

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİ NESİL ÖN ŞEKİLLENDİRİLMİŞ
BESLEYİCİ GÖMLEKLERİNİN TASARIMI,
OPTİMİZASYONU VE ÜRETİMİ

Haydar KAHRAMAN

Temmuz, 2019

İZMİR

**YENİ NESİL ÖN ŞEKİLLENDİRİLMİŞ
BESLEYİCİ GÖMLEKLERİNİN TASARIMI,
OPTİMİZASYONU VE ÜRETİMİ**

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

Haydar KAHRAMAN

**Temmuz, 2019
İZMİR**

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

HAYDAR KAHRAMAN, tarafından **PROF. DR. ÜMİT CÖCEN** yönetiminde hazırlanan **“YENİ NESİL ÖN ŞEKİLLENDİRİLMİŞ BESLEYİCİ GÖMLEKLERİNİN TASARIMI, OPTİMİZASYONU VE ÜRETİMİ”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Ümit CÖCEN

Yönetici



Prof. Dr. Ali Aydın GÖKTAŞ

Yedek Jüri Üyesi



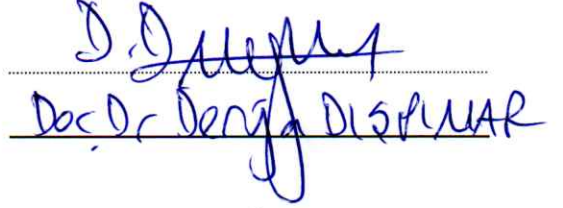
Doç. Dr. Fatih KAHRAMAN

Tez İzleme Komitesi Üyesi



Prof. Dr. Murat BAYRAK

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Deniz DİŞLİMAR

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN

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 ve Teknoloji Sanayi Bakanlığına ve Çukurova Kimya Endüstrisi A. Ş.’ye,

Tezimin her aşamasında, aktarmış olduğu yakın ilgi, destek ve anlayıştan dolayı, akademik duruşu, bilimsel etik anlayışı ve üniversite eğitime bakış açısını her zaman hayranlıkla izlediğim çok değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Ümit CÖCEN’e,

Yüksek lisans eğitimim aşamasında tanıştığım ve bilimsel çalışmalara bakış açımı değiştiren sadece hocam değil aynı zamanda manevi abim olan sayın Doç Dr. Fatih KAHRAMAN’a

Tez izleme jürimde yorumları ve yönlendirmeleri ile çalışmalarına yardımcı olan sayın Prof. Dr. Kazım ÖNEL ve Prof. Dr. Ali Bülent ÖNAY’a

Projede beraber çalıştığımız sonrasında en iyi dostlarımdan biri olan doktora tezimi oluşturmamda paha biçilemez katkıları olan sayın Yük. Met. Malz. Mühendisi İbrahim Hayri KESER’e

Deneysel çalışmaların sırasında desteğini esirgemeyen her zaman yanımda bulunan Met. Malz. Müh. M. Kemal TOZAN’a,

Döküm benzeşim çalışmalarının yapılmasında tecrübelerini benimle paylaşan Yük. Met. Müh. Yalçın ÇAY’a ve tüm MEDÖKSAN Ltd. Şirket’i çalışanlarına,

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. Melih ÇOBAN’a ve tüm Pınar Döküm Sanayi Ticaret A.Ş. alışanlarına, radyografi görüntülerinin çekilme aşamasında yardımlarını benden esirgemeyen başta Met. ve Malz. Müh. Onur KÖSE’ye ve tüm Erma Teknik şirketi çalışanlarına,

Projenin hazırlanması aşamasında destek olan Dr. Trsen DEMİR, Dr. Hayri BALTACIOĞLU ve Ferhat TOCAN’a

Numune hazırlama yardımlarından dolayı Hamdi CİNİZ’a ve Dalyan ÖZKAN’a, çalışmalarına verdikleri test analiz desteği için İzmır Katip elebi Üniversitesi Merkez laboratuvarları, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Eskişehir Seramik Araştırma Merkezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Deneysel Fen Bilimleri Araştırma ve Uygulama Merkezi alışanlarına,

Laboratuvar çalışmalarım sırasında gerek cihaz kullanımı gerekse bilimsel tartışmaları ile tez çalışmalarıma destek olan Dokuz Eylül Metalurji ve Malzeme Mühendisliği araştırma görevlileri Ar. Gör. Ramazan DALMIş, Ar. Gör. Dr. Kadir Cihan TEKİN, Ar. Gör. Serhan KöKTAş, Ar. Gör. Ahmet ağrı KILINÇ ve ve diğer., akademik ve idari personel arkadaşlarıma,

Besleyici gömlek numunelerinin hazırlanması sırasında bilgi ve emeği ile destek olan değerli çalışma arkadaşım Metin şAHİN’e,

Gerektiğinde zaman ayırmaktan kaçınmayan Genel Müdür Yardımcımız Haydar etin ve Ar-Ge Müdürümüz Dr. Özge AKSİN ARTOK başta olmak üzere çalışma arkadaşlarım Nur SARA KURT, Hande ÖZCAN, Dr. Eymen AKşENER, Alper Emre GÜVENDİK, Ekrem ÖZER, Tuğba ALPDOĞAN’a

Sadece hayat arkadaşım değil aynı zamanda meslektaşım olan sevgilimi eşim Yük. Met. Malz. Müh. Nihal KAHRAMAN’a,

Doktora tezi çalışmalarımın başında aramıza katılan ve varlığı her zaman bize güç veren sevgili oğlum Tunç KAHRAMAN'a,

Bu çalışmanın hazırlanması aşamasında gösterdikleri sabır ve anlayıştan dolayı aileme,

Teşekkürü bir borç bilirim.

Haydar KAHRAMAN



YENİ NESİL ÖN ŞEKİLLENDİRİLMİŞ BESLEYİCİ GÖMLEKLERİNİN TASARIMI, OPTİMİZASYONU VE ÜRETİMİ

ÖZ

Sanayide metalik parça üretimi için kontrol kolaylığı, ekonomikliği ve seri üretime uygulanabilirliği açısından en çok tercih edilen yöntemlerin başında döküm süreçleri gelmektedir. Özellikle büyük boyuttaki ve tek parça halinde üretilmek istenen parçaların üretiminde döküm kaçınılmaz bir yöntem olmaktadır. Her ne kadar hatasız bir döküm için yolluk tasarımı iyi yapılsa bile katılaşma sonucu oluşan çekintilerin döküm parçayı etkilememesi için çoğunlukla besleyici kullanımı gerekmektedir. Besleyici kullanımı, döküm verimini düşürse de sonuçta üretim verimini doğrudan artırmaktadır. Besleyici verimini artırmak üzere besleyici gömlekler, demir esaslı ve kısmen de demir dışı alaşımların dökümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada insan sağlığına ve çevreye uyumlu hammaddeler kullanılarak geliştirilen besleyici gömleklerin tasarımı ve üretimi amaçlanmıştır. Bu amaçla, ekzotermik ve yalıtım özellikli dört farklı bileşim sahip besleyici gömleklerin yapısal ve ısı karakterizasyonları yapılarak yeni iki farklı geometrik tasarım geliştirilmiştir. Böylece besleyici gömlek seçiminde ve uygulanmasında önemli özellikleri ortaya konmuştur. Aynı zamanda besleyici gömlek etkinliğinin incelenebileceği uygun kalıp tasarımları yapılarak döküm uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Döküm uygulamalarında küresel grafitli dökme demir, karbon çeliği, yüksek manganlı çelik ve paslanmaz çelik alaşımları kullanılmıştır. Dökümler sırasında soğuma eğrileri çıkarılarak gömleklerin metal katılaşma sürecine ve katılaşma sonrası metal yapısına etkileri incelenmiştir. Besleyici gömlek incelemeleri ve döküm uygulamalarından elde edilen bulgular döküm benzeşim programı üzerinde işlenerek programda kayıtlı besleyici gömlek özellikleri geliştirilmiştir. Bu yolla benzeşim programı kullanılarak doğru besleyici gömlek seçiminin önü açılmıştır.

Anahtar kelimeler: Besleyici gömlek, besleme, soğuma eğrisi, döküm benzeşimi

DESIGN, OPTIMISATION AND MANUFACTURING OF NEW GENERATION PRE-FORMED FEEDER SLEEVES

ABSTRACT

Casting process is one of the most preferred methods in industrial production of metallic parts, in terms of ease of control, economy and applicability to mass production. Casting is an inevitable method especially for the production of large sized and single piece parts. Although the runner design is well designed for a sound casting, it is often necessary to use a feeder so that the shrinkage caused by solidification do not affect the casting. Even if feeder application decreasing the casting yield, increasing the total yield. In generally exothermic and/or insulating feeder sleeves are used in iron-based and partly non-ferrous alloys to increase casting yield. In this study, aim to design and manufacture feeder sleeves with environmental and human health friendly raw materials. For this purpose, structural and thermal properties of feeder sleeves that have four different exothermic and insulation composition, are characterized and two new geometric design are improved. Thereby, crucial parameters are revealed for application and selection of feeder sleeves. Also, casting applications were carried out by designing suitable molds in which feeder activity could be examined. Ductile iron, carbon steel, high manganese steel and stainless-steel alloys are used for casting application. The cooling curves during the castings were taken and the effects of the sleeves on the metal solidification process and the metal structure after solidification were investigated. The data obtained from feeder sleeves investigations and casting applications were processed on the casting simulation program and the characteristics of the feeder sleeves loaded in the program were improved. In this way, using the simulation program, the right feeder shirt selection is paved.

