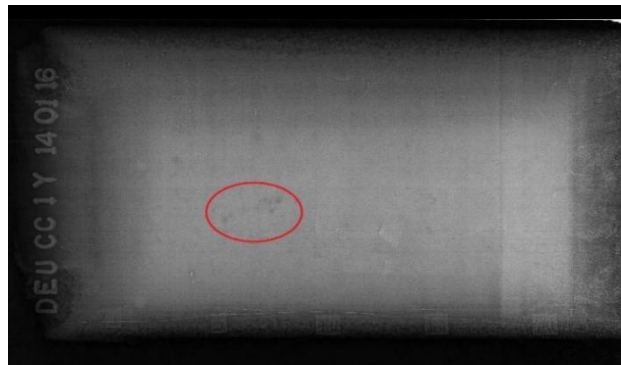
aralığında ise belli bir süre sabit olarak ilerledikten sonra katı metalin soğuması sırasında tekrar azalma davranışı gösterdiği yukarıdaki grafiklerle (Şekil 5.17-Şekil 5.22) ortaya konulmuştur.

Her üç alaşım için Şekil 5.16'da A bölgesi olarak belirtilen bölgede sıcaklık artışının belirgin bir şekilde görülmemesinden dolayı sıvı metalin soğuma hızları hesaplanamamıştır ve Tablo 5.3, Tablo 5.4 ve Tablo 5.5'te "Belirlenemedi" olarak adlandırılmıştır.

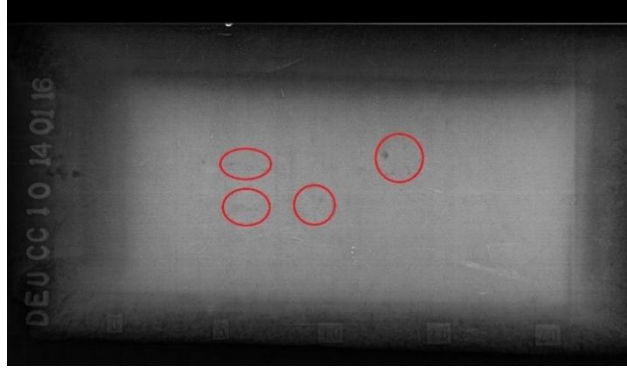
5.2.2 Döküm Parçalarının Çekinti Sonuçları

Döküm parçasının çekinti seviyesini ve besleyici gömleklerin besleme mesafelerini belirlemek için gama radyografi kontrol testleri yapılmıştır.

Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'te AISI 4130 alaşımlı döküm denemesinin çekinti görüntüleri, Şekil 5.29'de referans kataloğun çekinti görüntüleri verilmektedir. Şekil 5.23 ile Şekil 5.29'un karşılaştırılması sonucunda yüksek ekzotermik özellikli besleyici kullanılarak dökülen parçada çekinti hatasının giriş yolluğundan uzaklığı 50-100 mm arasında olup ASTM-E186 referans kataloğuna göre 2 seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.24 ile Şekil 5.29'un karşılaştırılması sonucunda; orta ekzotermik özellikli besleyici kullanılarak dökülen parçada çekinti hatasının giriş yolluğundan uzaklığı 50-100 mm ve 100-150 mm arasında olup ASTM-E186 referans kataloğuna göre 1 seviyesinde olduğu belirlenmiştir.

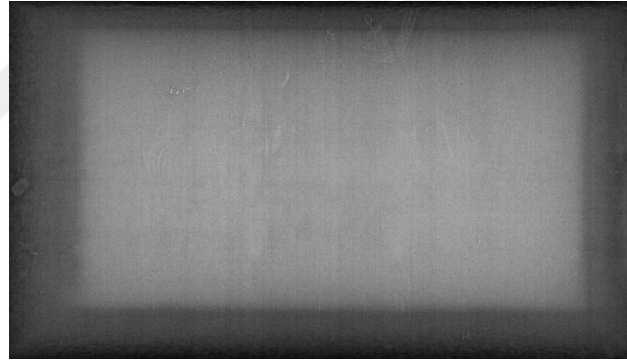


Şekil 5.23 Yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak dökülen AISI 4130 alaşımlı parçanın radyografi görüntüsü

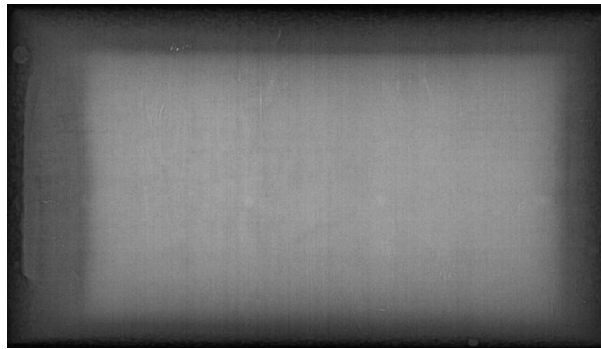


Şekil 5.24 Orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak dökülen AISI 4130 alaşımlı parçanın radyografi görüntüsü

ASTM-A128M-93A alaşımlı yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömlekler kullanılarak dökülen parçaların radyografi görüntüleri sırasıyla Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da gösterilmektedir. Her iki döküm parçasında çekinti hatası tespit edilmemiştir.

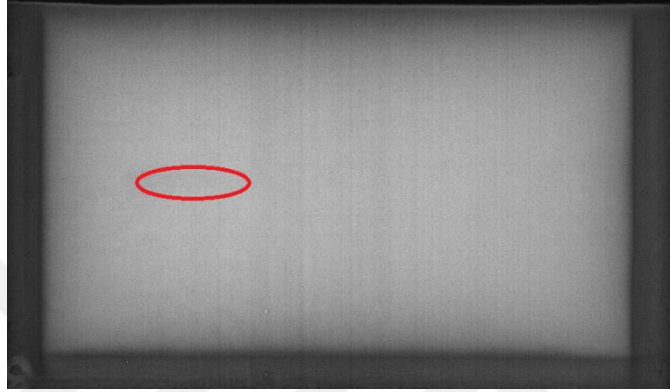


Şekil 5.25 Yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak dökülen ASTM-A128M-93A alaşımlı parçanın radyografi görüntüsü

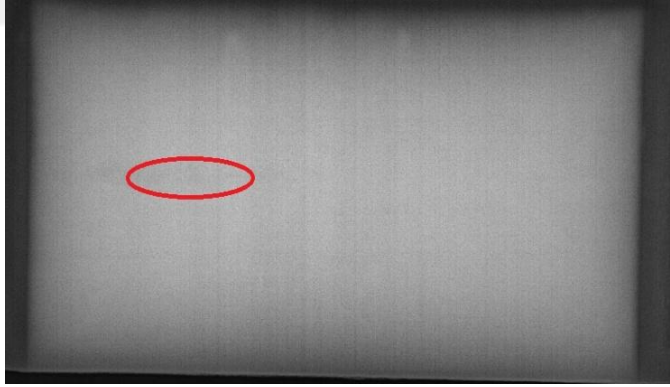


Şekil 5.26 Orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak dökülen ASTM-A128M-93A alaşımlı parçanın radyografi görüntüsü

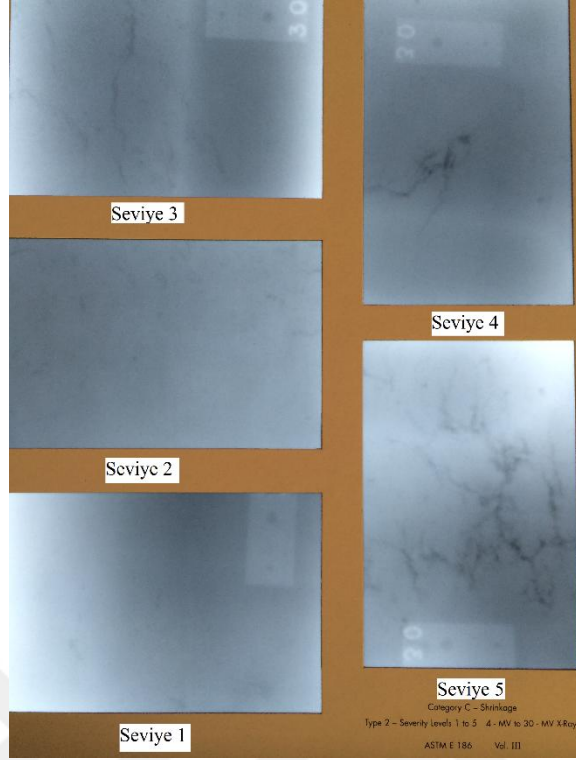
CF-8M alaşımlı ylık ve orta ekzotermik ozellikli besleyici g6mlekler kullanılarak d6k6len parçaların radyografi g6r6nt6leri sırasıyla Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'de g6sterilmektedir. Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'in ayrı ayrı Şekil 5.29 ile karşılaştırılması sonucunda her iki besleyici g6mlek kullanılarak d6k6len parçaların çekinti b6lgeleri giriş yolluğundan 50-100 mm uzaklıkta olduğu ve çekinti seviyelerinin 2 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.27 Ylık ekzotermik ozellikli besleyici g6mlek kullanılarak d6k6len CF-8M alaşımlı parçanın radyografi g6r6nt6s6



Şekil 5.28 Orta ekzotermik ozellikli besleyici g6mlek kullanılarak d6k6len CF-8M alaşımlı parçanın radyografi g6r6nt6s6



Şekil 5.29 ASTM-E186 referans kataloğu (ASTM E186-Volume 3, 1998)

Çekinti oluşumunun alaşıma göre değişiklik göstermesi, katılaşma aralığı farklılığından kaynaklandığı söylenebilir. Literatürdeki benzer çalışmalarda çekinti oluşma durumu yüksek ve katılaşma aralığı dar olan düşük karbonlu çelik alaşımları seçilmektedir (Ou ve diğer., 2002; Carlson ve diğer., 2002).

5.3 Döküm Benzeşim Sonuçları

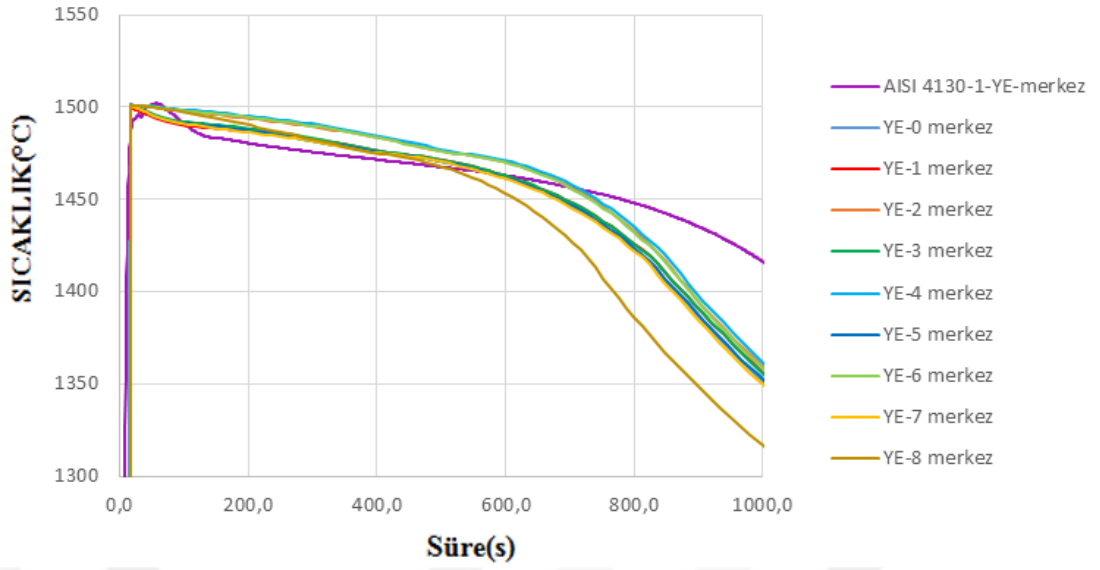
Deneme dökümlerinde kullanılan besleyici gömleklerin ekzotermik özellikleri gösterdiği DT-TG analiz sonuçları ve X ışınları kırınım sonuçları ile ortaya konulmuştur. Yapılan gömlek karakterizasyon çalışmaları ve deneme dökümleri dikkate alınarak NovaFlow&Solid benzeşim programında bulunan yüksek, orta ve exokal isimli besleyici gömleklerin özelliklerinde değişimler yapılmıştır. Benzeşim programlarında kullanılan besleyici gömleklerin deneme dökümlerinde kullanılan besleyici gömleklere benzer şekilde işlevini yerine getirip getirmediği irdelenmiştir. Benzeşim çalışmalarında deneme döküm çalışmalarında belirlenen bölgelerden

sıcaklıklar verileri alınmış ve sıcaklık-süre grafikleri çizilmiştir. Çizilen grafiklerin deneme dökümleri ile uyumluluğu incelemiştir.

5.3.1 Deneme Dökümlerinde ve Döküm Benzeşim Çalışmalarında Ölçülen Sıcaklıkların Karşılaştırılması

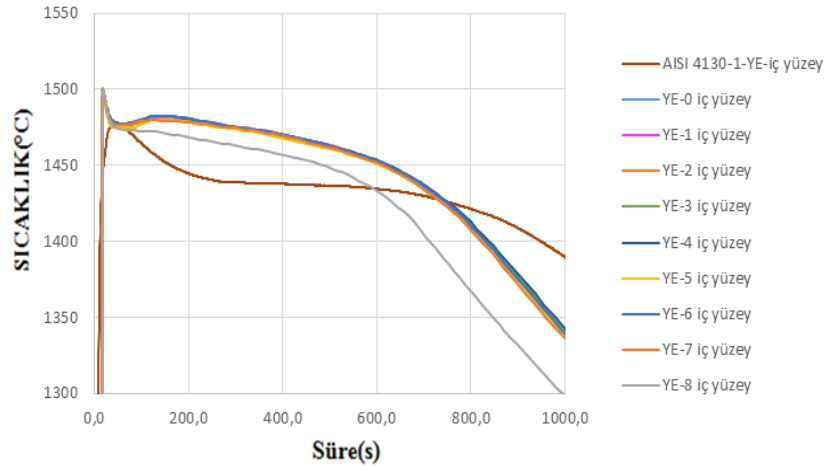
AISI 4130 alaşımı için, deneme dökümü ve parametreleri değiştirilmiş ekzotermik özellikli besleyici gömlekler seçilerek yapılan benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri Şekil 5.30-Şekil 5.38 arasında karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sıcaklık-süre grafiklerinden en yüksek sıcaklık değerleri, sıvı metalin soğuma hızı, sıvı-katı metalin soğuma hızı, liküdü ve solidüs sıcaklıkları ile bu noktalara ulaşma süresi bulunmuş ve deneme dökümünden hesaplanan sonuçlar ile karşılaştırılarak irdelenmiştir.

AISI 4130 alaşımı merkez bölgesinin benzeşim ve deneme dökümü sıcaklık-süre grafiği Şekil 5.30'da gösterilmektedir. Benzeşim ve deneme döküm sonuçları karşılaştırıldığında deneme dökümünde ölçülen en yüksek sıcaklık 60. saniyede, benzeşim çalışmalarında ise 20. saniyede görülmüştür. Bu farklılığın deneme dökümlerinde kullanılan termal çiftlerin tepkime süresinin benzeşim programının sıcaklık hesaplama hızına göre daha düşük kalmasından kaynaklanmaktadır. Ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri incelendiğinde benzeşim çalışmalarındaki bütün denemeler birbirine eşit olup 1501°C , deneme dökümünde ise bu değer 1505°C ' dir. Benzeşim çalışmalarında başlangıç sıcaklığının deneme dökümünde ölçülen en yüksek sıcaklık değerinin alınmasıyla ortaya çıkan 4°C 'lik fark göz ardı edilerek eşit kabul edilmiştir. Görülen en yüksek sıcaklık benzeşim programında likidüs bölgesine denk geldiği için sıvı metalin soğuma hızı, liküdüse sıcaklığı ve liküdüse ulaşma süresi belirlenememiştir (Ekler, Tablo 1). Şekil 5.30'da ilk 700 saniyede yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılan deneme dökümü sıcaklık ölçümü ile benzeşim çalışmaları sıcaklık ölçümleri arasındaki fark $5-30^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir. Genel eğri profili incelendiğinde benzeşim çalışmaları deneme dökümlerine göre daha hızlı soğuma davranışı gösterdiği görülmüştür (Ekler, Şekil 1).



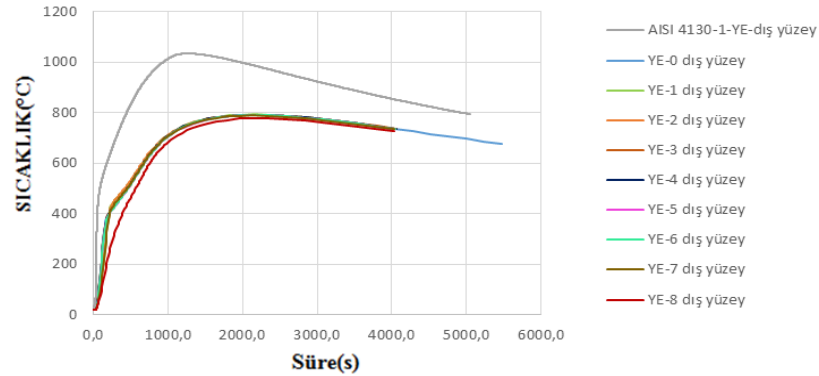
Şekil 5.30 AISI 4130 alaşımı merkez bölgesi, yüksek ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmaları sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16, A ve B bölgeleri)

AISI 4130 deneme dökümü iç yüzey bölgesinin sıcaklık-süre grafiği benzeşim çalışmaları ile karşılaştırıldığında deneme dökümünden ölçülen en yüksek sıcaklık değeri benzeşim çalışmaları en yüksek sıcaklık değerlerinden 22°C daha küçüktür (Şekil 5.31). Benzeşim eğrileri birbirine yakın olup sadece YE-8 olarak adlandırılan ateşleme sıcaklığı 900°C seçilen besleyici gömleğin sıcaklık davranışının farklı olduğu görülmektedir (Şekil 5.31). Merkez bölgesi karşılaştırmalarına benzer şekilde deneme dökümü ile benzeşim çalışmaları arasında ölçülen en yüksek sıcaklık süreleri, sıvı-katı metalin soğuma hızı ve solidüs sıcaklığına ulaşma süreleri farklıdır (Ekler, Tablo 2). Programın besleyici gömleğin çalışmasını benzetiminde gömlek reaksiyonları belirtilen sıcaklıklarda homojen ve metal sıcaklığından yüksek bir sıcaklığa çıkacak biçimde meydana geldiği görülmektedir. Fakat deneme dökümü ölçümlerinde reaksiyonun belirtilen sıcaklıklardan daha yüksek değerlerde ve ortaya çıkan ısının metal sıcaklığı arttırmadığı görülmüştür. Benzeşim sonuçlarındaki eğrilerde 200. saniyeye kadar görülen dalgalanmanın sebebinin söz konusu uyumsuzluk olduğu düşünülmektedir.



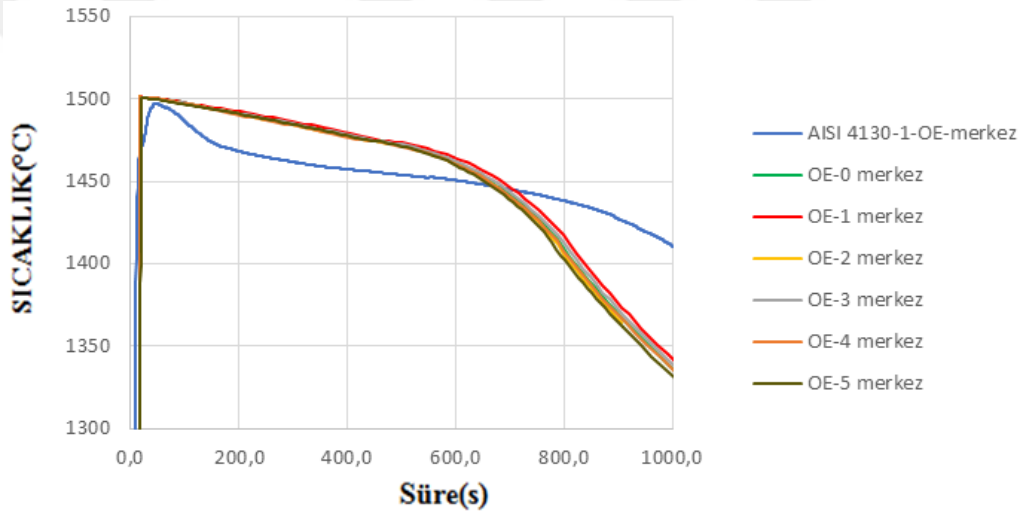
Şekil 5.31 AISI 4130 alaşımı iç yüzey bölgesi, yüksek ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmaları sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16, A ve B bölgeleri)

Şekil 5.32'de ölçülen dış yüzey sıcaklıklarının süreye bağlı değişimi gösterilmektedir. Sıvı metalin liküdü sıcaklığına ulaştığı andaki (140. saniye) dış yüzey sıcaklık ölçümleri karşılaştırıldığında deneme dökümündeki benzeşim çalışmalarına göre ortalama 200°C daha yüksek sıcaklıklara çıkmıştır. Deneme dökümü dış yüzey sıcaklığının en yüksek değeri 1100. saniyede 1050°C'dir. Benzeşim çalışmalarında ise en yüksek sıcaklık 2000. saniyede 800°C olarak görülmüştür. Dış yüzey sıcaklığı benzeşim çalışmalarına göre 250°C daha yüksek sıcaklık değerine ulaşmıştır. Sıcaklık farkının deneme dökümü dış yüzey ölçümlerinde termal çiftin sabitlenmesi sırasında besleyici gömleğe teması daha derinden sağlanmasından ve programda gömleğe ait yalıtım değerlerinin uygun olmadığından kaynaklandığı belirlenmiştir.



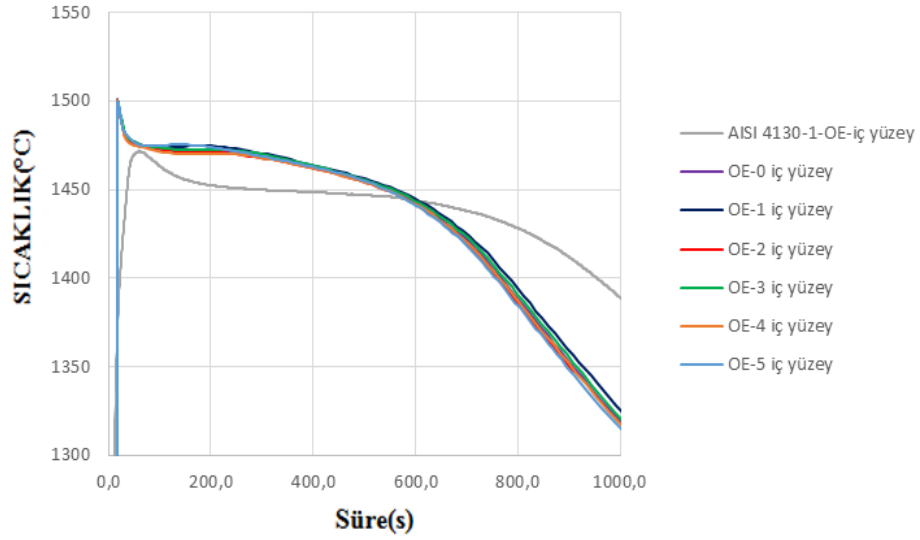
Şekil 5.32 AISI 4130 alaşımı dış yüzey bölgesi, yüksek ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmaları sıcaklık-süre grafikleri

Şekil 5.33'te orta ekzotermik özellikli besleyici gömlekler seçilerek yapılan benzeşim çalışmalarının ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılan deneme dökümü merkez sıcaklık değerlerinin süreye bağlı değişimi gösterilmektedir. Benzeşim eğrilerinin birbirine çok yakın, fakat deneme dökümü sonuçlarından uzak olarak ilerlediği görülmektedir. Deneme döküm çalışmasından ölçülen sıcaklık değerleriyle benzeşim çalışmaları sıcaklık ölçümleri karşılaştırıldığında ilk 800. saniyeye kadar ortalama 25°C sıcaklık farklarının olduğu belirlenmiştir. Sıvı-katı metlin soğuma hızı incelendiğinde (Ekler, Tablo 3). Solidüs sıcaklığına ulaşma süreleri karşılaştırıldığında deneme dökümü ile benzeşim çalışmaları arasındaki farkın 200-250 saniye olduğu belirlenmiştir (Ekler, Tablo 3).



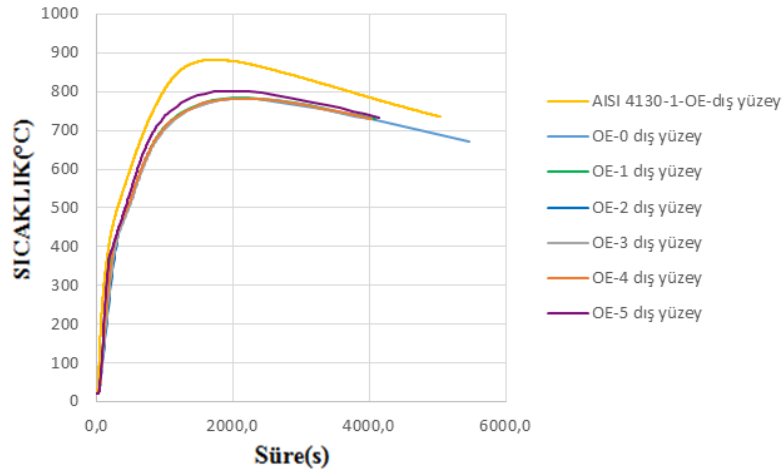
Şekil 5.33 AISI 4130 alaşımı merkez bölgesi, orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16, A ve B bölgeleri)

Şekil 5.34 incelendiğinde orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin benzeşim çalışmalarından ölçülen iç yüzey sıcaklık değerlerinin ilk 600 saniyede deneme dökümünde ölçülen sıcaklık değerinden yaklaşık 20-25°C daha düşük sıcaklık değerlerinde kaldığı belirlenmiştir (Ekler, Tablo 4). Benzeşim programından alınan eğrilerde yüksek sıcaklıklarda, orta ekzotermik besleyici gömleklere göre daha az dalgalanmanın olduğu görülmektedir. Bunu da reaksiyon sonucunda ortaya çıkan ısının daha az olmasıyla açıklayabiliriz.



Şekil 5.34 AISI 4130 alaşımı iç yüzey bölgesi, orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16, A ve B bölgeleri)

Şekil 5.35 incelediğinde yüksek ekzotermik gömleklerin tersine yalıtım özelliği öne çıkan orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğin dış yüzey sıcaklık ölçümlerinin benzeşim çalışmalarından alınan sıcaklık değerleri ile daha uyumlu olduğu görülmüştür. Deneme dökümü sıcaklık değerinin benzeşim çalışmaları sıcaklık değerleri arasındaki farkın 50-70°C'ye kadar düştüğü tespit edilmiştir.