Keywords: Feeder sleeve, feeding, cooling curve, casting simulation

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	vi
ABSTRACT.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
TABLolar LİSTESİ.....	xxii

BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
-------------------------------	----------

BÖLÜM İKİ - TEORİK.....	5
--------------------------------	----------

2.1 Katılışmaya Giriş	5
2.1.1 Katılışmada Makro Olayları	5
2.1.2 Termal Aşırı Soğuma	8
2.1.3 Yapısal Aşırı Soğuma.....	9
2.1.3.1 Katılışma Sırasında Taşınım Olayları	15
2.1.4 Katılışmanın Akışkanlar Dinamiği.....	28
2.1.4.1 Çekinti Akışı	28
2.1.4.2 Doğal Taşınım.....	29
2.1.4.3 Yüzey Gerilimi Etkin (Marangoni) Konveksiyon	31
2.1.4.4 Dentiritler Arası Akış.....	32
2.1.5 Katılışma Büzülmesi.....	33
2.1.6 Çekinti Hataları ve Belirlenmesi.....	35
2.2 Alışimlarda Besleme.....	39
2.3 Besleyici Tasarımı.....	41
2.3.1 Besleyici Şekli.....	43
2.3.2 Besleyicilerin Boyutlandırılması.....	44
2.3.2.1 Caine Yöntemi	44
2.3.2.2 NRL Yöntemi.....	45
2.3.3 Besleme Mesafesi ve Besleyici Konumu	47
2.3.3.1 Niyama Kriteri	50

2.3.3.2 Besleyici ve Soğuk Uç Etkisi.....	52
2.3.3.3 Üstten Besleme.....	53
2.3.3.4 Yandan Besleme.....	55
2.3.3.5 Soğuk Uç Etkili Yandan Besleme.....	57
2.3.4 Besleyici Veriminin Arttırılması.....	58
2.4 Besleyici Gömlekler	58
2.4.1 Besleyici Gömlek Isıl Modülü	60
2.5 Döküm Benzeşim Programı	61
2.5.1 Benzeşim Programı Girdileri ve Program Çıktılarının Değerlendirilmesi	62
2.5.2 Benzeşim Programlarının Hesaplama Güçlükleri	68
2.5.2.1 Sürecin fiziği	68
2.5.2.2 Termofiziksel veriler ve sınır koşulları	69
2.5.2.3 Zaman Ölçeği	71
BÖLÜM ÜÇ - LİTERATÜR ÖZETİ.....	72
3.1 Metalotermik Reaksiyonlar	72
3.2 Dökümlerde Besleyici Gömlek Uygulamaları	73
3.3 Besleyici Tasarımı ve Uygulamaları Üzerine Yapılan Çalışmalar	75
3.4 Besleyici Tasarım ve Benzeşim Uygulamaları	78
3.5 Besleyici Gömleklerin Tasarım ve Seçim Parametreleri ile Benzeşim Uygulamaları.....	85
BÖLÜM DÖRT - MATERYAL VE YÖNTEM.....	94
4.1 Malzemeler ve Numuneler	94
4.1.1 Besleyici Gömleklerin Bileşim Tasarımı	95
4.1.2 Besleyici Gömleklerin Geometrik Tasarımı	97
4.1.3 Besleyici Gömleklerin Döküm Metali ile Etkileşim Tasarımı.....	97
4.1.4 Döküm Alaşımları.....	98
4.2 Yapısal İncelemeleri.....	100

4.2.1 Gömleklerin Yapısal İncelemeleri	101
4.2.2 Döküm Metalinin Yapısal zelliklerinin Belirlenmesi	101
4.3 Gömleklerin Isıl Karakterizasyonu	103
4.4 Döküm Uygulamaları	105
4.5 Benzeşim Çalışmaları	111
4.5.1 Benzeşim Programında Besleyici Gömlek Parametrelerinin Belirlenmesi	113
BÖLÜM BEş - ARAşTIRMA BULGULARI VE TARTIşMA.....	117
5.1 Yapısal İnceleme Sonuçları	118
5.1.1 Besleyici Gömleklerin Yapısal zellikleri	118
5.1.2 Döküm Metalinin Yapısal zellikleri	123
5.1.2.1 Küresel Grafitli Dökme Demirler	123
5.1.2.2 Etkileşim Tasarımı Yapılan Besleyicilerde Gömleklerin Döküm Metaline Etkisi	128
5.1.2.3 Çelik Alaşımları	130
5.2 Gömleklerin Termofiziksel zellikleri	137
5.2.1 Açıık Atmosfer Yanma zellikleri	137
5.2.2 Besleyici Gömlek Reaksiyon Süreçleri	139
5.2.3 Isıl Genleşme zellikleri	150
5.2.4 Isıl İletkenlik ve Geçirgenlik zellikleri	152
5.3 Geometrik Tasarımı Yapılan Gömlekler	154
5.4 Döküm Uygulamalarının Karşılaştırmalı Sıcaklık lçm Sonuçları	156
5.4.1 Geometrik Tasarımı Yapılan Besleyici Gömleklerin Döküm Uygulaması	166
5.5 Benzeşim Çalışmalarının Sonuçları	167
5.6 Döküm Parçasının Çekinti Hataları	190
BÖLÜM ALTI - GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	193
KAYNAKLAR	198

EKLER.....	205
-------------------	------------



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 a) Katı sıvı ara yüzeyinden ısı dağılımı izotermal olduğunda, b) düzlemsel olduğunda, c) düzensiz gerçekleştiğinde granyant değişimi	6
Şekil 2.2 Sıvı ve katı fazlarda sıcaklığa bağlı serbest enerjinin değişimi	7
Şekil 2.3 Soğuma eğrisindeki alt soğuma bölgesi.....	8
Şekil 2.4 a: Sıvının termal alt soğuması, b: Ara yüzeyin termal alt soğuması.....	9
Şekil 2.5 Katı çözeltili oluşturan bir alaşım için faz diyagramının kısmi gösterimi	10
Şekil 2.6 İkili faz diyagramında (a) katı sıvı ara yüzeyindeki termal (b) ve bileşimsel (c) değişimler	12
Şekil 2.7 Yapısal aşırı soğuma diyagramının ısı (GT) ve bileşimsel (GL) diyagramlarıyla karşılaştırılması	13
Şekil 2.8 Bir metalin katılaşması sırasında oluşan sıcaklık profili	18
Şekil 2.9 Katılaşan metalin ısı akışına direnç oluşturma durumunda sıcaklık dağılımı	20
Şekil 2.10 Dökme demir kalıp içinde katılaşan çeliğin kalınlığının değişimi	22
Şekil 2.11 Metal-kalıp arayüzeyinde boşluk oluşumu	22
Şekil 2.12 Katılaşma sırasında ısı akışını kalıp-metal arayüzeyinin kontrol etmesi durumunda ısı dağılımı.....	23
Şekil 2.13 Kalıp-metal ara yüzeyindeki ısı geçişi.....	25
Şekil 2.14 Hacim-ortalaması modeli.....	29
Şekil 2.15 Doğal taşınım ile sıvı metalin hareketi	30
Şekil 2.16 Sıvı fazda, katılaşma sırasında ve katı da meydana gelen büzülmenin şematik gösterimi.....	35
Şekil 2.17 a; dış makro çekinti, b; iç makro çekinti.....	36
Şekil 2.18 a; dış mikro çekinti, b; iç mikro çekinti	36
Şekil 2.19 Alaşımın katılaşma eğrisindeki kritik sıvı yüzdesi	37
Şekil 2.20 Fe-C alaşımlarının karbon eşdeğerine bağlı hacim değişimi.....	38
Şekil 2.21 a) Tümlşik boşluk hatası, b) Dağılmış boşluk c) Merkezi çizgisel boşluk hatası.....	38
Şekil 2.22 Sıcaklık gradyanının ve alaşım yapısının kristallenme bölgesine etkisi..	39

Şekil 2.23 Kum kalıpta mesafeye göre katılaşma süresinin gösterimi, (a)Bakır (99.8% Cu), (b)88/10/2 bakır çinko kalay alaşımı, (c) ötektik üstü gri dökme demir	40
Şekil 2.24 Farklı şekillerdeki besleyicilerin metal verimleri. a) silindirik, b) yarı küresel, c) ters tepe açılı, d) ekzotermik gömlek, e) kum besleyici, f) yalıtım esaslı besleyici, g) ekzotermik çift konik	44
Şekil 2.25 Şekil faktörü-hacim oranları grafiği.....	46
Şekil 2.26 A: besleyici çapı 2 cm kadar, B: besleyici çapı 10 cm kadar olan, C: besleyici çapı 14 cm kadar olanlar için besleyici hacmi-Besleyici yüksekliği grafiği	46
Şekil 2.27 Üstten ve yandan beslenen döküm parçaları.....	47
Şekil 2.28 Üst besleyici besleme mesafesi.....	48
Şekil 2.29 Yan besleyici besleme mesafesi	48
Şekil 2.30 İki besleyici kullanılması durumunda yan besleme mesafesi	49
Şekil 2.31 a) Besleyici besleme bölgesi, b) Soğuk uç besleme bölgesi	49
Şekil 2.32 Karakteristik sıcaklık dağılımı.....	50
Şekil 2.33 Niyama Kriteri ve çekinti oluşumu arasındaki ilişkinin şematik gösterimi	51
Şekil 2.34 a) Besleme yolu kapalı çekinti oluşumu söz konusu b) Besleme yolu açık çekinti oluşmaz	52
Şekil 2.35 Besleyici ve uç besleme bölgelerinin kesit kalınlığı ve genişliğe bağlı değişimi	53
Şekil 2.36 a) Besleyici bölgesi ve uç bölgesi kesişmekte, b) İki bölgenin kesişmeme durumu.....	54
Şekil 2.37 a) Uç bölgeler besleyici içinde kalırsa plaka sağlam, b) Plaka uzunluğu arttıkça görülen çekinti hataları	55
Şekil 2.38 Yandan beslenen plaka; a) Uç bölgeler besleyici bölgesi içinde, b) Besleyici bölgesi içinde uç bölge oluşumu yoktur, çekinti oluşur	56
Şekil 2.39 Döküm parça uzunluğu, döküm parça genişliği ve besleyici çapına bağlı besleme mesafesi	57
Şekil 2.40 Dökümlerde a: kum besleyici ve b: besleyici gömlek kullanımı.....	59