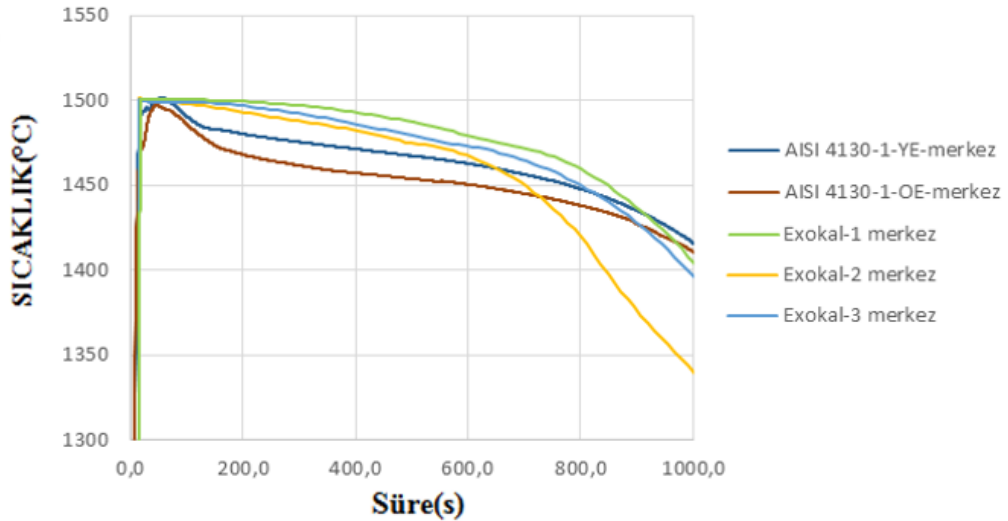


Şekil 5.35 AISI 4130 alaşımı dış yüzey bölgesi, orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri

AISI 4130 çeliğinin besleyici gömlek türüne ve sıcaklık alınan bölgeye bağlı olarak sıcaklık-süre eğrilerinde deneme dökümleri ve benzeşim çalışmaları arasında

farklılıklar olduğu görülmüştür. Söz konusu farkı azaltmak için benzeşim programındaki exokal besleyici gömlekler seçilerek benzeşim çalışmalarına devam edilmiştir. exokal besleyici gömlek seçilerek yapılan benzeşim çalışmalarının soğuma eğrileri Şekil 5.36-Şekil 5.38 arasında verilmiştir.

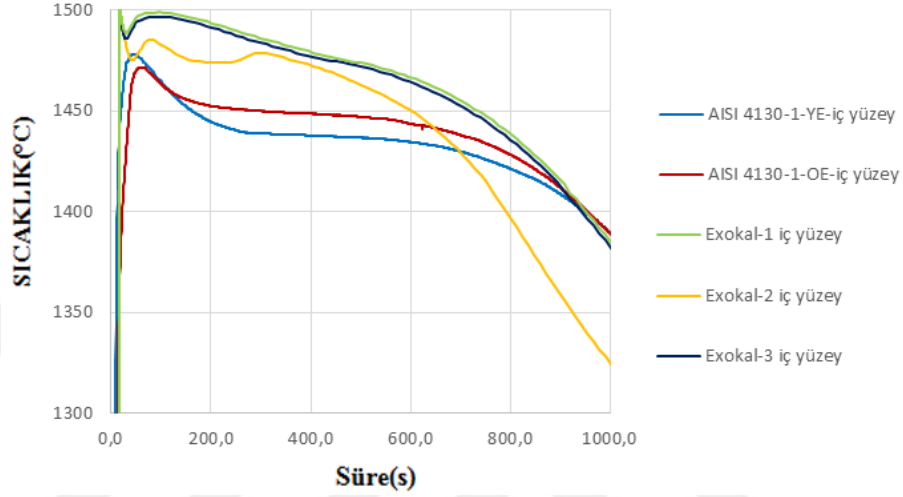
Şekil 5.36 incelendiğinde daha önceki çalışmalara benzer biçimde merkez bölgesinden ölçülen en yüksek sıcaklık değeri ile benzeşimde görülen en yüksek sıcaklık değeri arasında 4°C fark vardır. Görülen en yüksek sıcaklık benzeşim programında likidüs bölgesine denk geldiği için yüksek ve orta ekzotermik benzeşim çalışmalarında olduğu gibi sıvı metalin soğuma hızı, likidüs sıcaklığı ve likidüse ulaşma süresi belirlenememiştir. Sıvı-katı aralığında benzeşim ve deneme dökümleri soğuma hızlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür (Ekler, Tablo 5). Benzer biçimde solidüs sıcaklıkları ve ulaşma süreleri arasındaki fark da daha önceki yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömlekler ile yapılan benzeşim çalışmalarına göre daha az olduğu görülmüştür.



Şekil 5.36 AISI 4130 alaşımı merkez bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16, A ve B bölgeleri)

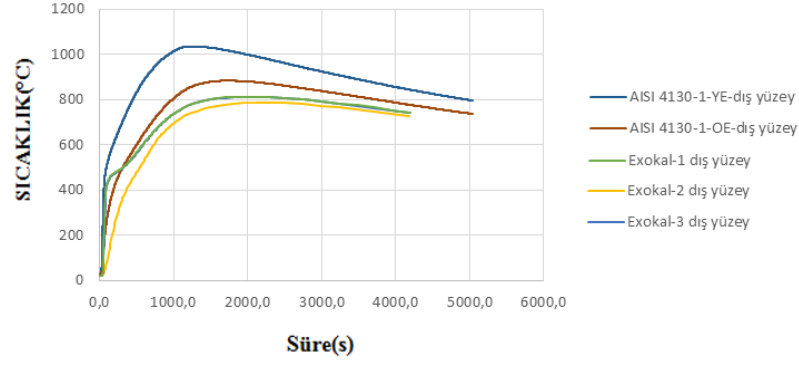
İç yüzey bölgesi sıcaklık-süre grafiğinin verildiği Şekil 5.37 incelendiğinde orta ekzotermik gömlek değerlerine benzer biçimde yüksek sıcaklıklardaki dalgalanmanın az olduğu ve soğuma rejiminin genel olarak deneme dökümleri sonuçlarına yakın

olduğu görülmüştür. Sıvı-katı metal soğumasının görüldüğü 200-900 saniye aralığında sıcaklık farkının yaklaşık 4°C olduğu ve soğuma hızlarının benzeşim sonuçlarına yakın olduğu görülmektedir (Ekler, Tablo 6). Benzeşim çalışmaları ve deneme dökümü sıcaklık eğrileri katılaşmanın tamamlandığı solidüs başlangıç bölgesinde çakışmaktadır.



Şekil 5.37 AISI 4130 alaşımı iç yüzey bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16, A ve B bölgeleri)

Benzeşim programındaki exokal besleyici gömlekler kullanılarak AISI 4130 çeliği dökümlerindeki gömlek dış yüzeyi deneme dökümleri ve benzeşim karşılaştırmaları Şekil 5.38’de verilmiştir. Exokal gömleklere yapılan parametre değişiklikleri ile deneme dökümlerine yakın değerler elde edilmiştir. Yüksek ekzotermik gömlemlerde hem reaksiyonun gömleğin her tarafından homojen gerçekleşmesi hem de yalıtım özelliğinin orta ekzotermik gömleklere göre daha düşük olması nedeniyle dış yüzey sıcaklıkları oldukça yüksek çıkmıştır. Özellikle görülen en yüksek sıcaklıkta benzeşim çalışmaları ile arasında yaklaşık 200°C’lik fark oluşmuştur.



Şekil 5.38 AISI 4130 alaşımı dış yüzey bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri

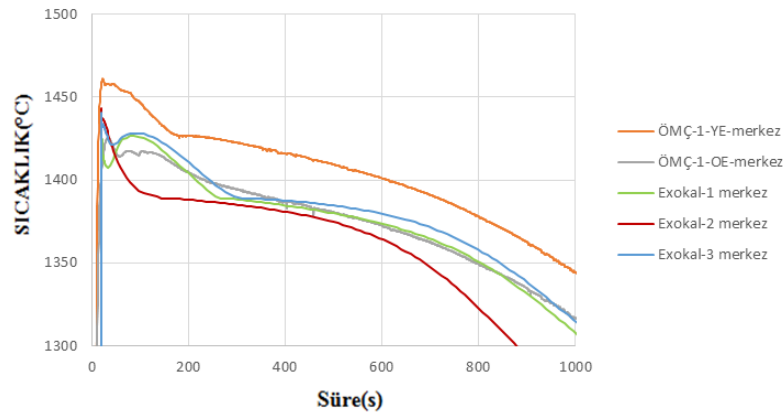
6000. saniyeye kadar sıcaklık-süre grafikleri incelendiğinde benzeşim programındaki yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklere göre exokal besleyici gömleklerin deneme dökümlerine daha yakın olduğu görülmektedir (Ekler, Şekil 1-6)

Deneme dökümlerinde kullanılan yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleğin dış yüzeyinden ölçülen sıcaklık değerlerinin benzeşim denemelerinde kullanılan besleyici gömleklerin sıcaklık değerlerine kıyasla daha yüksek değerlerde olduğu Şekil 5.38'de görülmektedir.

Yüksek, orta ve exokal isimli besleyici gömlekler ile yapılan benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri karşılaştırılması sonucunda yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek ile yapılan deneme dökümüne en yakın veriler exokal-3, orta ekzotermik özellikli besleyici gömlekler için exokal-1 olarak belirtilen parametrelerde elde edilmiştir. Daha sonra bahsedilecek olan östenitik mangan ve östenitik paslanmaz çelik deneme dökümlerinin benzeşim karşılaştırılmasında bu parametrelere sahip gömlekler kullanılmıştır. Söz konusu çelik alaşımlarının karşılaştırmalı soğuma grafiklerinde orta ve yüksek ekzotermik özellikli gömleklerin eğrileri benzeşim sonuçları ile aynı grafiklerde verilmiştir.

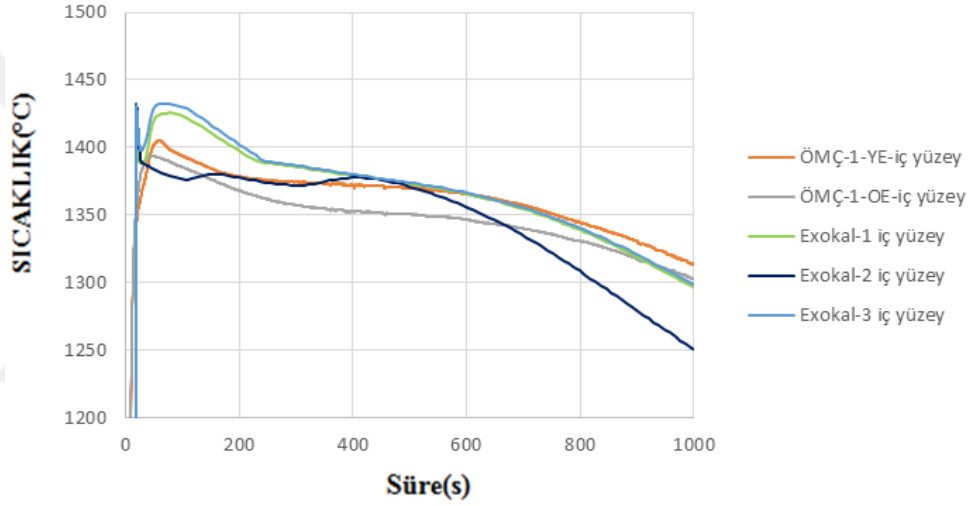
Şekil 5.39'da östenitik mangan çelik alaşımı merkez bölgesinin exokal besleyici gömlekler seçilerek yapılan benzeşim çalışmaları ile deneme dökümü sıcaklık-süre

grafikleri karşılaştırılmıştır. Grafik incelendiğinde exokal-2 besleyici gömlek ile yapılan benzeşim çalışmasının deneme dökümleri ve exokal-1 ve exokal-3 benzeşim çalışmalarının sıcaklık eğrilerine göre sıvı metal bölgesi, sıvı-katı metal bölgelerinde soğuma hızı daha yüksektir. Exokal-2 benzeşim çalışmasının sıcaklık değişimine bakarak ateşleme sıcaklığının fazla artırılması sonucunda eğrilerde ciddi uyumsuzlukların olacağı belirlenmiştir. Deneme dökümünde kullanılan yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleğin en yüksek sıcaklığı 30. saniyede 1459°C olup, orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğin en yüksek sıcaklığı 34. saniyede 1425°C'dir (Ekler, Tablo 7). Yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömlekler ile yapılan benzeşim çalışmalarına benzer şekilde merkez ve iç yüzey bölgelerinde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek daha yüksek sıcaklıklara ulaşmıştır (Şekil 5.39). Yüksek ve orta ekzotermik gömlekler kullanılan deneme dökümünde sıvı metalin soğuma hızı ortalaması ile exokal-1 ve exokal-3 benzeşim çalışmalarının ortalaması birbirine yakın olup yaklaşık 0,230°C/s'dir. Deneme dökümleri ile benzeşim çalışmalarının sıvı-katı metalin soğuma hızları birbirine yakın olup yaklaşık 0,050°C/s'dir. Solidüse giriş süreleri karşılaştırıldığında orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek ile exokal-1, yüksek ekzotermik besleyici gömlek ile exokal-3 değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür (Ekler, Tablo 7). Şekil 5.39'da 400-800 saniye arasında exokal-1 ile orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılan deneme dökümünün benzer soğuma davranışı gösterdiği görülmektedir.



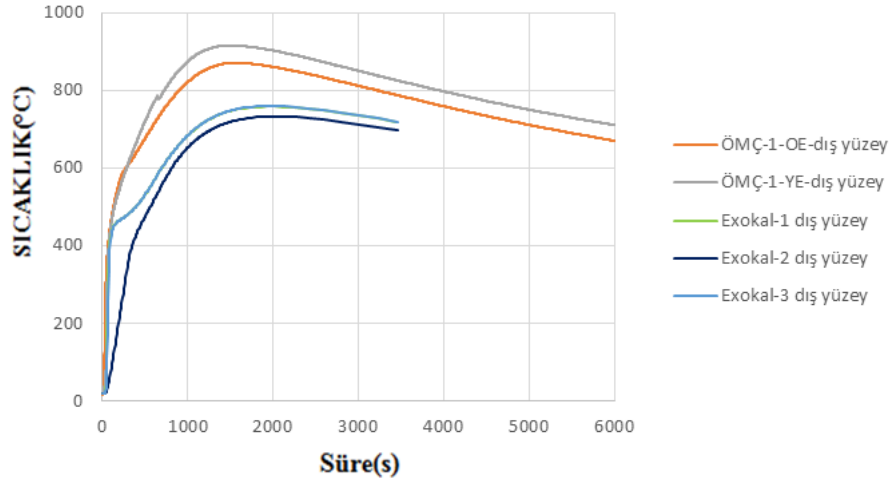
Şekil 5.39 A128M-93-A alaşımı merkez bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmasının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16, A ve B bölgeleri)

Şekil 5.40 incelendiğinde deneme dökümlerinde iç yüzey bölgelerinden ölçülen en yüksek sıcaklık yüksek ekzotermik besleyici için 1410°C iken, orta ekzotermik besleyici gömlek için 1398°C'dir. Benzeşim çalışmalarındaki sıvı metalin soğuma hızı ortalama 0,258°C/s, deneme dökümlerinde ise bu değer ortalama 0,188°C/s'dir (Ekler, Tablo 8). Sıvı-katı metal soğumasının olduğu 400-600 saniye arasında benzeşim çalışmaları ile deneme dökümleri arasında yaklaşık 20°C fark vardır (Şekil 5.40). Solidüse ulaşma süreleri incelendiğinde deneme dökümleri ile benzeşim çalışmaları arasındaki farkın ortalama 150 saniye olduğu belirlenmiştir (Ekler, Tablo 8).



Şekil 5.40 A128M-93-A alaşımı iç yüzey bölgesi, orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmasının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16, A ve B bölgeleri)

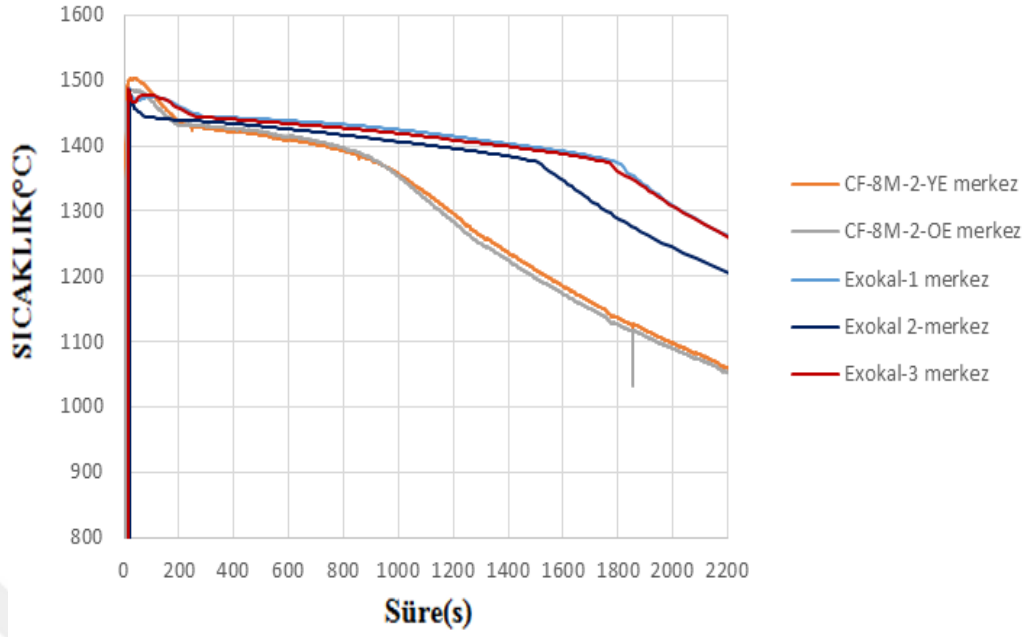
Şekil 5.41 incelendiğinde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleğin dış yüzey sıcaklığı orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğe göre 50°C daha fazla olup 900°C'dir. Deneme dökümleri dış yüzey sıcaklık ölçümleri ile benzeşim çalışmaları dış yüzey sıcaklık ölçümleri arasında ortalama 150°C fark vardır. Benzeşim çalışmaları dış yüzey sıcaklık ölçümleri tamamen birbiriyle aynı olduğu görülmüştür (Şekil 5.41).



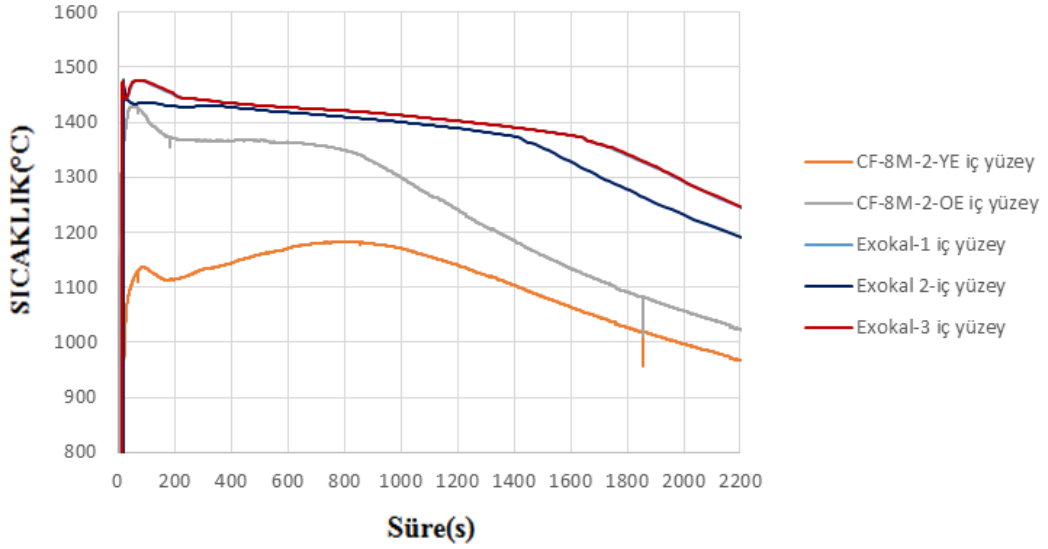
Şekil 5.41 A128M-93-A alaşımı dış yüzey bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri

Şekil 5.39 ve Şekil 5.40'daki sıcaklık değerleri incelendiğinde östenitik mangan çeliği için yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin sıcaklık değerlerinin sırasıyla benzeşim çalışmalarında seçilen exokal-3 ve exokal-1 isimli besleyici gömleklerin sıcaklık değerleri ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Şekil 5.42 ve Şekil 5.43'te östenitik paslanmaz çelik alaşımı için benzeşim ve deneme dökümü sıcaklık-süre grafikleri gösterilmektedir. Merkez bölgesi sıvı metalin soğuma hızı karşılaştırıldığında deneme dökümleri benzeşim çalışmalarına göre yaklaşık $0,216^{\circ}\text{C/s}$ daha hızlı bir şekilde soğuma davranışı gösterdiği belirlenmiştir (Ekler, Tablo 9). Deneme dökümü ve benzeşim çalışmalarının solidüse ulaşma süreleri arasında ciddi uyumsuzlukların olduğu görülmüştür (Şekil 5.42). Söz konusu uyumsuzlukların benzeşim programında değiştirilebilen besleyici gömlek parametreleri ile giderilemeyeceği sonucuna varılmıştır. Şekil 5.43 incelendiğinde deneme dökümleri iç yüzey bölgesi en yüksek sıcaklık değerlerinin düştüğü görülmektedir. Özellikle yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleğin iç yüzey sıcaklığının belirgin bir şekilde benzeşim çalışmalarına göre düşük kaldığı görülmektedir. Bunun nedeninin döküm sırasında termal çiftlerin besleyici merkezinden dışa doğru kaymasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



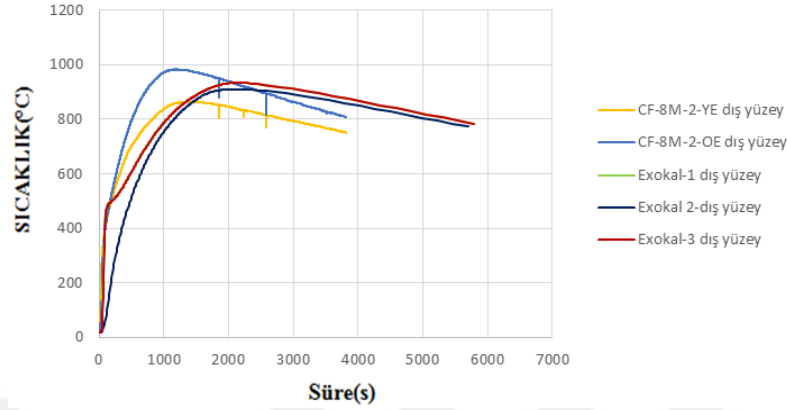
Şekil 5.42 CF-8M alaşımı merkez bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16; A, B ve C bölgeleri)



Şekil 5.43 CF-8M alaşımı iç yüzey bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16; A ve B bölgeleri)

Şekil 5.44'te yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek ile orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğin dış yüzey sıcaklık ölçümleri arasında sıcaklık farklarının olduğu görülmektedir. Deneme dökümleri sonucunda yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin dış yüzey bölgelerinin en yüksek sıcaklıkları 1200.

saniyede sırasıyla 980°C ve 840°C'dir. Dış yüzey ölçümlerinde benzeşim ile deneme dökümü sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.



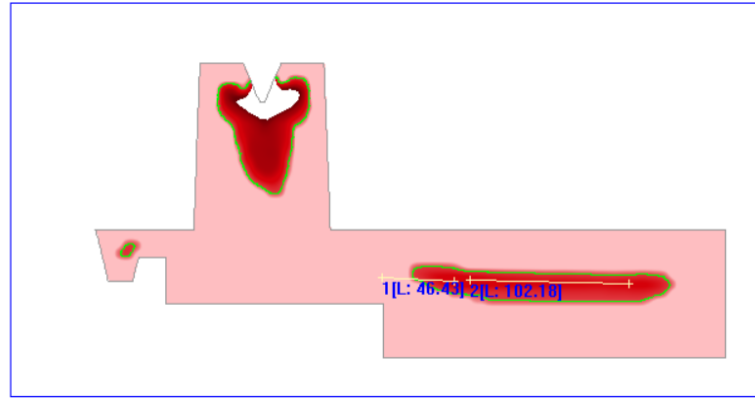
Şekil 5.44 CF-8M alaşımı dış yüzey bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri

Düşük alaşımlı karbon çeliği ve östenitik mangan çeliği alaşımlarının benzeşim çalışması ve deneme dökümleri soğuma eğrileri karşılaştırmalarında sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Paslanmaz çelik alaşımında ise ciddi uyumsuzlukların olduğu görülmüştür. Düşük alaşımlı karbon çeliği üzerine benzer çalışmalar incelendiğinde benzeşim çalışmaları ve deneme dökümlerinin soğuma eğrileri uyumludur (Hardin ve diğer., 2013; Ignaszak ve diğer., 2005) Bu çalışmada gömleklerin ekzotermik özellikleri üzerinde değişiklikler yapılarak soğuma eğrilerinin uyumluluğu sağlanmıştır. Düşük alaşımlı karbon çeliği benzeşim ve deneme dökümü karşılaştırmaya çalışmalarından yola çıkarak östenitik mangan ve paslanmaz çelik karşılaştırmalı literatürde benzer yöntemler kullanılarak yapılmıştır (Midea ve diğer., 2007). Fakat benzer alaşımlar üzerine çalışmalar yapılmadığı için eğrilerin yorumlanması karşılaştırılamamıştır.

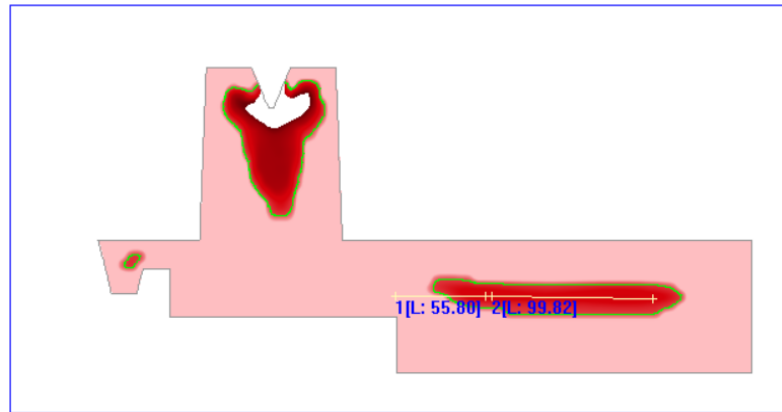
5.3.2 Döküm Benzeşim Çalışmaları Çekinti Sonuçları

Benzeşim çalışmaları ve deneme dökümleri karşılaştırmalarında soğuma eğrilerinin yanı sıra çekinti görüntüleri de incelenmiştir. Farklı çelik alaşımları için exokal-3 ve exokal-1 besleyici gömlekler seçilerek yapılan döküm benzeşim çalışmalarının çekinti bölgeleri Şekil 5.45-Şekil 5.50 arasında gösterilmektedir. AISI

4130 alaşımı ve exokal-3 besleyici gömlek seçilerek yapılan benzeşim çalışmasının ortalama çekinti miktarı %16-19 seviyelerinde olduğu belirlenmiştir (şekil 5.45). %16 çekinti miktarı olan bölgenin besleyici gömleğin dış çapına olan mesafesi 46 mm'dir. AISI 4130 alaşımı ve exokal-1 besleyici gömlek seçilen benzeşim çalışmasında; 0-50 mm arasında çekinti yüzdesinin %12 değerinin altında olduğu ve 100-150 mm arasında çekinti yüzdesi %12-18 arasında değiştiği belirlenmiştir. şekil 5.45'te görülen daha koyu renkte olan bölgelerde çekinti yüzdesi %18'lere kadar çıktığı grlmştir.