Şekil 2.41 200 mm çapta 250 mm yüksekliğindeki çelik parçada besleyici gömlek ve ekzotermik toz kullanımının soğuma hızlarının karşılaştırılması.....	60
Şekil 2.42 Ekzotermik besleyici kullanımının sıvı çeliğin soğumasına etkisi	61
Şekil 2.43 Benzeşim çıktıları: a) sıcaklık dağılımı, b) katı oranı dağılımı, c) katılaşma zamanı, d) doldurma zamanı, e) doldurma hızı, f) çekinti boşluğu.....	64
Şekil 2.44 Döküm, besleme aşamaları, katılaşma ve radyografik incelemenin görsel akışı.....	65
Şekil 2.45 Geleneksel ve bilgisayar destekli tasarımların karşılaştırılması	67
Şekil 3.1 Düşük yoğunluklu ekzotermik-yalıtım özellikli besleyici gömleğin gerçek döküm şartları (b) ve benzeşim programı sonuçlarının (a) karşılaştırması	74
Şekil 3.2 Termal çiftlerin yerleştirilmesi	75
Şekil 3.3 Tek besleyici kullanılarak gerçekleştirilen benzeşim	79
Şekil 3.4 Kırıcı maça kullanılarak gerçekleştirilen tasarım	79
Şekil 3.5 Farklı boyuttaki besleyicilerin kullanılması durumunda çekin sonuçlarının karşılaştırılması.....	83
Şekil 3.6 a; sıcak bölgelerin belirlenmesi, b; kum besleyici kullanımı, c; besleyici gömlek kullanımı.....	84
Şekil 3.7 Farklı gömleklere ait ısıl geçirgenlik eğrileri.....	86
Şekil 3.8 Besleyici gömlekler için a) yan görünüş, b)üst görünüş, c)termal çiftlerin kalıp içindeki pozisyonu.....	87
Şekil 3.9 a)Besleyici gömlekli ve gömleksiz soğuma eğrisi, b) sıcaklık ölçüm değerleri 16.000 saniyeye kadar; kırmızı çizgi besleyici gömlek kullanılan tasarımı, siyah çizgi referans tasarımı nitelemektedir	88
Şekil 3.10 Farklı besleyici gömleklerin kullanılması sonucunda metalin katılaşma davranışı.....	88
Şekil 3.11 a)besleyici gömlek kullanılmadan, b)yalıtım özellikli gömlek kullanılan, c)ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılan kalıp tasarımlarının benzeşim sonuçları (küpün bir kenarı 15cm)	89
Şekil 3.12 a)küp şekilli ve b)levha şekilli döküm parçalarının boyutları	89
Şekil 3.13 Besleyici döküm çalışmaları sonucunda döküm veriminin döküm hacmine göre değişimi	90
Şekil 4.1 Deneysel çalışmalarda izlenen süreçler	95

Şekil 4.2 DT-TGA analizlerinin için numune çıkarılan kapalı besleyici gömlek ve numunelerin alındığı kısımlar(A,B,C).....	96
Şekil 4.3 Döküm parçası ve besleyiciden numune çıkartılan bölgeler	102
Şekil 4.4 Gama radyografi deneyinde döküm parçalarının yerleştirilmesi.....	103
Şekil 4.5 Esnek kılıf uygulaması yapılan besleyici gömlek.....	155
Şekil 4.6 a: grafit bazlı, b: zirkon bazlı refrakter kaplama ile kaplanmış besleyici gömlek	98
Şekil 4.7 Kaplama uygulaması yapılmış gömleklerden numune çıkartılan bölgeler.	98
Şekil 4.8 Kalıp tasarımı 3 boyutlu katı modeli	105
Şekil 4.9 Küp model ve besleyici boyutları	106
Şekil 4.10 a: Alt ve orta derecenin birleştirilmesi döküm boşluğu b: Besleyici gömleklerin küp model üzerine yerleştirilmesi ve termal çiftlerin sabitlenmesi c: kalıplamanın tamamlanması	107
Şekil 4.11 Çelik döküm uygulamasında kullanılan a) döküm numunesi, b) kalıp tasarımı	108
Şekil 4.12 Benzeşim programında GS-60 çeliğinin çekinti bölgeleri.....	108
Şekil 4.13 Döküm numunesinin benzeşim yoluyla belirlenen boyutları	109
Şekil 4.14 Kalıp hazırlama aşamasında alt derecenin görünümü	110
Şekil 4.15 Termal çiftlerin kırılmasını önlemek için üst derecede bulunan metalik boruların gösterimi	111
Şekil 4.16 a) alt derecenin görünümü, b) üst derecenin görünümü	111
Şekil 4.17 Döküm benzeşim programında seçilen besleyici gömleğin ısı iletim katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi	114
Şekil 4.18 Döküm benzeşim programında seçilen besleyici gömleğin özgül ısısının sıcaklığa bağlı değişimi	114
Şekil 4.19 Döküm benzeşim programında seçilen besleyici gömleğin yoğunluğun sıcaklığa bağlı değişimi	115
Şekil 4.20 Soğuma hızı grafiği üzerinde eğimi hesaplanan bölgeler	115
Şekil 5.1 Karışım 2 mikroyapı görüntüsü (40 büyütme)	119
Şekil 5.2 Karışım 3 mikroyapı görüntüsü (40 büyütme)	119
Şekil 5.3 Yün (a) ve fiber (b) içeren karışımların SEM görüntüleri	120

Şekil 5.4 Karışım 1 yanmadan önceki (a), yandıktan sonraki (b) X ışınları kırınım deseni.....	121
Şekil 5.5 Karışım 2 yanmadan önceki (a), yandıktan sonraki (b) X ışınları kırınım deseni.....	122
Şekil 5.6 Karışım 3 yanmadan önceki (a), yandıktan sonraki (b) X ışınları kırınım deseni.....	122
Şekil 5.7 Karışım 4 yanmadan önceki (a), yandıktan sonraki (b) X ışınları kırınım deseni.....	123
Şekil 5.8 1 nolu bölge 200x büyütme.(a; Karışım 3, b; Karışım 4, c; Karışım 4 hatalı kısım).....	124
Şekil 5.9 2 Nolu bölge 200x büyütme.(A; Karışım 3, B; Karışım 4)	125
Şekil 5.10 3 nolu bölge 200x büyütme.(A; Karışım 3, B; Karışım 4)	125
Şekil 5.11 Besleyicilerin üst bölgeleri 100x büyütme.(A; Karışım 3, B; Karışım 4)	126
Şekil 5.12 Besleyicilerin orta bölgeleri 100x büyütme.(A; Karışım 3, B; Karışım 4)	126
Şekil 5.13 Besleyicilerin alt bölgeleri 100x büyütme.(A; Karışım 3, B; Karışım 4)	126
Şekil 5.14 4 nolu bölge SEM görüntüleri. (A; Karışım 3, B; Karışım 4)	127
Şekil 5.15 Kaplama uygulanmamış besleyici gömleklerin kullanıldığı metal numunelerinin mikro yapıları a: iç kısım, b: dış kısım.....	129
Şekil 5.16 Zirkon bazlı kaplama uygulanmış besleyici gömleklerin kullanıldığı metal numunelerinin mikro yapıları A: iç kısım, B: dış kısım.....	129
Şekil 5.17 Grafit bazlı kaplama uygulanmış besleyici gömleklerin kullanıldığı metal numunelerinin mikro yapıları a: iç kısım, b: dış kısım.....	130
Şekil 5.18 4130-1 döküm uygulamasında orta ekzotermik karakterli besleyici gömlek kullanılarak üretilen döküm parçasının 1 nolu bölge görüntüsü	131
Şekil 5.19 4130-1 döküm uygulamasında orta ekzotermik karakterli besleyici gömlek metalinin 2 nolu bölge görüntüsü; a) üst bölge, b) alt bölge.	131
Şekil 5.20 4130-1 döküm uygulamasında orta ekzotermik karakterli besleyici gömlek metalinin 3 nolu bölge görüntüsü; a) Besleyici gömleğe temas eden yüzey, b) iç kısım	131

Şekil 5.21 4130-1 döküm uygulamasında yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlek kullanılarak üretilen döküm parçasının(1 nolu bölge) görüntüsü	132
Şekil 5.22 4130-1 döküm uygulamasında yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlek metalinin 2 nolu bölge görüntüsü; a) üst bölge, b) alt bölge	133
Şekil 5.23 4130-1 döküm uygulamasında yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlek metalinin 3 nolu bölge görüntüsü; a) besleyici gömleğe temas eden yüzey, b) iç kısım	133
Şekil 5.24 4130-2 döküm uygulamasında orta ekzotermik karakterli besleyici gömlek metalinin 2 nolu bölge görüntüsü; a) üst bölge, b) alt bölge	134
Şekil 5.25 4130-2 döküm uygulamasında orta ekzotermik karakterli besleyici gömlek metalinin 3 nolu bölge görüntüsü.(besleyici gömleğe temas eden yüzey)	134
Şekil 5.26 4130-2 döküm uygulamasında yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlek metalinin 2 nolu bölge görüntüsü; a) üst bölge, b) alt bölge	134
Şekil 5.27 4130-2 döküm uygulamasında yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlek metalinin 3 nolu bölge görüntüsü; a) besleyici gömleğe temas eden yüzey, b) iç kısım	135
Şekil 5.28 AISI 4130-1 döküm uygulaması 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	136
Şekil 5.29 AISI 4130-1 döküm uygulaması 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	136
Şekil 5.30 Besleyici gömlek karışımlarının açık atmosfer yanma davranışına etkisi	139
Şekil 5.31 Karışım 1, A bölgesi DTA-TGA grafiği.....	140
Şekil 5.32 Karışım 1, B bölgesi DTA-TGA grafiği.....	140
Şekil 5.33 Karışım 1, C bölgesi DTA-TGA grafiği.....	141
Şekil 5.34 Karışım 2, A bölgesi DTA-TGA grafiği.....	141
Şekil 5.35 Karışım 2, B bölgesi DTA-TGA grafiği.....	142
Şekil 5.36 Karışım 2, C bölgesi DTA-TGA grafiği.....	142

Şekil 5.37 Karışım 3, A bölgesi DTA-TGA grafiği.....	143
Şekil 5.38 Karışım 3, B bölgesi DTA-TGA grafiği.....	144
Şekil 5.39 Karışım 3, B bölgesi DTA-TGA grafiği.....	144
Şekil 5.40 Karışım 4, A bölgesi DTA-TGA grafiği.....	145
Şekil 5.41 Karışım 4, B bölgesi DTA-TGA grafiği.....	145
Şekil 5.42 Karışım 4, C bölgesi DTA-TGA grafiği.....	146
Şekil 5.43 Karışım 2 DSC grafiği	147
Şekil 5.44 Karışım 4 DSC grafiği	148
Şekil 5.45 Karışım 2 için özgül ısının sıcaklıkla değişimi.....	149
Şekil 5.46 Karışım 4 için özgül ısının sıcaklıkla değişimi.....	149
Şekil 5.47 Karışım 1 için besleyici gömlekte genişleme oranının sıcaklıkla değişimi	150
Şekil 5.48 Karışım 2 için besleyici gömlekte genişleme oranının sıcaklıkla değişimi	151
Şekil 5.49 Karışım 3 için besleyici gömlekte genişleme oranının sıcaklıkla değişimi	151
Şekil 5.50 Karışım 4 için besleyici gömlekte genişleme oranının sıcaklıkla değişimi	152
Şekil 5.51 Karışım 4-besleyici gömleğinde ısı geçirgenlik, ısı iletkenlik ve özgül ısının sıcaklıkla değişimi	153
Şekil 5.52 Karışım 2 -besleyici gömleğinde ısı geçirgenlik, ısı iletkenlik ve özgül ısının sıcaklıkla değişimi	154
Şekil 5.53 Geleneksel ve yeni tasarımı yapılan mini besleyicilerde kuvvete bağlı şekil değişimi	156
Şekil 5.54 EN-GJS-500 alaşımında Karışım 3 ve Karışım 4 besleyici gömleklerinin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması (D3 nolu döküm).....	157
Şekil 5.55 EN-GJS-500 alaşımında Karışım 1 ve Karışım 2 besleyici gömleklerinin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması (D6 nolu döküm).....	159
Şekil 5.56 AISI 4130-1 döküm uygulamasında ölçülen sıcaklık değerlerinin süreye bağlı değişimi	161
Şekil 5.57 A128M-A93-1 döküm uygulamasında ölçülen sıcaklık değerlerinin süreye bağlı değişimi	163

Şekil 5.58 AISI 316-1 döküm uygulamasında ölçülen sıcaklık değerlerinin süreye bağlı değişimi	164
Şekil 5.59 Yeni tasarlanan mini besleyici ile yapılan (a) kalıp, (b) ve (c) döküm sonrası görüntüleri	167
Şekil 5.60 KGDD alaşımında döküm uygulamalarında yüksek ekzotermik besleyici gömlek merkezden ölçülen ve benzeşim yoluyla hesaplanan sıcaklıkların karşılaştırılması.....	168
Şekil 5.61 KGDD alaşımında döküm uygulamalarında yüksek ekzotermik besleyici gömlek iç yüzeyden ölçülen ve benzeşim yoluyla hesaplanan sıcaklıkların karşılaştırılması.....	169
Şekil 5.62 KGDD alaşımında döküm uygulamalarında yüksek ekzotermik besleyici gömlek dış yüzeyden ölçülen ve benzeşim yoluyla hesaplanan sıcaklıkların karşılaştırılması.....	169
Şekil 5.63 KGDD alaşımında döküm uygulamalarında orta ekzotermik besleyici gömlek merkezden ölçülen ve benzeşim yoluyla hesaplanan sıcaklıkların karşılaştırılması.....	170
Şekil 5.64 KGDD alaşımında döküm uygulamalarında orta ekzotermik besleyici gömlek iç yüzeyden ölçülen ve benzeşim yoluyla hesaplanan sıcaklıkların karşılaştırılması.....	170
Şekil 5.65 KGDD alaşımında döküm uygulamalarında orta ekzotermik besleyici gömlek dış yüzeyden ölçülen ve benzeşim yoluyla hesaplanan sıcaklıkların karşılaştırılması.....	171
Şekil 5.66 AISI 4130 alaşımı için merkez bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.(1000 saniye).....	172
Şekil 5.67 AISI 4130 alaşımı için merkez bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (1000-4000 saniye arası).....	173
Şekil 5.68 AISI 4130 alaşımı için merkez bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (5000 saniye).....	173
Şekil 5.69 AISI 4130 alaşımı için iç yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (1000 saniye).....	174
Şekil 5.70 AISI 4130 alaşımı için iç yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.(1000-4000 saniye arası).....	174

Şekil 5.71 AISI 4130 alaşımı için iç yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (5000 saniye).....	175
Şekil 5.72 AISI 4130 alaşımı için dış yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (1000 saniye).....	175
Şekil 5.73 AISI 4130 alaşımı için dış yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (2000 saniye).....	176
Şekil 5.74 AISI 4130 alaşımı için dış yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (4000 saniye).....	176
Şekil 5.75 AISI 4130 alaşımı için merkez bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (1000 saniye).....	177
Şekil 5.76 AISI 4130 alaşımı için merkez bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (1000-4000 saniye arası).....	177
Şekil 5.77 AISI 4130 alaşımı için merkez bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (5000 saniye).....	178
Şekil 5.78 AISI 4130 alaşımı için iç yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (1000 saniye).....	178
Şekil 5.79 AISI 4130 alaşımı için iç yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.(1000-4000 saniye arası).....	179
Şekil 5.80 AISI 4130 alaşımı için iç yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (5000 saniye).....	179
Şekil 5.81 AISI 4130 alaşımı için dış yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (1000 saniye).....	180
Şekil 5.82 AISI 4130 alaşımı için dış yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (2000 saniye).....	180
Şekil 5.83 AISI 4130 alaşımı için dış yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (4000 saniye).....	181
Şekil 5.84 AISI 4130 alaşımı için merkez bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.....	182
Şekil 5.85 AISI 4130 alaşımı için iç yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.....	183
Şekil 5.86 AISI 4130 alaşımı için dış yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.....	184

Şekil 5.87 A128M-A93-A alaşımı için merkez ve iç yüzey bölgelerinin sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (yüksek ekzotermik).....	185
Şekil 5.88 A128M-A93-A alaşımı için merkez ve iç yüzey bölgelerinin sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (orta ekzotermik).....	186
Şekil 5.89 AISI 316 alaşımı için merkez bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.....	187
Şekil 5.90 AISI 316 alaşımı için iç yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.....	187
Şekil 5.91 AISI 316 alaşımı için dış yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.....	188
Şekil 5.92 AISI 4130 alaşımı ve Exokal-3 besleyici kullanılarak yapılan benzeşim çalışmasının çekinti bölgeleri.....	189
Şekil 5.93 AISI 4130 alaşımı ve Exokal-1 besleyici kullanılarak yapılan benzeşim çalışmasının çekinti bölgeleri.....	189
Şekil 5.94 Yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlek kullanılarak dökülen parçanın radyografi görüntüsü (GS-60 alaşımı).....	191
Şekil 5.95 Orta ekzotermik karakterli besleyici gömlek kullanılarak dökülen parçanın radyografi görüntüsü (GS-60 alaşımı).....	191
Şekil 5.96 Yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlek kullanılarak dökülen parçanın radyografi görüntüsü.(4130-1 alaşımı).....	192
Şekil 5.97 Orta ekzotermik karakterli besleyici gömlek kullanılarak dökülen parçanın radyografi görüntüsü (4130-1 alaşımı).....	192
Şekil 5.98 ASTM-E446'e göre çekinti bölgelerinin seviyelendirilmesi.....	192

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Katılaşmayı etkileyen iç ve dış etkenler	5
Tablo 2.2 Dört temel taşınım olayı için faz değeri, yayılım katsayısı	16
Tablo 2.3 Kalıp ve metallere ilişkin bazı sabitler	27
Tablo 2.4 Bazı metallerin katılaşma sırasındaki hacim değişimleri	34
Tablo 2.5 Alaşımların katılaşma karakteristikleri	40
Tablo 2.6 Yaygın kullanılan döküm benzeşim programları.....	63
Tablo 2.7 Yaygın kullanılan 3 boyutlu çizim programları.....	63
Tablo 2.8 Yaygın döküm süreçleri.....	68
Tablo 2.9 Döküm benzeşim programının hesaplamakta zorlandığı işlemler.....	69
Tablo 2.10 Ekzotermik malzemeler için gerekli termofiziksel veriler ve teknikler ..	70
Tablo 3.1 Besleyici gömlek tiplerine göre benzeşim ve gerçek döküm uygulamaları sonuçlarının karşılaştırılması.....	74
Tablo 3.2 Farklı besleyici tasarımlarından elde edilen sonuçların kıyaslanması.....	80
Tablo 3.3 Farklı besleyici tasarımlarından elde edilen sonuçların kıyaslanması.....	81
Tablo 3.4 Besleyici gömlek parametreleri	87
Tablo 3.5 Döküm benzeşim çalışmalarında kullanılan boyutlar.....	90
Tablo 4.1 Gömlek içerikleri ve bazı özellikleri	96
Tablo 4.2 Kullanılan besleyici gömleklerin ölçüleri.....	97
Tablo 4.3 Yüksek ve orta egzotermik besleyici gömleklerin döküm uygulamasındaki metalinin kimyasal kompozisyonu (% ağırlık).....	99
Tablo 4.4 Çelik dökümlerin kimyasal analiz sonuçları (% ağırlık)	100
Tablo 4.5 Döküm uygulaması aşamasında parçasının parça boyutlarının belirlenmesi için döküm benzeşim çalışmaları yapılan parça boyutları.....	109
Tablo 4.6 Ocak sıcaklıkları ve döküm süreleri.	110
Tablo 4.7 Benzeşim programında uygulanan döküm parametreleri	112
Tablo 4.8 Döküm benzeşim çalışmalarında kullanılacak besleyici gömleklerin özelliklerinde yapılan değişiklikler	116
Tablo 5.1 Yün ve fiber üzerinden alınan EDS analizleri	120
Tablo 5.2 EDS alınan bölgeler ve bazı elementlerin oranları	128
Tablo 5.3 AISI 4130 alaşımlı besleyici metallerinin EDS sonuçları	137