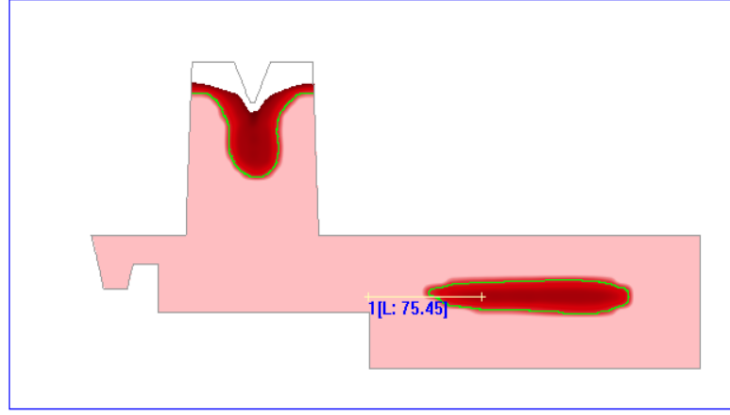
şekil 5.45 AISI 4130 alaşımı ve exokal-3 isimli besleyici gömlek seçilerek yapılan benzeşim çalışmasının çekinti bölgeleri



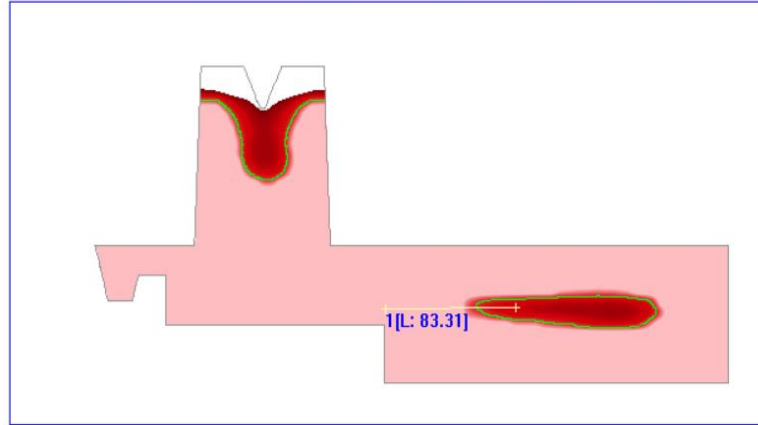
şekil 5.46 AISI 4130 alaşımı ve exokal-1 isimli besleyici gömlek seçilerek yapılan benzeşim çalışmasının çekinti bölgeleri

şekil 5.47 ve şekil 5.48'de A128M-93-A alaşımı için benzeşim çalışmalarının çekinti bölgeleri gösterilmektedir. Exokal-3 ve exokal-1 isimli besleyici gömlek

kullanılarak yapılan benzeşim çalışmalarının ortalama çekinti miktarları sırasıyla %28-32 ve %24-31 arasında değişmektedir ve ilk çekinti hatasının besleyici dış çapına olan uzaklıkları sırasıyla 75 mm ve 83mm'dir.

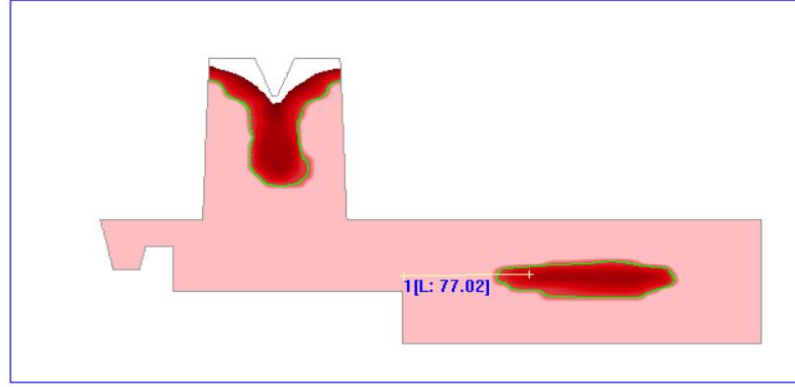


Şekil 5.47 A128M-93-A alaşımı ve exokal-3 isimli besleyici gömlek seçilerek yapılan benzeşim çalışmasının çekinti bölgeleri

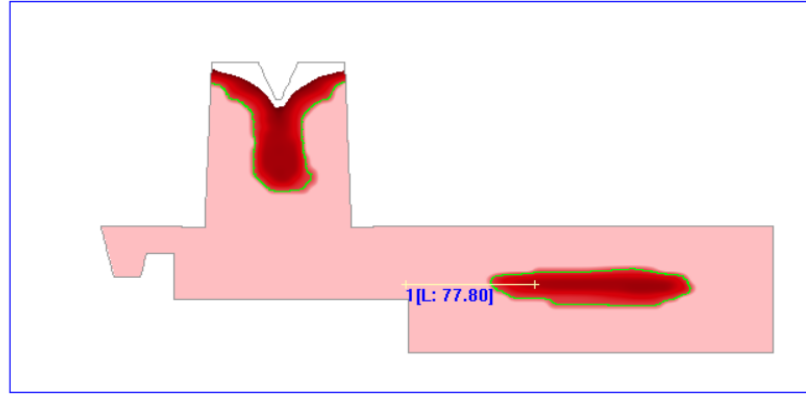


Şekil 5.48 A128M-93-A alaşımı ve exokal-1 isimli besleyici gömlek seçilerek yapılan benzeşim çalışmasının çekinti bölgeleri

CF-8M alaşımı için exokal-3 ve exokal-1 besleyicileri seçilerek yapılan benzeşim çalışmalarının ortalama çekinti miktarları %30-32 arasındadır. İlk çekinti bölgelerinin besleyici gömleğin dış çapına uzaklıkları her iki benzeşim çalışmasında 77 mm'dir (Şekil 5.49 ve Şekil 5.50).



Şekil 5.49 CF-8M alaşımı ve exokal-3 isimli besleyici gömlek seçilerek yapılan benzeşim çalışmasının çekinti bölgeleri



Şekil 5.50 CF-8M alaşımı ve exokal-1 isimli besleyici gömlek seçilerek yapılan benzeşim çalışmasının çekinti bölgeleri

AISI 4130 alaşımının ve exokal-3 besleyici gömlek seçilerek yapılan benzeşim çalışmalarının çekinti görüntüsü ile yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak dökülen parçanın radyografi görüntüsü karşılaştırıldığında; radyografi görüntüsünde çekinti hatalarının besleyici gömleğin dış çapına olan mesafesi 50-100 mm arasında (Şekil 5.23), benzeşim çalışmasında ise bu mesafe 46-148 mm (Şekil 5.45) arasındadır. Orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek için benzeşim ve radyografi sonuçları karşılaştırıldığında; radyografi ve benzeşim çalışmasındaki çekinti hatalarının besleyici gömleğin dış çapına olan mesafeleri sırasıyla 50-150 mm, 55-154 mm arasındadır. Yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleğin radyografi görüntüsü ile benzeşim çalışmasının çekinti görüntüleri arasında giriş yolluğunun uzak bölgelerine doğru uyumsuzlukların olduğu tespit edilmiştir. Orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklere ise radyografi görüntülerinde tespit edilen

çekinti bölgeleri ile benzeşim programından alınan çekinti bölgelerinin uyumlu olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.24, Şekil 5.46).

ASTM-A128M-93A alaşımının her iki besleyici gömleğin radyografi ve benzeşim programından alınan görüntülerin çekinti bölgeleri arasında uyumsuzluklar söz konusudur. Radyografi görüntülerinde çekinti hataları görülmemiştir (Şekil 5.25 ve Şekil 5.26). Ancak benzeşim çalışmalarının çekinti görüntüleri incelendiğinde yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömlekler kullanılan çalışmalarda besleyici gömleğin dış çapına uzaklığı sırasıyla 75 mm ve 83 mm'den başlayarak döküm parçasının merkezine doğru çekinti hatalarının olduğu görülmüştür (Şekil 5.47, Şekil 5.48). Benzeşim çalışmalarının çekinti görüntüleri ile radyografi görüntüleri arasındaki bu uyumsuzluğun yeterli enerji seviyesinde döküm parçalarının radyografi görüntülerinin çekilememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunu destekler nitelikte deneme dökümü sonrası döküm parçalarının yüzey görüntüleri çekilmiştir. Şekil 5.51 ve Şekil 5.52'de gösterilen bölgelerde makro hatalar görülmüştür.



Şekil 5.51 Yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak dökülen ASTM-A128M-93A alaşımli parçanın kumlama sonrası görüntüsü



Şekil 5.52 Orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak dökülen ASTM-A128M-93A alaşımli parçanın kumlama sonrası görüntüsü

CF-8M alaşımının exokal-1 ve exokal-3 isimli besleyici gömlekler seçilerek yapılan benzeşim çalışmalarının çekinti görüntüleri incelediğinde her iki besleyici gömlek için ilk çekinti bölgesinin besleyici gömleğin dış çapına uzaklığı 77 mm'dir . Ek olarak her iki besleyici ile yapılan benzeşim çalışmalarının çekinti bölgeleri besleyici gömleğin dış çapına olan uzaklığı 77 mm'den başlayarak döküm parçasının merkezine doğru ilerlediği görülmüştür (şekil 5.49, şekil 5.50). Yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömlekler kullanılarak dökülen parçaların radyografi görüntülerinde çekinti hatalarının 50-80 mm arasında olduğu belirlenmiştir. Benzeşim ve radyografi görüntüleri karşılaştırıldığında benzeşim çalışmalarının çekinti bölgeleri ile radyografi görüntülerindeki çekinti bölgelerinin bir kısmı uyumaktadır. Ancak benzeşim çalışmasında merkez bölgede görülen çekinti bölgeleri radyografi görüntülerinde tespit edilememiştir.

Besleme mesafesi besleyicinin döküm parçası üzerinde boşluksuz olarak besleme yapabileceği en büyük uzaklıktır. Yandan besleyici kullanılan kalıp tasarımlarında döküm parçasında oluşan hatanın besleyicinin dış çapına olan uzaklığı besleme mesafesi olarak tanımlanır (Ou ve diğer., 2002). Deneme dökümleri ve benzeşim çalışmalarının besleme mesafeleri Tablo 5.10'da gösterilmektedir. M-1 alaşımı dışında diğer alaşımlarda kullanılan yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin besleme mesafelerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5.10 Deneme dökümleri ve benzeşim çalışmalarının besleme mesafeleri

| Besleyici gömlek türü | Deneme dökümü ve Benzeşim alışmaları | RZL (mm) |
|-----------------------|---------------------------------------|----------------|
| Yüksek ekzotermik | AISI 4130 (gama radyografi) | 50 |
| | AISI 4130 (benzeşim) | 46 |
| Yüksek ekzotermik | M-1 (gama radyografi) | Hata Görülmedi |
| | M-1 (benzeşim) | 75 |
| Yüksek ekzotermik | CF-8M (gama radyografi) | 50 |
| | CF-8M (benzeşim) | 77 |
| Orta ekzotermik | AISI 4130 (gama radyografi) | 50 |
| | AISI 4130 (benzeşim) | 55 |
| Orta ekzotermik | M-1 (gama radyografi) | Hata Görülmedi |
| | M-1 (benzeşim) | 83 |
| Orta ekzotermik | CF-8M (gama radyografi) | 50 |
| | CF-8M (benzeşim) | 77 |

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan besleyici gömlemlerin işlevini NovaFlow&Solid döküm benzeşim programı kullanarak optimize etmek amacıyla karakterizasyon çalışmaları, deneme dökümleri ve benzeşim çalışmaları yapılmıştır.

Yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömlemlerin farklı bölgelerinden alınan numunelerin DT-TGA eğrilerinde benzer reaksiyonlar tespit edilmiştir. Reaksiyon enerjileri arasında fark olmakla birlikte, reaksiyonların benzer sıcaklıklarda başlamasından dolayı besleyici gömlemlerin homojen olduğu sonucuna varılmıştır.

Döküm öncesi ve döküm sonrası hazırlanan yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek numunelerinin X ışınları kırınım desenlerinde aynı faz bileşenleri görülmüştür. Besleyici gömlemin özelliğine göre görülen fazların pik şiddetlerinde farklılıklar tespit edilmiştir.

AISI 4130 alaşımı için yapılan deneme dökümünde, döküm parçasından alınan numune ile yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek metallerinin farklı bölgelerinden alınan numunelerin kimyasal analiz sonuçlarının birbirlerine yakın olduğu belirlenmiştir. Yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömlemlerin döküm metaline etkileşmediği EDS analizleri sonucunda belirlenmiştir.

Farklı çelik alaşımların deneme dökümlerinde ölçülen sıcaklık-süre eğrileri benzer soğuma davranışı göstermektedir. Bunun sonucunda döküm çalışmalarında seçilen çelik alaşımının farklı olması besleyici gömlemlerin ısıl davranışlarını etkilememiştir.

Farklı çelik alaşımların deneme dökümlerinde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlemlerin orta ekzotermik özellikli besleyici gömlemlere göre liküdü bölgesinin sonuna kadar daha hızlı soğuma davranışı gösterdikleri belirlenmiştir.

Yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerdeki metallerin sıvı-katı aralığında soğuma hızlarının birbirine yakın olduğu belirlenmiştir.

NovaFlow&Solid benzeşim programında yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin ateşleme sıcaklığı, yanma süresi, ısı iletim katsayısı, ve yoğunluğunun değiştirilmesi sonucunda deneme dökümünden bulunan değerlere yaklaşılamamıştır. Benzeşim programının veri tabanında kayıtlı exokal besleyici gömleğin ateşleme sıcaklığının değiştirilmesi sonucunda AISI 4130 ve ASTM-A128M-93A alaşımli deneme dökümleri sıcaklık eğrileri (merkez ve iç yüzey bölgeleri) ile benzeşim çalışmalarının sıcaklık eğrileri arasındaki farkın azaldığı belirlenmiştir. Benzeşim programındaki exokal isimli besleyici gömleklerin yanma süresi ve yanma ısısında değişimler yapılarak benzeşim ve deneme dökümü sıcaklık-süre grafiklerinin uyumu irdelenebilir. Benzeşim programında besleyici gömlek özelliklerinin iyileştirilmesine rağmen her üç alaşımın (AISI 4130, ASTM-A128M-93A, CF-8M) dış yüzey bölgesinden ölçülen sıcaklık değerlerindeki farklılıklar giderilememiştir. Bu farklılığın giderilebilmesi için dış yüzey sıcaklık ölçümü için kullanılan termal çiftlerin konumları ile benzeşim çalışmalarındaki dış yüzey sensörlerinin aynı konumda olması gerekmektedir. Deneme dökümlerinde dış yüzey ölçümleri için kullanılan termal çift konumlarının sabitlenmesi için kalıp tasarımında önlemler arttırılabilir. CF-8M alaşımli deneme dökümlerinden ölçülen sıcaklık değerleri (merkez ve iç yüzey bölgeleri) ile benzeşim programında özellikleri iyileştirilmiş olan besleyici gömlek ile yapılan benzeşim çalışmalarından alınan sıcaklık değerleri arasında solüdü sıcaklığına kadar uyumsuzluklar olduğu belirlenmiştir. Bu sıcaklık değerleri arasındaki uyumsuzlukların benzeşim programının veri tabanında kayıtlı besleyici gömlek özelliklerinin değiştirilmesi ile giderilemeyeceği sonucuna varılmıştır. Benzeşim programında kayıtlı CF-8M alaşımının ısı iletim katsayısı değiştirilerek benzeşim denemeleri yapılarak sonuçlar irdelenebilir.

AISI 4130, ASTM-A128M-93A ve CF-8M alaşımli parçalar için yapılan benzeşim çalışmalarında ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri ile deneme dökümlerinde ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri arasında ihmal edilebilir sıcaklık

farklarının olduğu tespit edilmiştir. Benzeşim programında başlangıç sıcaklık değerin deneme dökümlerinde ölçülen değerin girilmesi sonucunda deneme dökümlerinde ve benzeşim çalışmalarında ölçülen en yüksek sıcaklık değeri arasındaki farkın azaldığı belirlenmiştir.

AISI 4130 alaşımli parçaların radyografi görüntülerinin çekinti bölgeleri ile özellikleri değiştirilmiş besleyici gömlekler ile yapılan benzeşim çalışmalarının çekinti bölgelerinin benzer olduğu, CF-8M ve ASTM-A128M-93A alaşımında ise bu görüntüler arasında uyumsuzlukların olduğu tespit edilmiştir.



KAYNAKLAR

- Amin, L. D., Patel, S., Mishra, P. ve Joshi, D. (2014). Rapid development of industrial castings using computer simulation. *Indian Foundry Journal*, 60(8), August.
- Aran, A. (2007). *Döküm teknolojisi, imal usülleri ders notları*. 15.02.2016, <http://www2.isikun.edu.tr/personel/ahmet.aran/dokum.pdf>.
- Arda, İ., Şirin, S., Çolak, M. ve Kayıkçı, R. (2011). Küresel grafitli dökme demir dökümlerinde hacimsel değişime etki eden faktörlerin incelenmesi. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 16-18 May, Elazığ, Turkey.
- ASTM E186-Volume 3, (1998). *Reference Radiographs for Heavy-Walled (51mm to 114 mm) Steel Castings 4-MV to 30-MV Xrays*.
- Beeley, P. (2001). *Foundry technology*. Butterworth-Heinemann.
- Campbell, J. (2003). *Casting practice*. Butterworth-Heinemann.
- Candeğer, K. C. (2001). Dökümde besleyiciler ve ekzotermik besleyici malzemeler. *Metalurji*, 5-12.
- Carlson, K. D., Ou, S., Hardin, R. A. ve Beckarmann, C. (2002). Development of new feeding-distance rules using casting simulation: Part I. *Methodology, Metallurgical and Materials Transactions B*, 33B, 731-739.
- Chudasama, J. B. (2013). Solidification analysis and optimization using Pro-Cast. *International Journal of Research in Modern Engineering and Emerging Technology*, 1(4), 9-19.

- 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 Thermite reaction intermediate and final products characterization. *Materials Science and Engineering A*, 199-210.
- EN ISO 5579, (2014). *Non-destructive testing-radiographic testing of metallic materials using film and X or Gamma rays-basic rules*.
- Evmez, S. (2014). Sfero analizlerinde simülasyon programı ile dökümhane koşullarının adaptasyonu iç çekinti tayini. 7. *Uluslararası Ankiros Döküm Kongresi*, 6. Oturum: *Süreçler ve Kontrol*, 11-13 Eylül, İstanbul.
- Gwiżdż, A., Pysz, S. ve Dworak, P. (2010). MAGMASoft simulation applied in verification of technology to produce new range of alloy steel castings, *Archives of Foundry Engineering*, 10(3), 67-72.
- Hahma, A., Gany, A. ve Palovuori, K. (2006). Combustion of activated aluminum. *Combustion and Flame*, 464-480.
- Haines, P. J. (1995). *Thermal methods of analysis principles, applications and problems* (1. Baskı). London:Chapman & Hall.
- Hardin, R., Ou, S. ve Carlson, K. (2001). *Feeding and risering guidelines for steel casting*. U.S. Department of Energy (DOE).
- Hardin, R. A., Williams, T. J. ve Beckermann, C. (2013). Riser sleeve properties for steel castings and the effect of sleeve type on casting yield, *Proceedings of the 67th SFSA Technical and Operating Conferance, Steel Founders' Society of America*, paper no:5.2, Chicago.

- Hussain, H. ve Khandwawala, A. I. (2013). Optimal design of two feeder system: simulation studies for techno-economic feasibility. *American Journal of Engineering Research(AJER)*, 2(10), 314-321.
- Ignaszak, Z., Popielarski, P. ve Ciura, J. (2005). Heat source description of iso-exothermic sleeves with the use of continuous function. *Archives of Foundry*, 5(15), 157-163.
- Iqbal, M., Patel, S. ve Vidyarthi, G. (2014). Simulation of casting and its validation by experiments. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 3(8), August.
- Jadhao, V.S. ve Salunke, J. J. (2014). Review paper on simulation based casting. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(11).
- Jagdishwar, M. (2012). *Casting feeder design optimization based on feed path and temperature analysis*. Master Degree, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, Indian.
- Kahraman, H., Keser, İ. H., Tozan, M. K. ve Cöcen, Ü. (2014). Döküm hatalarının karakterize edilmesi ve besleyici gömlekler ile ilişkileri. *7. Uluslararası Döküm Kongresi*, 11-13 Eylül, İstanbul.
- Kayıkcı, R. ve Akar, N., (2007). Farklı kesit kalınlıklarına sahip büyük hacimli bir çelik dökümün simülasyon teknikleri ile tasarlanması. *Politeknik Dergisi*, 10(4), 395-401.
- Khade, U. ve Sawant, S. (2014). Riser design optimization based on feeding rules using 3D CAD modelling casting simulation. *Proceedings of IRF International Conference 13th*, April, India.

- Lipowska, B., Witek, J. ve Stec, K. (2010). Aluminium dross based insulating and exothermic materials for metallurgical industry. *Archives of Foundry Engineering*, 10(4), 115-118.
- Midea, A. C., Burns, M. ve Wagner, I. (2007). Advanced thermo-physical data for casting process simulation—the importance of accurate sleeve properties. *Foundry Research/Giessereiforschung*, 59(1), 34-43.
- Nandi, T., Behera, R., Kayal, S. ve Sutradhar, G. (2011). Optimization of riser size of aluminium alloy(LM6) casting by using conventional method and computer simulation technique. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2(11), November.
- Narayan, G., Kidambi, T. ve Hariths, A. (2013). Controlled solidification process in sand mould casting (Carbon Steel) to achieve uniform ferrite structure and increase the riser efficiency. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2(10), 92-95.
- Narwade, A. R., Choudhari, C.M. ve Narkhede, B.E. (2014). Feeder design and analysis by casting simulation software. *International Journal of Informative & Futuristic Research*, 1(9), 281-291.
- Neu, M. G. ve Gough, M. J. (1993). *Patent No. US 005180759A*. Birmingham, England.
- NovaCast, (2016). *F. Nova Flow&Solid Gravity CV User Guide 4.6.*, 28 Nisan, İstanbul.
- Ou, S., Carlson, K. D., Hardin, R. A. ve Beckermann, C. (2002). Development of New feeding-distance rules using casting simulation: Part II. The New Rules, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 33B, 741-755.

- Perzyk, M., Kochanski, A., Mazurek, P. ve Karrczewski, K. (2014). Selected principles of feeding systems design: simulation vs industrial experience. *Archives of Foundry Engineering*, 14(4), 77-82.
- Perzyk, M., Kozlowski, J., Mazur, M. ve Szymczewski, K. (2015). Optimization of side feeders systems by means of simulation of solidification. *Archives of Foundry Engineering*, 15(1), 69-74.
- Ramu, T., Kumar, M. L. S. D. ve Ganesh, B. K. C. (2012). Modeling, simulation and analysis in manufacturing of a flywheel casting by S.G.Iron. *International Journal of Materials and Biomaterials Applications*, 2(4), 25-28.
- Sandell, P. K. (2008). Feeding of hollow cylindrical castings, *68th WFC-World Foundry Congress*, 7th-10th February, 201-206.
- 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.
- Sola, F. (2014). Ingot feeding systems: analysis of Fiber's behaviour before/after casting, *2nd International Conference ICRF*.
- Sorelmetal. (2000). *Ductile Iron the essentials of gating and risering system design*. Montreal: Rio Tinto Iron and Titanium Inc.
- Thomas, J.W., Hardin, R.A. ve Beckermann, C. (2014). Thermophysical properties for ASK chemical and exochem riser sleeves for steel castings. *Proceedings of the 68th SFSA Technical and Operating Conference, Paper No. 4.6, Steel Founders' Society of America*, Chicago, IL.
- Twardowska, H. ve Aufderheide, R. C. (2002). *Patent No. US 006360808B1*. Dublin Ohio.

Wlodawer, R. (1966). *Directional solidification of steel casting* (1st English Edition). (L. D. Hewitt, R. V. Riley, Çev.). Scotland: Pergoman Press.

Zang, G. ve Chou, K. (2015). Deoxidation of molten steel by aluminum. *Journal of Iron and Steel Research*, 22(10), 905-908



EKLER

Ek-1: Sembol Listesi

t = Katılma süresi (s)

V = Katılan dökümün hacmi (cm^3)

A = Katılan dökümün yüzey alanı (cm^2)

C = Kalıp malzemesi, metal ve sıcaklığa bağlı sabit (s/cm)

M_b = Besleyici modülü (cm)

M_d = Döküm parçasının modülü (cm)

A_d = Döküm parçasının yüzey alanı (cm^2)

A_b = Besleyicinin yüzey alanı (cm^2)

V_b = Verilen bir döküm parçası için gerekli olan besleyici hacmi (cm^3)

V_d = Döküm parçasının hacmi (cm^3)

Φ = Besleyici verimi (%)

α = Döküm alaşımının hacimsel çekme oranı (%)

RZL = Besleyici besleme bölgesi

EZL = Uç besleme bölgesi

EZL_2 = Yan kenarlardan kaynaklanan uç besleme bölgesi

LFD = Yan besleme mesafesi

FD= Besleme mesafesi

L = Döküm parçasının uzunluğu

W = Döküm parçasının genişliği

T = Döküm parçasının kalınlığı

D_R = Besleyici çapı

G = Sıcaklık gradyanı (K/mm)

\dot{T} = Soğuma hızı (K/s)

N_{cr} = Niyama değeri ($K^{1/2}s^{1/2}mm^{-1}$)

ΔH = Reaksiyon entalpisi (kJ)

λ = Besleyici gömlek ısı iletim katsayısı ($W.m^{-1}.K^{-1}$)

T_m = Ergime sıcaklığı ($^{\circ}C$)

T_0 = Kalıp sıcaklığı ($^{\circ}C$)

K_m = Kalıbın ısıl iletkenliği ($cal/cm^{\circ}C s$)

ρ_m = Kalıbın yoğunluğu (g/cm^3)

C_m = Kalıbın özgül ısısı ($cal/g^{\circ}C$)

ρ_s = Sıvı metalin yoğunluğu (g/cm³)



Tablo 1 AISI 4130 alaşımı merkez bölgesi, yüksek ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmaları hesaplamaları

| | En yüksek sıcaklık (°C) | En yüksek sıcaklık görülen süre (s) | Sıvı metalin soğuma hızı (°C/s) | Sıvı-katı aralığı soğuma hızı (°C/s) | Liküdüs sıcaklığına ulaşma süresi (s) | Liküdüs sıcaklığı (°C) | Solidüs sıcaklığına ulaşma süresi (s) | Solidüs sıcaklığı (°C) |
|------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| AISI 4130-1-YE-merkez | 1505 | 60 | 0,242 | 0,050 | 140 | 1485 | 912 | 1440 |
| YE-0 merkez | 1501 | 20 | Belirlenemedi | 0,073 | Belirlenemedi | | 665 | 1460 |
| YE-1 merkez | 1501 | 20 | | 0,090 | | | 635 | 1460 |
| YE-2 merkez | 1501 | 20 | | 0,081 | | | 660 | 1460 |
| YE-3 merkez | 1501 | 20 | | 0,080 | | | 639 | 1460 |
| YE-4 merkez | 1501 | 20 | | 0,077 | | | 664 | 1460 |
| YE-5 merkez | 1501 | 20 | | 0,068 | | | 644 | 1460 |
| YE-6 merkez | 1501 | 20 | | 0,064 | | | 668 | 1460 |
| YE-7 merkez | 1501 | 20 | | 0,059 | | | 650 | 1460 |
| YE-8 merkez | 1501 | 20 | | 0,094 | | | 550 | 1460 |