Tablo 5.4 Yakma testleri karşılaştırmalı sonuçları	138
Tablo 5.5 DT-TG analizleri sonuçlarının karşılaştırması	146
Tablo 5.6 KGDD döküm uygulamalarında yüksek ekzotermik besleyici gömleklerin soğuma üzerine etkisi	158
Tablo 5.7 KGDD döküm uygulamalarında orta ekzotermik besleyici gömleklerin soğuma üzerine etkisi	159
Tablo 5.8 4130 alaşımı seçilerek yapılan deneme dökümlerinde ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri ve hesaplanan soğuma hızları	162
Tablo 5.9 Östenitik mangan çeliği alaşımı seçilerek yapılan deneme dökümlerinde ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri ve hesaplanan soğuma hızları	164
Tablo 5.10 AISI 316 çelik alaşımı seçilerek yapılan deneme dökümlerinde ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri ve hesaplanan soğuma hızları	166

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Metal paçaların üretiminde döküm yöntemi bilinen en eski üretim yöntemlerinin başında gelmektedir. Karmaşık şekilli parçaların tek parça halinde sorunsuz üretilmesi için döküm yöntemi vazgeçilmez olmaktadır. Verimli bir döküm gerçekleştirebilmek için doğru kalıp tasarımı büyük önem taşımaktadır.

Döküm kalıbı, döküm parçası, besleyici, yolluk, çıkıcılar ve ve diğer., yardımcı bileşenlerden oluşmaktadır. Bileşenlerin tamamı yüksek döküm sıcaklığına dayanıklı kalıp malzemesinde uygun boşluklar olarak tasarlanmaktadır. Döküm parçanın eksiksiz elde edilebilmesi için ilgili bileşenlerin tamamının sistematik tasarlanması gerekir. Yolluk ve çıkıcılar sıvı metalin hareketini düzenlerken, besleyici kısmı metal tamamen katılaşana kadar görev yapmaktadır. Diğer bileşenler besleyici ve yolluk sistemine yardımcı olmaktadır.

Besleyiciler, sıvı metal kalıbı doldurup katılaşma başladıktan sonra göreve alır. Besleyici tasarımında, besleyicinin ve besleyicinin döküm parçasına bağlandığı boyun kısmının en son katılaşması beklenir. Bu sırada besleyicinin, besleme mesafesi içerisindeki tüm bölgelere sıvı metali ulaştırması beklenir. Besleyicinin belirlenmesinde yapılan tüm hesaplamalar söz konusu kısıtlamalar nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Besleyici belirlenmesinde besleyicinin şekli, boyutu ve bağlantı bölgesi tespit edilir. Besleyiciyi daha uzun süre sıcak tutabilmek amacıyla geliştirilen yardımcı elemanlar gerekli besleyici boyutlarının oldukça küçülmesine sağlayarak kalıp verimini artırmaktadır. Besleyicinin tamamını veya büyük kısmını saran ekzotermik ve yalıtım esaslı gömlekler en sık kullanılan yardımcı elemanlardır.

Besleyici gömleklerin temel amacı içerdiklerin bileşenlerin gösterdiği kimyasal reaksiyon ile sıvı metali ısıtması ve uzun süre sıcak tutmasıdır. Ayrıca bileşimindeki refrakter malzemeler sayesinde hem kimyasal yollarla üretilen ısıнын hem de sıvı metalin katılaşması sırasında ortaya çıkan yüksek ısıнын hızlı yayılımını engellemektir. Böylece metalin soğuma süresinin uzamasına ve besleyicideki sıvı metalin en yüksek

oranda döküm parçası içerisindeki en uzak mesafeye aktarılmasını sağlamaktır. Tüm bu özellikleriyle besleyici gömlekler ısı üretebilen yüksek yalıtım özelliğine sahip döküm destek elemanlarıdır.

Besleyici gömlekler kalıplama sırasında belirlenen boyutlarda yapılabileceği gibi hazır olarak da temin edilebilmektedir. Gömleklerin ön şekillendirilmiş olması, modüllerinin önceden belli olması ve farklı tasarımlarda üretilebilir olmaları kullanımının yaygınlaşmasında en önemli etkenlerdir. Fakat besleyici gömleklerin özelliklerinin tam olarak belirlenmesi güçtür. Hem ekzotermik hem de yalıtım özelliğini bir arada bulunduran gömlekler için standart test yöntemleri bulunmamaktadır. Besleyici gömleklerin döküm sırasında doğru kullanılabilmesi açısından ısı özellikleri ön plana çıkmaktadır. Gömlekler hem yüksek yalıtım hem de yüksek enerji üretimi özelliklerini bir arada sunduklarından ısı karakterizasyonu oldukça zordur. Bilindiği üzere yalıtım özelliğinin test edildiği tüm malzemelerde ısı üretimi olmadığı kabul edilir. Ayrıca kimyasal reaksiyon sonucu üretilen ısıya doğru tespit edilebilmesi için de ortaya çıkan ısıya en azının reaksiyon ürünleri tarafından tutulması gerekir. Besleyici gömleklerde ekzotermik reaksiyon öncesi, sonrası ve sırasında gömlek yapısı tamamen değiştiğinden her iki analiz yönteminin gömleklere uygulanması zorlaşmaktadır. Bu nedenle besleyici gömleklerin termofiziksel özellikleri belirlenirken karakterizasyon ve kullanım şartlarının bir arada değerlendirilmesi yerinde olacaktır.

Benzeşim programları döküm tasarımında önemli bir yere sahiptir. Programların etkin kullanımı doğru verilerin girilmesi ile mümkündür. Döküm şartları ile birlikte belirlenen besleyici gömlek özelliklerinin doğru kullanılmasını sağlamak amacıyla döküm benzeşim programlarıyla değerlendirilmesi besleyici gömlek seçimini kolaylaştırır. Böylece çok daha az döküm uygulaması yapılarak doğru kalıp tasarımı belirlenmiş olacaktır. En verimli döküm kalıbını tasarlayabilmek açısından benzeşim programları dökümcülere yol gösterici olmaktadır.

Bu çalışmada, besleyici gömleklerin termofiziksel özellikleri analiz edilerek döküm uygulamaları ile doğrulaması yapılmıştır. Belirlenen özelliklerinin tümü benzeşim programlarına uygulanarak sanal ve gerçek uygulama şartlarının benzerliği tartışılmıştır. Besleyici gömleklerin küresel grafitli dökme demir, karbon çeliği, yüksek manganlı ve paslanmaz çelik alaşımları ile döküm denemeleri ve diferensiyel termal analiz (DTA), termal gravimetrik analiz (TGA), difransiyel taramalı kalorimetre cihazı (DSC), lazer flaş nokta termal geçirgenlik cihazı (LFA) ve dilatometre ile yapılan ısı karakterizasyonu sonucunda elde edilen verilerin döküm benzeşim programlarıyla kullanımı araştırılmıştır. Yüksek ve orta ekzotermik olmak üzere iki farklı karaktere sahip ikişer farklı bileşimdeki gömlek incelenmiştir. Yoğunluk, ısı verimi, ısı geçirgenlik ve özgül ısı gibi besleyici gömlekler için belirleyici olan özellikler ısı karakterizasyon yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Besleyici gömleklerin reaksiyon öncesi ve sonrası ısı özellikleri farklılık gösterdiğinden her bir bileşim için iki farklı numune üzerinden incelemeler yapılmıştır. TG analizleri ile gömleklerin sıcaklığa bağlı ağırlık değişimleri, DTA ve DSC ile besleyici gömlekler tarafından üretilen ısıyı, LFA ile ısı geçirgenlik ve ısı iletimi, dilatometre ile sıcaklığa bağlı hacim değişimleri belirlenmiştir. Stereo mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM), X ışınları kırınımı (XRD) ile gömleklerin yapısal özellikleri incelenmiştir. Bundan sonra “besleyici gömlek” terimi yerine döküm sektöründe yaygın kullanılan “gömlek” ifadesi kullanılacaktır.

Küresel grafitli dökme demir alaşımı döküm uygulaması çalışmalarında gömleklerin besleme verimleri incelenirken ısı analiz yöntemleri ile belirlenemeyen reaksiyona girme süresi tespit edilmiştir. Bu uygulamadan sonra belirlenen yüksek ve orta ekzotermik karaktere sahip besleyici gömlek ile çelik alaşımı uygulamalarına geçilmiştir. Karbon çeliği, yüksek manganlı çelik ve paslanmaz çelik alaşımı denemeleri ile gömleklerin besleme mesafeleri üzerine etkileri incelenmiştir. Döküm uygulamalarının tamamında besleyici gömlek iç, dış yüzeyi ve merkezinden sıcaklık ölçümleri alınarak elde edilen soğuma eğrilerinden sıvı metalin katılaşma davranışı üzerine besleyici gömleklerin etkisi incelenmiştir.

Kullanılan döküm benzeşim programında ısı karakterizasyon ile belirlenen gömlek özellikleri ve döküm uygulamaları sonuçları karşılaştırılarak soğuma rejimleri benzetilmeye çalışılmıştır. Bu yolla alaşıma uygun besleyici gömlek seçiminde önemli olan özelliklerin tespiti yapılmıştır. Böylece benzeşim uygulamalarında gömlek özelliklerinin katılaşmaya etkisi ortaya konmuştur.



BÖLÜM İKİ

TEORİK

2.1 Katılaşmaya Giriş

Sıvı metal kalıba döküldükten sonra döküm yöntemine ve parça büyüklüğüne göre katılaşma saniyeler içerisinde bitmekte veya saatler sürmektedir. Metalik parçanın kullanımı sırasındaki gerekli özelliklerin kontrolü içyapı ile sağlanır. İçyapı ise metal katılaşması sırasında kontrol edilmektedir. Döküm parçanın fiziksel ve mekanik özellikleri katılaşmayı etkileyen iç ve dış etkenler ile belirlenmektedir (Tablo 2.1). Sıvı metal katılaştıktan sonra ortaya çıkan yapı birincil yapı olarak bilinir. Döküm parçalara daha sonra uygulanacak ısı ve termokimyasal işlemler ile oluşan içyapılara ise ikincil içyapı denir (Aran, 2019; Rundman, 2010).

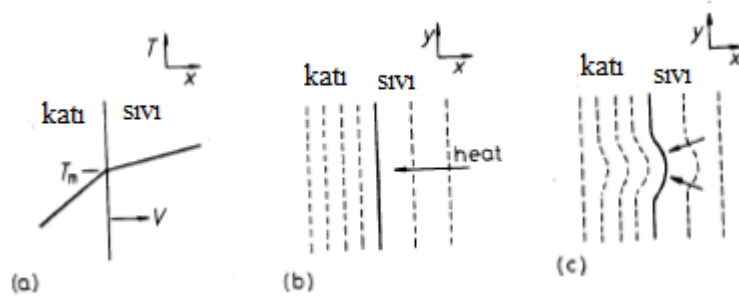
Tablo 2.1 Katılaşmayı etkileyen iç ve dış etkenler (Rundman, 2010)

İç Etkenler	• Kimyasal bileşim • Katılaşma sırasındaki soğuma hızı • Katılaşma sonrasında uygulanan ısı ve mekanik işlemler	Bu etkiler en son mikro yapı ve döküm özellikleri belirler
Dış Etkenler	• Metalin temizliği • Mikro yapı kontrolü için yapılan eklemeler • Kalıp tasarımı • Yolluk ve besleyici tasarımı • Katılaşma hızının kontrolü • Katılaşma sonrası sıcaklığın kontrol altında tutulması	Bu etkiler döküm tasarımcısı tarafından belirlenerek iç faktörler kontrol edilebilmesini sağlar

2.1.1 Katılaşmada Makro Olayları

Birçok metal sıvı durumdan katılaşırken faz dönüşümü ve ara yüzey etkileşimi göstermektedir (Şekil 2.1). Katılaşma sırasında alaşıma göre değişen üç farklı olay meydana gelmektedir. Birincisi, sıvı-katı ara yüzeyinde ergime gizli ısıya serbest kalır. Bu durum katılaşma hızını ve mikro yapıyı etkiler. İkincisi, sıvı çözelti içerisindeki çözünen katı, sıvı veya sıvı-katı tarafından itilerek makro veya mikro segregasyona

neden olur. Üçüncüsü, metallerin çoğunun katılaşması sırasında büzülme gösterir ve çekinti hatası meydana gelebilir (Jabbari ve Hosseinzadeh, 2013).



Şekil 2.1 a) Katı sıvı ara yüzeyinden ısı dağılımı izotermal olduğunda, b) düzlemsel olduğunda, c) düzensiz gerçekleştiğinde granyant değişimi (Porter ve Easterling, 1992)

Denge, termodinamik durumunun en iyi ifadesi olarak öne sürülmektedir. Denge durumunu faz diyagramlarını ve sıvı-katı arasındaki etkileşimi ile açıklanmaktadır. Fakat dengede olamayan katılaşma durumlarını termodinamik olarak ifade etmek zordur. Bu durumda sınırlı denge durumları varsayılarak termodinamik ifadeler oluşturulabilir. Dökümde termodinamiğin uygulaması ele alındığında metal alaşımları ve saf metaller ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Saf metallerin döküm uygulamalarındaki zorluğu göz önünde bulundurularak, alaşımların katılaşmalarının termodinamik açıklamaları üzerinde durulmuştur (Flemings, 1974).

Sıvı halden ergime noktasına (T_m) kadar yavaşça soğutulan saf sıvı bir metal düşünelim. T_m noktasında katı, ergime gizli ısını serbest bırakmaya başlar. Burada ergime gizli ısı termodinamik olarak entropi değişiminde etkilenen entalpi olarak tanımlanır. Bu ilişki G_s (katı), G_l (sıvı) Gibbs Serbest Enerjisi'nin, H_s (katı), H_l (sıvı), entalpi ve S_s (katı), S_l (sıvı), entropiye bağlı değişimi olarak bilene prensibe dayanmaktadır. Katı ve sıvı için benzer durum geçerlidir (Rundman, 2010).

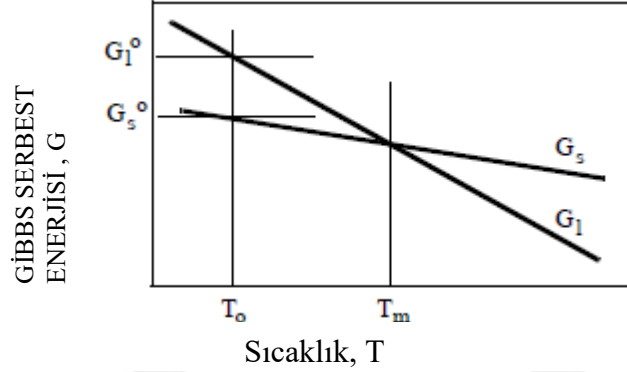
$$G_l = H_l - TS_l \text{ ve } G_s = H_s - TS_s \quad (2.1)$$

Şekil 2.2'deki eğrilerin eğimi entropiyi verir. Düzensiz sıvının entropisi düzenli katının entropisinden daha yüksektir. Ergime noktasında sıvı ve katı denge durumundadır.

$$H_s - H_l = T_m (S_s - S_l) = \text{Katılaşma fazla ısıısı} \quad (2.2)$$

$T > T_m$ ise $G_l < G_s$ olur ve sıvı faz kararlı durumdadır.

$T < T_m$ ise $G_l > G_s$ olur ve katı faz kararlı durumdadır.



Şekil 2.2 Sıvı ve katı fazlarda sıcaklığa bağlı serbest enerjinin değişimi (Rundman, 2010)

T_0 sıcaklığında sıvı aşırı soğuma gösterir. Bu sıcaklıktaki itici güç sıvı ve katıdaki serbest enerji değişimdir. Gerçek sistemlerde T_m civarında heterojen çekirdeklenme gerçekleşir ve büyüme devam eder. Alt soğuma ile çekirdeklenme desteklenir. Katılaşma süresince (t_s) çekirdek büyümesi tamamlanır.

T_m sıcaklığında katı faz ve sıvı faz denge durumundadır. Bu durumda serbest enerji değişimi sıfır olur.

$$\Delta G_v = G_l - G_s = (H_l - H_s) - T_m (S_l - S_s) = 0 \quad (2.3)$$

$\Delta H_f = H_l - H_s$ olarak alındığında,

$$\Delta H_f = T_e \Delta S_f \quad \text{veya} \quad \Delta S_f = \Delta H_f / T_m \quad (2.4)$$

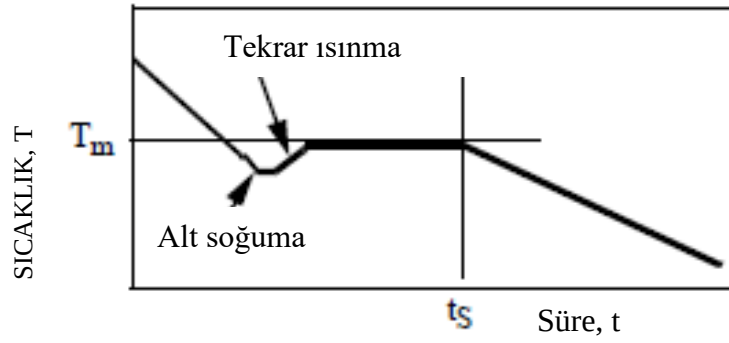
ΔH_f ergime sırasında veya gizli ısı değişimi ile ortaya çıkan entalpi değişimidir. ΔS_f ergime entropisidir. T_m sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda,

$$\Delta G_v = \Delta H_f - T \frac{\Delta H_f}{T_m} = \Delta H_f \frac{T_m - T}{T_m} = \Delta S_f \Delta T \quad (2.5)$$

ΔT katı-sıvı dönüşümündeki alt soğuma değeridir. Eşitlik 2.5'ten,

$$\Delta T = \Delta G_v / \nabla S_f$$

olarak tanımlanabilir. Eğer $\Delta T = 0$ ise $\Delta G_v = 0$ olur. Bu durumda sistem dengededir ve dönüşüm gerçekleşmez.