Tablo 2 AISI 4130 alaşımı iç yüzey bölgesi, yüksek ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmaları hesaplamaları

| | En yüksek sıcaklık (°C) | En yüksek sıcaklık görülen süre (s) | Sıvı metalin soğuma hızı (°C/s) | Sıvı-katı aralığı soğuma hızı (°C/s) | Liküdüs sıcaklığına ulaşma süresi (s) | Liküdüs sıcaklığı (°C) | Solidüs sıcaklığına ulaşma süresi (s) | Solidüs sıcaklığı (°C) |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| AISI 4130-1-YE-iç yüzey | 1478 | 44 | 0,267 | 0,021 | 250 | 1440 | 785 | 1430 |
| YE-0 iç yüzey | 1500 | 18 | Belirlenemedi | 0,046 | Belirlenemedi | Belirlenemedi | 628 | 1450 |
| YE-1 iç yüzey | 1500 | 18 | | 0,036 | | | 615 | 1450 |
| YE-2 iç yüzey | 1500 | 18 | | 0,036 | | | 626 | 1450 |
| YE-3 iç yüzey | 1500 | 18 | | 0,034 | | | 628 | 1450 |
| YE-4 iç yüzey | 1500 | 18 | | 0,043 | | | 620 | 1450 |
| YE-5 iç yüzey | 1500 | 18 | | 0,043 | | | 620 | 1450 |
| YE-6 iç yüzey | 1500 | 18 | | 0,032 | | | 640 | 1450 |
| YE-7 iç yüzey | 1500 | 18 | | 0,044 | | | 616 | 1450 |
| YE-8 iç yüzey | 1500 | 18 | | 0,069 | | | 534 | 1450 |

Tablo 3 AISI 4130 alaşımı merkez bölgesi, orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmaları hesaplamaları

| | En yüksek sıcaklık (°C) | En yüksek sıcaklık görülen süre (s) | Sıvı metalin soğuma hızı (°C/s) | Sıvı-katı aralığı soğuma hızı (°C/s) | Liküdü sıcaklığına ulaşma süresi (s) | Liküdü sıcaklığı (°C) | Solidüs sıcaklığına ulaşma süresi (s) | Solidüs sıcaklığı (°C) |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|------------------------|
| AISI 4130-1-OE- merkez | 1497 | 50 | 0,231 | 0,042 | 150 | 1472 | 845 | 1435 |
| OE-0 merkez | 1501 | 18 | Belirlenemedi | 0,067 | Belirlenemedi | Belirlenemedi | 600 | 1460 |
| OE-1 merkez | 1501 | 18 | | 0,062 | | | 614 | 1460 |
| OE-2 merkez | 1501 | 18 | | 0,069 | | | 596 | 1460 |
| OE-3 merkez | 1501 | 18 | | 0,064 | | | 605 | 1460 |
| OE-4 merkez | 1501 | 18 | | 0,071 | | | 590 | 1460 |
| OE-5 merkez | 1501 | 18 | | 0,071 | | | 590 | 1460 |

Tablo 4 AISI 4130 alaşımı iç yüzey bölgesi, orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmaları hesaplamaları

| | En yüksek sıcaklık (°C) | En yüksek sıcaklık görülen süre (s) | Sıvı metalin soğuma hızı (°C/s) | Sıvı-katı aralığı soğuma hızı (°C/s) | Liküdüs sıcaklığına ulaşma süresi (s) | Likidüs sıcaklığı (°C) | Solidüs sıcaklığına ulaşma süresi (s) | Solidüs sıcaklığı (°C) |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| AISI 4130-1-OE-iç yüzey | 1473 | 67 | 0,190 | 0,019 | 200 | 1455 | 792 | 1430 |
| OE-0 iç yüzey | 1500 | 18 | Belirlenemedi | 0,031 | Belirlenemedi | Belirlenemedi | 570 | 1450 |
| OE-1 iç yüzey | 1500 | 18 | | 0,010 | | | 590 | 1450 |
| OE-2 iç yüzey | 1500 | 18 | | 0,034 | | | 568 | 1450 |
| OE-3 iç yüzey | 1500 | 18 | | 0,025 | | | 578 | 1450 |
| OE-4 iç yüzey | 1500 | 18 | | 0,028 | | | 576 | 1450 |
| OE-5 iç yüzey | 1500 | 18 | | 0,028 | | | 576 | 1450 |

Tablo 5 AISI 4130 alaşımı iç yüzey bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmaları hesaplamaları

| | En yüksek sıcaklık (°C) | En yüksek sıcaklık görülen süre (s) | Sıvı metalin soğuma hızı (°C/s) | Sıvı-katı aralığı soğuma hızı (°C/s) | Liküdüs sıcaklığına ulaşma süresi (s) | Liküdüs sıcaklığı (°C) | Solidüs sıcaklığına ulaşma süresi (s) | Solidüs sıcaklığı (°C) |
|------------------------------|--------------------------------|--|--|---|--|-------------------------------|--|-------------------------------|
| AISI 4130-1-YE-merkez | 1505 | 60 | 0,242 | 0,050 | 140 | 1485 | 912 | 1440 |
| AISI 4130-1-OE-merkez | 1497 | 50 | 0,231 | 0,042 | 150 | 1472 | 845 | 1435 |
| exokal-1- merkez | 1501 | 17 | Belirlenemedi | 0,049 | Belirlenemedi | | 810 | 1460 |
| exokal-2- merkez | 1501 | 17 | | 0,062 | | | 645 | 1460 |
| exokal-3- merkez | 1501 | 17 | | 0,056 | | | 784 | 1460 |

Tablo 6 AISI 4130 alaşımı iç yüzey bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmaları hesaplamaları

| | En yüksek sıcaklık (°C) | En yüksek sıcaklık görülen süre (s) | Sıvı metalin soğuma hızı (°C/s) | Sıvı-katı aralığı soğuma hızı (°C/s) | Liküdüs sıcaklığına ulaşma süresi (s) | Liküdüs sıcaklığı (°C) | Solidüs sıcaklığına ulaşma süresi (s) | Solidüs sıcaklığı (°C) |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| AISI 4130-1-YE-iç yüzey | 1478 | 44 | 0,267 | 0,021 | 250 | 1440 | 785 | 1430 |
| AISI 4130-1-OE-iç yüzey | 1473 | 67 | 0,190 | 0,019 | 200 | 1455 | 792 | 1440 |
| exokal-1 iç yüzey | 1499 | 17 | Belirlenemedi | 0,024 | Belirlenemedi | | 760 | 1450 |
| exokal-2 iç yüzey | 1499 | 17 | | 0,046 | | | 600 | 1450 |
| exokal-3 iç yüzey | 1499 | 17 | | 0,042 | | | 740 | 1450 |

Tablo 7 ASTM-A128M-93-A alaşımı merkez bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmalarını hesaplamaları

| | En yüksek sıcaklık (°C) | En yüksek sıcaklık görülen süre (s) | Sıvı metalin soğuma hızı (°C/s) | Sıvı-katı aralığı soğuma hızı (°C/s) | Liküdüs sıcaklığına ulaşma süresi (s) | Liküdüs sıcaklığı (°C) | Solidüs sıcaklığına ulaşma süresi (s) | Solidüs sıcaklığı (°C) |
|-----------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| ÖMÇ-1-YE-merkez | 1459 | 30 | 0,254 | 0,041 | 180 | 1425 | 721 | 1390 |
| ÖMÇ-1-OE-merkez | 1425 | 34 | 0,197 | 0,068 | 244 | 1398 | 650 | 1367 |
| exokal-1 merkez | 1440 | 17 | 0,234 | 0,044 | 265 | 1389 | 658 | 1370 |
| exokal-2 merkez | 1440 | 17 | Belirlenemedi | | | | | |
| exokal-3 merkez | 1440 | 17 | 0,222 | 0,038 | 302 | 1389 | 723 | 1370 |

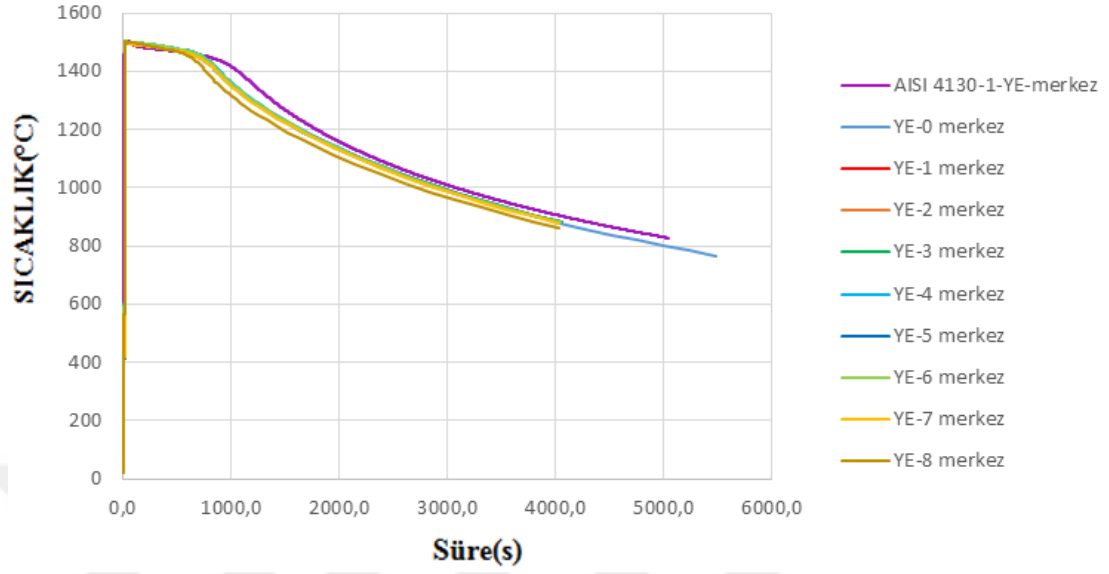
Tablo 8 ASTM-A128M-93-A alaşımı iç yüzey bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmaları hesaplamaları

| | En yüksek sıcaklık (°C) | En yüksek sıcaklık görülen süre (s) | Sıvı metalin soğuma hızı (°C/s) | Sıvı-katı aralığı soğuma hızı (°C/s) | Liküdüs sıcaklığına ulaşma süresi (s) | Liküdüs sıcaklığı (°C) | Solidüs sıcaklığına ulaşma süresi (s) | Solidüs sıcaklığı (°C) |
|--------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| ÖMÇ-1-YE-iç yüzey | 1410 | 43 | 0,210 | 0,029 | 200 | 1368 | 610 | 1364 |
| ÖMÇ-1-OE- iç yüzey | 1398 | 30 | 0,167 | 0,036 | 310 | 1356 | 687 | 1340 |
| exokal-1 iç yüzey | 1426 | 17 | 0,250 | 0,062 | 237 | 1388 | 499 | 1373 |
| exokal-2 iç yüzey | 1426 | 17 | Belirlenemedi | | | | | |
| exokal-3 iç yüzey | 1426 | 17 | 0,247 | 0,056 | 246 | 1388 | 518 | 1373 |

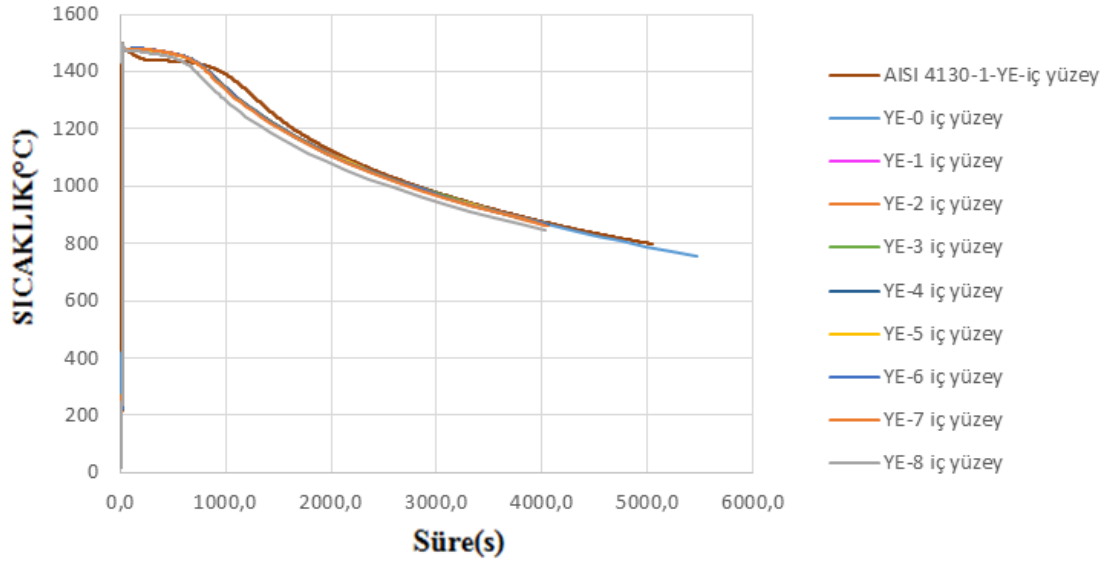
Tablo 9 CF-8M alaşımı merkez bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmalarını hesaplamaları

| | En yüksek sıcaklık (°C) | En yüksek sıcaklık görülen süre (s) | Sıvı metalin soğuma hızı (°C/s) | Sıvı-katı aralığı soğuma hızı (°C/s) | Liküdüs sıcaklığına ulaşma süresi (s) | Liküdüs sıcaklığı (°C) | Solidüs sıcaklığına ulaşma süresi (s) | Solidüs sıcaklığı (°C) |
|---------------------------|--------------------------------|--|--|---|--|-------------------------------|--|-------------------------------|
| CF-8M-2-YE-merkez | 1502 | 41 | 0,444 | 0,068 | 212 | 1432 | 800 | 1396 |
| CF-8M-2-OE- merkez | 1485 | 32 | 0,355 | 0,053 | 210 | 1430 | 726 | 1404 |
| exokal-1 merkez | 1486 | 17 | 0,216 | 0,058 | 314 | 1444 | 1259 | 1410 |
| exokal-2 merkez | 1486 | 17 | Belirlenemedi | | | | | |
| exokal-3 merkez | 1486 | 17 | 0,236 | 0,063 | 275 | 1444 | 1196 | 1410 |

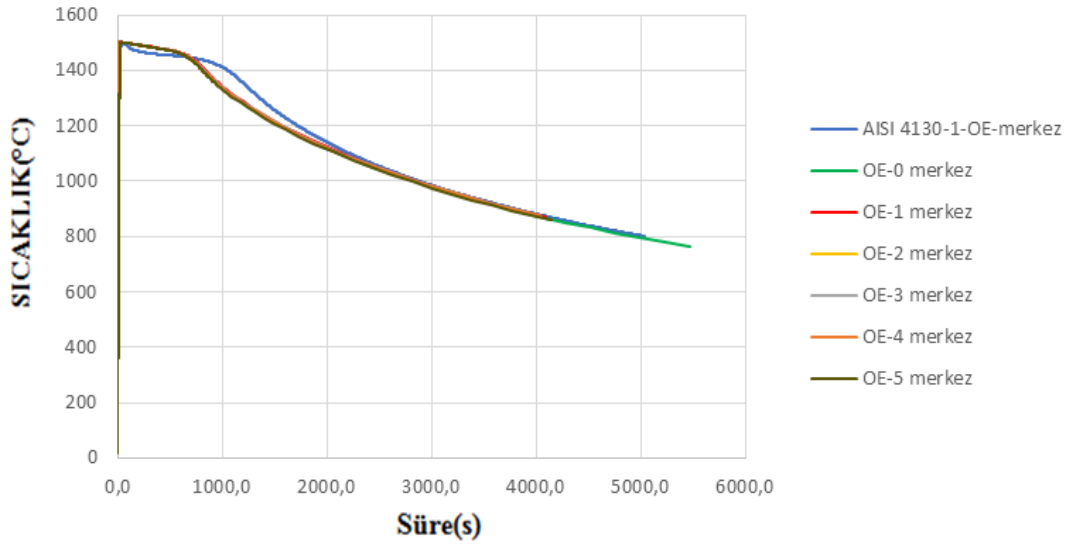
Ek-3: Şekiller



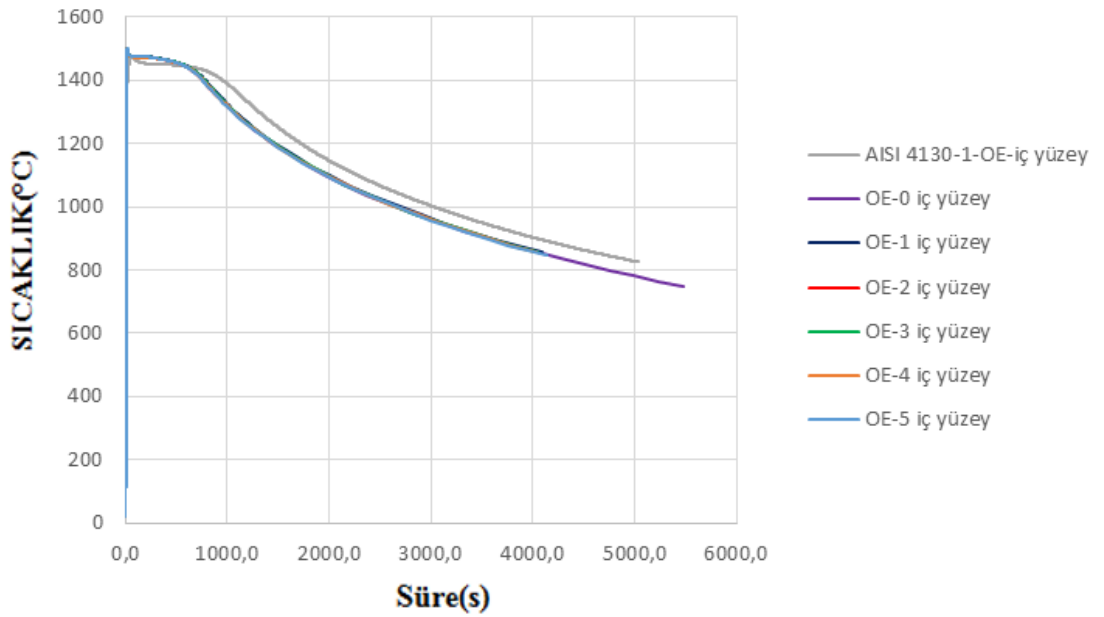
Şekil 1 AISI 4130 alaşımı merkez bölgesi, yüksek ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16; A, B ve C bölgeleri)



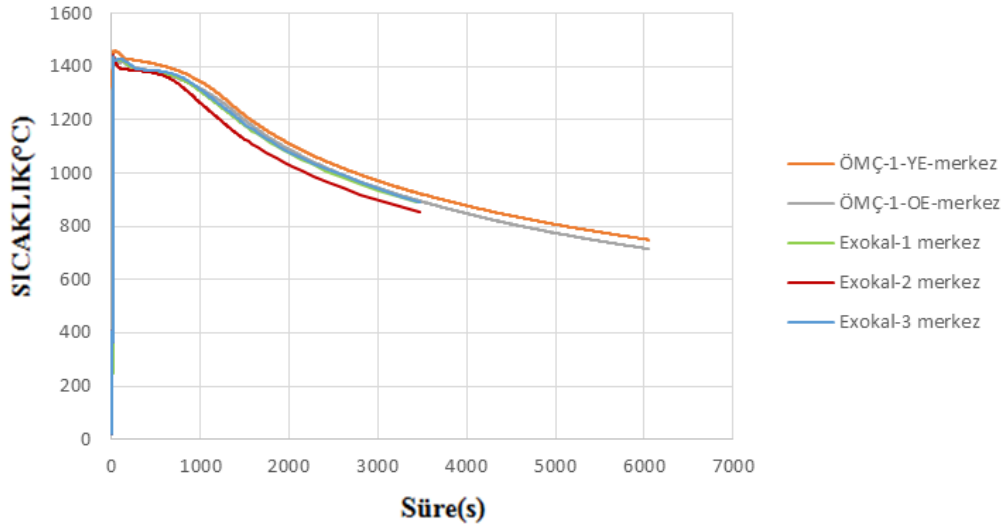
Şekil 2 AISI 4130 alaşımı iç yüzey bölgesi, yüksek ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16; A, B ve C bölgeleri)



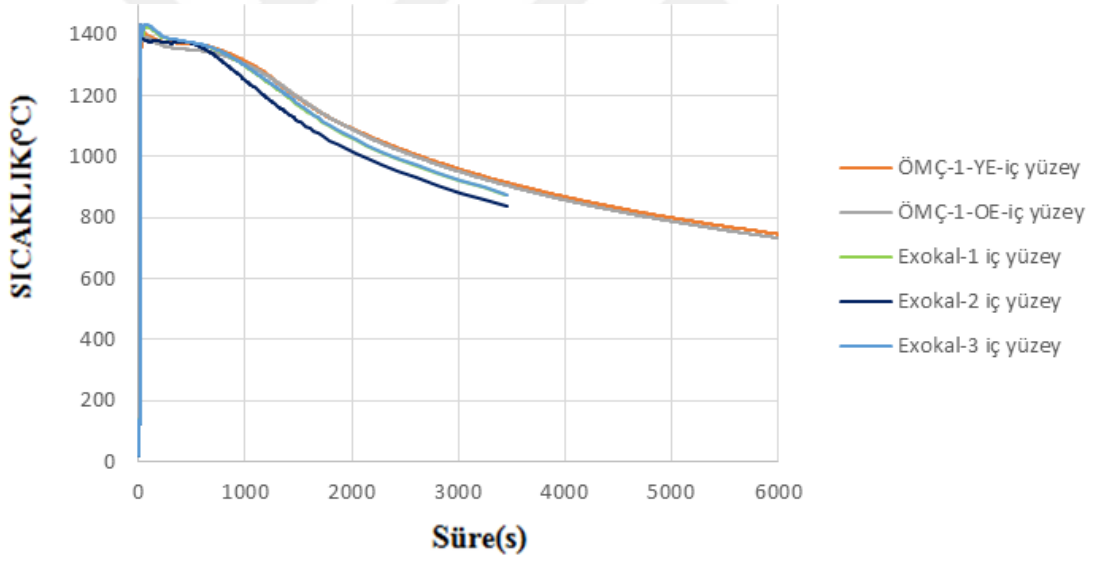
Şekil 3 AISI 4130 alaşımı merkez bölgesi, orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16; A, B ve C bölgeleri)



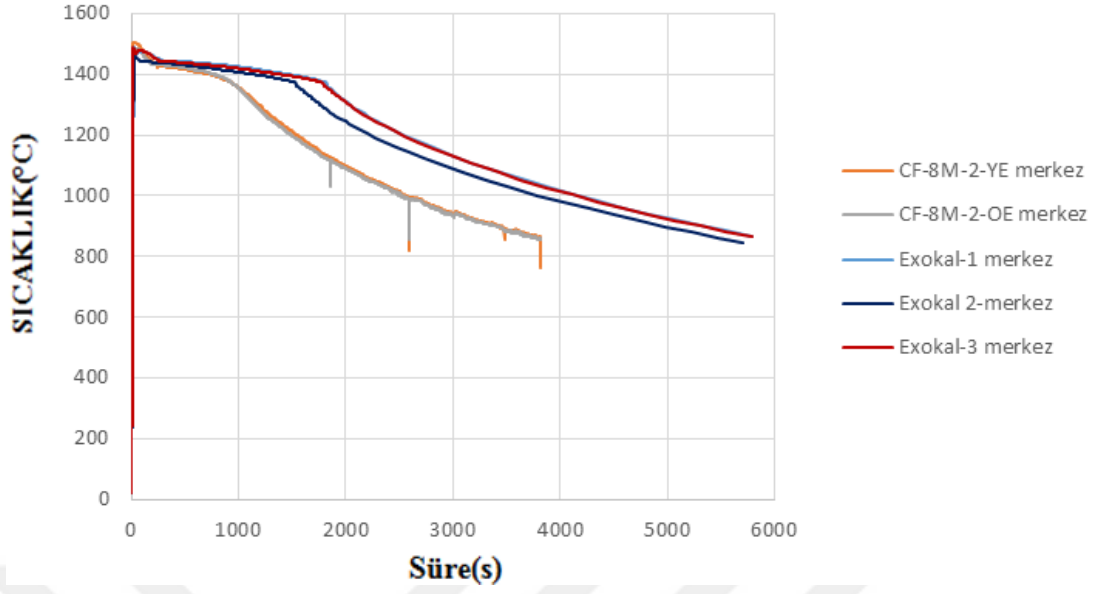
Şekil 4 AISI 4130 alaşımı iç yüzey bölgesi, orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16; A, B ve C bölgeleri)



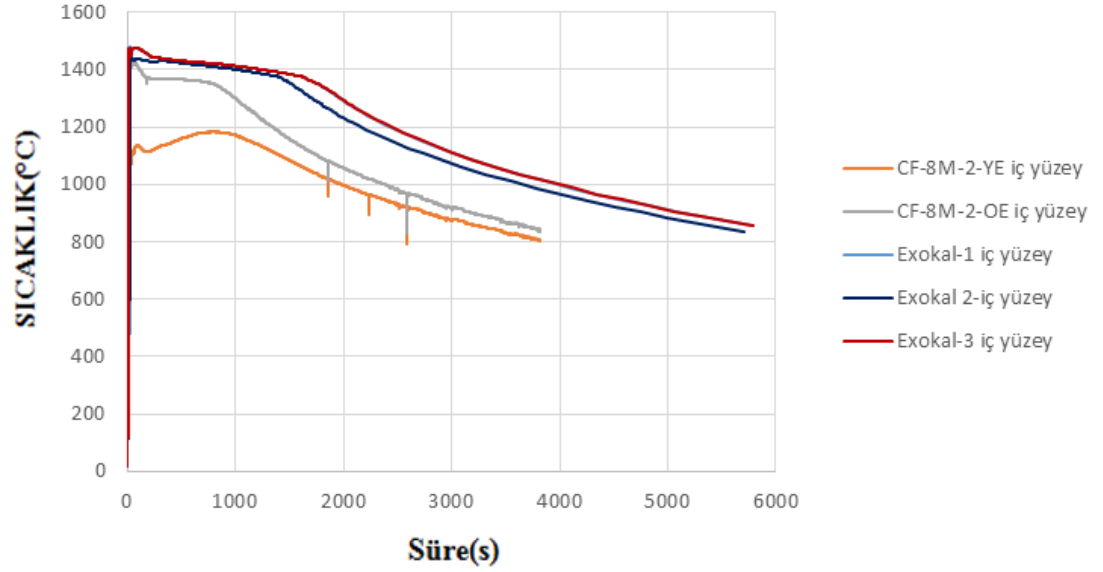
Şekil 5 A128M-93-A alaşımı merkez bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16; A, B ve C bölgeleri)



Şekil 6 A128M-93-A alaşımı iç yüzey bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16; A, B ve C bölgeleri)



Şekil 7 CF-8M alaşımı merkez bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16; A, B ve C bölgeleri)



Şekil 8 CF-8M alaşımı iç yüzey bölgesi, yüksek ve orta ekzotermik besleyici kullanılan deneme dökümü ve exokal benzeşim çalışmalarının sıcaklık-süre grafikleri (Şekil 5.16; A, B ve C bölgeleri)