Şekil 2.3 Soğuma eğrisindeki alt soğuma bölgesi (Rundman, 2010)

Termodinamik olarak aşırı soğutmanın fazla olması mümkün değildir. Basitçe, katılaşmanın gerçekleşmesi için aşırı soğutmanın gerekli olduğunu göstermektedir (Şekil 2.3). Bu olguyu daha fazla anlamak için kinetik düşünceler ortaya konmalıdır. Katı çözelti oluşturan alaşımlarda katılaşma, alaşım sistemi ve alaşım kompozisyonu ile belirlenen bir sıcaklık aralığında meydana gelir.

Bu analiz dört basitleştirici varsayım altında yapılmıştır.

- a) Saf metal
- b) Sabit basınç
- c) Düzgün katı-sıvı ara yüzeyi
- d) Sıvı metalde termal gradyant olmadığı.

Bu, katılaşma üzerine serbest enerjideki tek değişimin, bir sıvı hacminin katı ΔG_v değişmesinden kaynaklandığını belirtmekle ilgilidir. Ancak, dört varsayım gevşetildiğinde, sistem serbest kalmasını sağlayacaktır. Dört pozitif terim, sırasıyla eğrilik, termal, yapısal ve basınç değişimlerinden dolayı serbest enerjideki artıştır. Demir alaşımlarında genellikle termal ve yapısal değişimler meydana geldiğinden, daha çok bu terimler üzerinde durulmuştur (Stefanescu, 2009).

2.1.2 Termal Aşırı Soğuma

Çekirdeklenme oluşuktan sonra katı-sıvı ara yüzeyinde çekirdek büyümesi kinetik ve dışa doğru ilerlemektedir. Bununla birlikte, çekirdeklenme oluşumu zorlaşırsa veya katıya sıvıdan ısı akışı gecikirse ilave bir alt soğuma daha oluşur ve buna *termal alt soğuma* (ΔT_T) denir. Kinetik alt soğuma ihmal edildiğinde, söz konusu alt soğuma

durumu sıvının, düz bir ara yüzeyle katılaştıran saf metalin denge sıcaklığı altında olduğu miktarla ifade edilmektedir. Termal aşırı soğuma;

$$\Delta T_T^{bulk} = T_m - T_l \quad (2.6)$$

T_{siv} , ara yüzeyden uzaktaki sıvı metalin sıcaklığıdır.

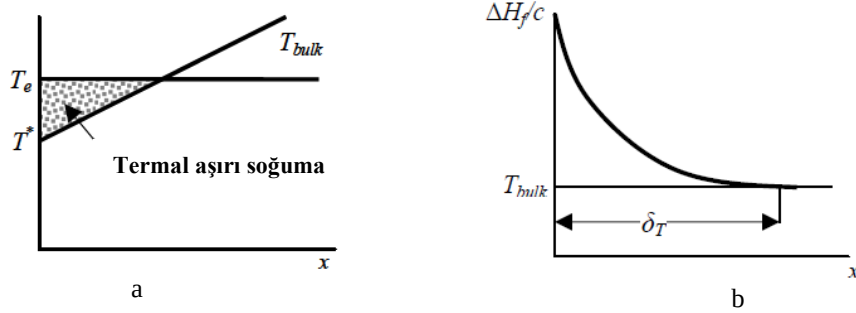
Katı-sıvı ara yüzeyinde gizli ısının iletilememesi göz önünde bulundurulmalıdır. Ara yüzeydeki sınır tabakanın $\Delta H/c$ kalınlığının, δ_T mesafesindeki ($x=0$) ısı birikiminin değişim Şekil 2.4b’de gösterilmektedir. Ara yüzeydeki termal aşırı soğuma;

$$\Delta T_T^* = T^* - T_l \quad (2.7)$$

olarak hesaplanabilir. Serbest enerji ile ilgili değişim;

$$\Delta G_T = \Delta S_f (T^* - T_l) \quad (2.8)$$

olmaktadır.



Şekil 2.4 a: Sıvının termal alt soğuması, b: Ara yüzeyin termal alt soğuması (Stefanescu, 2009)

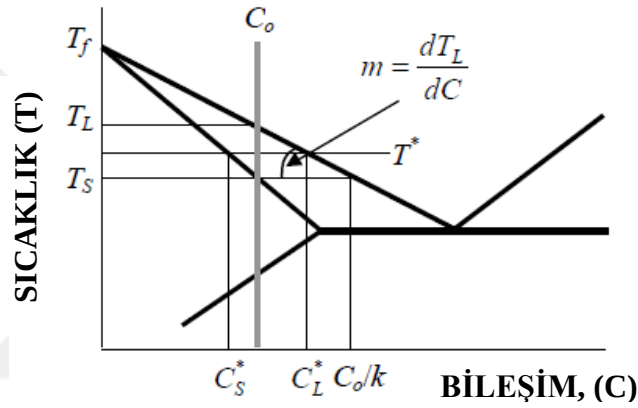
Bazı durumlarda metaller katılaştırmadan önce oldukça fazla soğuyabilir. Örneğin, saf demir, ergimeme (denge) sıcaklığı altında, 300°C veya daha fazla, belirli ve kontrollü koşullar altında aşırı soğutulabilmektedir (Stefanescu, 2009).

2.1.3 Yapısal Aşırı Soğuma

Alaşımlar için, katı-sıvı bölgesi serbest enerjide ilave bir alt soğutmaya karşılık gelen ek bir değişiklik getirmektedir. Tek fazlı katı çözelti oluşturmak üzere katılaştıran

bir alaşımın faz diyagramının sol köşesi şekil 2.5'te göstermektedir. T_L liküdü sıcaklığı, T_S solidüs sıcaklığı, T^* katılaşma sırasında herhangi bir andaki ara yüzey sıcaklığını göstermektedir. T^* sıcaklığında ara yüzeydeki katı bileşimi C_S , sıvı bileşimi C_L ile gösterilmektedir. Katılaşmanın başladığı andaki alaşımın bileşimi C_o 'dır. Denge dağılım katsayısı veya çözünen dağılım katsayısı, k belli bir sıcaklıkta alaşımın çözünen bileşeninin katı ve sıvı fazlardaki oranı olarak ifade edilir ve değeri faz diyagramından belirlenebilir.

$$k = \frac{C_k^*}{C_s^*}. \quad (2.9)$$



şekil 2.5 Katı çözeltili oluşturan bir alaşım için faz diyagramının kısmi gösterimi (Stefanescu, 2009)

Hesaplamalar sabit sıcaklık (T) ve basınç (P) altında yapılmaktadır. Katılaşmanın bittiği T_S sıcaklığında, en son katılaşan sıvının bileşiminin C_o/k olarak hesaplanabilir. şekil 2.5'te açıklanan özel durum için, sıvıdaki ara yüzeyde katı maddeden daha fazla çözünen madde vardır. Bu bölüm, alaşımlarda makro ve mikro ayrışmanın ortaya çıkmasının nedenidir.

Dağılım katsayısı, sadece liquidus eğimi m sabit olduğunda sabittir. Çoğu alaşım m değişken olduğundan, k da değişkendir. Fakat matematiksel hesaplamalarda her iki de sabit kabul edilir. Bir faz diyagramının sol köşesi dikkate alındığında $k < 1$ olmaktadır. Bununla birlikte, liküdü ve solidüs çizgilerinin eğimleri pozitif olduğunda $k > 1$ 'dir.

Sıvı fazdan itibaren soğuyarak katılaşma sırasında sıcaklık ve bileşim arasında Eşitlik 2.10'bağıntısı ile ifade edilen ilişkiler vardır (Şekil 2.7);

$$\Delta T_o = T_L - T_s = -m \cdot \Delta C_o \text{ ve } \Delta C_o = C_o(1 - k)/k \quad (2.10)$$

C_o alaşımı için liküdüs ve solidüs sıcaklık farkı ΔT_o , T_s sıcaklığındaki bileşim değişimin ΔC_o 'dır.

Seyreltik çözeltiler için, Van't Hoff eşitliği sıvı-katı dengede iken k ve m ilişkisini açıklar,

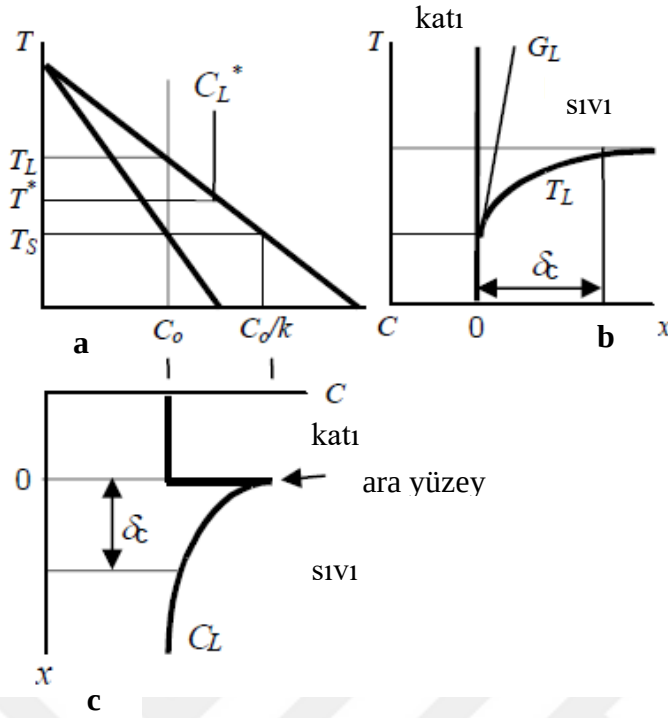
$$k = 1 - m \Delta H_f^A / [R(T_f^A)^2] \quad (2.11)$$

ΔH_f^A gizli ısıyı, T_f^A saf A çözeltinin ergime sıcaklığını, R gaz sabitini göstermektedir. Ayrıca dağılım katsayısı;

$$k = \exp \left[(\Delta H_f^B / R) \left(\frac{1}{T_f^B} - \frac{1}{T_f^A} \right) \right] \quad (2.12)$$

olarak da hesaplanabilir. ΔH_f^B gizli ısıyı, T_f^B saf B çözeltisinin ergime sıcaklığını göstermektedir.

Alaşım elementinin katıdaki ve sıvıdaki çözünürlüğü arasındaki fark, ilave bir aşırı soğuma meydana getirmektedir. Bu duruma *yapısal aşırı soğuma* (ΔT_c) denir. İkili faz fiyagramında T_s sıcaklığında katı fazının bileşimi C_o , sıvı fazın bileşimi C_o/k 'dir (Şekil 2.6a). Bu durumdaki bileşim değişikliği bileşim ve arayüzeyden mesafe diyagramında (Şekil 2.6c) verilmiştir. Yayınım sınır tabakası δ_c ile gösterilmektedir. Bu tabakanın oluşma nedeni, arayüzeyde sıvının kompozisyonunun, yığın sıvının (C_o) uzağındakinden daha yüksek (C_o/k) olduğundan ve sonuç olarak, sıvının (C_L) kompozisyonu, arayüzden sıvıya doğru azaldığı için oluşur (Stefanescu, 2009).



Şekil 2.6 İkili faz diyagramında (a) katı sıvı ara yüzeyindeki termal (b) ve bileşimsel (c) değişimler (Stefanescu, 2009)

Sıcaklık-mesafe diyagramında (Şekil 2.6b), ara tabakada (δ_c), liküdüs sıcaklığının (T_L) sabit olmadığı, katı-sıvı ara yüzeyinde T_S sıcaklığının T_L sıcaklığına arttığı görülmektedir. Bu sırada yine ara tabakada, sıvı faz bileşiminin T_S sıcaklığındaki C_0/k 'dan sıvı faz oluşturan alaşımın T_L sıcaklığındaki C_0 bileşimine değişimini göstermektedir(Şekil 2.6c). Liküdüs sıcaklık gradyanı G_L , $T_L(x)$ eğrisinin T^* ara yüzey sıcaklığındaki x 'e göre türevi olarak tanımlanabilir.

Isı akışı sıvıdan katıya doğru olduğu için sıvı içerisindeki ısıl bölgede bir termal granyant oluşur. Isıl ve bileşimsel gradyanların karşılaştırılması Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Eğer $G_L < G_T$ olursa ara yüzeydeki sıvı metal sıcaklığı liküdüs sıcaklığının üzerindedir. Tam tersine $G_L > G_T$ olursa sıvı metal sıcaklığı liküdüs sıcaklığının altındadır. Bu nedenle ara yüzeydeki yığın sıvı liküdüs sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta olurken, bileşim farklılığından dolayı ara yüzeydeki sıvı liküdüs sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta olabilmektedir. Bu durumda sıvı yapısal

aşırı soğumaya maruz kalmaktadır. Aşırı soğuma değeri ΔT_c olmaktadır. Yapısal aşırı soğuma değeri (ΔT_c)

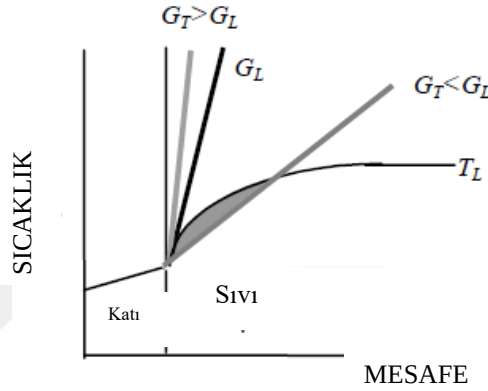
Şekil 2.6'dan şöyle hesaplanabilir;

$$\Delta T_c = T_L - T^* = -m(C_L^* - C_S) \quad (2.13)$$

Buradaki m değeri negatiftir. Serbest enerji değişimi ise;

$$\Delta G_c = -\Delta S_f m(C_L^* - C_o) \quad (2.14)$$

şeklinde hesaplanabilir (Stefanescu, 2009).



Şekil 2.7 Yapısal aşırı soğuma diyagramının ısı (GT) ve bileşimsel (GL) diyagramlarıyla karşılaştırılması (Stefanescu, 2009)

Sınır şartları: $x=0$ için $c_s=c_o/k$

$x=\infty$ için $c_s=c_o$

olup, ara yüzeydeki bileşim (çözünen) gradyanı

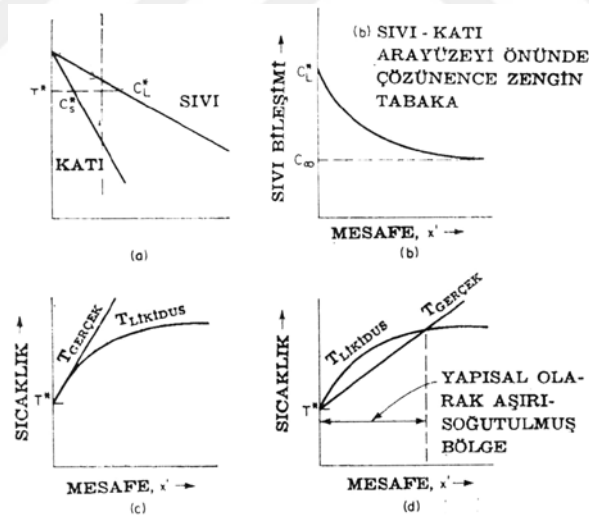
$$\left(\frac{dc_s}{dx} \right)_{x=0} = -\frac{R}{D_s} c_s^* (1-k) \quad (2.15)$$

şeklinde verilir. (2.7) eşitliğinin, (2.8) eşitliği yardımıyla çözümü şu şekildedir:

$$c_s = c_o \left(1 + \frac{1-k}{k} e^{-(R/D_s)x} \right) \quad (2.16)$$

Şekil 5.15 düzlemsel cepheyi kararsız yapan itici kuvvetin nasıl oluştuğunu kalitatif olarak göstermektedir ve daha önceki bölümlerde termal ve yapısal aşırı soğuma nedeniyle dendritik yapının oluşumu ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Kısaca özetlemek gerekirse; kc_0 kadar alaşım içeren bir katının oluşumu sırasında kalan alaşım elementleri katılaşma cephesinin önündeki sıvıya itilecektir. Bu nedenle sıvı c_0 bileşimine sahip iken, hemen katı-sıvı arayüzeyinde bulunan çok ince bir tabakada sıvı bileşimi c_0/k değerine fırlayacaktır. Bu kararlı durum Şekil 2.8 ve Şekil 2.10 (b)'de gösterilmiştir. Çözünen miktarı azaldıkça dengesel likidüs sıcaklığı arayüzeyden uzaklaştıkça artar. Bu durumda dengesel likidüs sıcaklığı ile sıvı içindeki gerçek sıcaklık gradyanı birlikte ele alınmalıdır. Şekil 2.10 (c)'de gösterilen durumda, herhangi bir nedenle düz arayüzeyde bir çıkıntı oluşursa bu çıkıntı kendisini aşırı ısıtılmış bir ortamda bulacak ve tekrar eriyecektir. Ancak, sıvı içindeki gerçek sıcaklık dağılımı dengesel likidüs sıcaklığının altına düşerse bu durumda yapısal aşırı soğuma nedeniyle dendritik yapı oluşacaktır (Şekil 2.10 d).



Şekil 2.10 Alaşımların katılaşmasında yapısal aşırı soğuma oluşumu (Flemings, 1974)

Yapısal aşırı soğuma prensibini kantitatif olarak geliştirmek için ara yüzeyde yalnızca ısı ve kütle taşınımı dikkate alınır. Ara yüzeydeki sıvı içindeki çözünen gradyanı şöyledir:

$$\left(\frac{dc_s}{dx} \right)_{x=0} = \frac{-R}{D_s} c_s^* (1-k) \quad (2.17)$$

Düzlemsel ara yüzeyde denge olduğu kabul edilirse, dengesel likidüs sıcaklığının (T_L) ara yüzeyden olan mesafe (x) ile değişim eğrisinin eğimi, sıvı bileşimi (c_s) ile likidüs çizgisi eğimine (m_L) şu şekilde bağlıdır:

$$m_L = \frac{dT_L}{dc_L} \text{ dir } \left(\frac{dT_L}{dx} \right)_{x=0} = m_L \left(\frac{dc_s}{dx} \right)_{x=0} \quad (2.18)$$

Ara yüzeyde sıvı içindeki gerçek sıcaklık gradyanı, G_s ,

$$G_s \geq \left(\frac{dT_L}{dx} \right)_{x=0} \quad (2.19)$$

ise aşırı soğuma yoktur. Bu durumda (5.7) ve (5.8) eşitlikleri birleştirilip c_s^* yerine c_k^*/k koyarsak genel yapısal aşırı soğuma ifadesi ortaya çıkar. Yani

$$\frac{G_s}{R} \geq - \frac{m_L C_k^* (1-k)}{k D_s} \quad (2.20)$$

2.1.3.1 Katılaşma Sırasında Taşınım Olayları

Katılaşmanın matematiksel makro segregasyon ve makro çekinti oluşumu ile açıklanabilir. Katılaşmanın doğru modelinin belirlenebilmesi için fiziksel olayların iyi anlaşılması gerekir. Makro boyutta katılaşma katı ve sıvı olmak üzere iki fazda ilerler. Çekirdek oluşumu ve gelişimi göz ardı edilebilir (Stefanescu, 2009).

Matematiksel yaklaşım, belirli geometri ve malzemeye sahip dökümler için kütle, enerji ve momentum taşınım denklemlerini çözmektir. Genel taşınım eşitliği standart tercihli yayılım Eşitlik 2.21'deki gibi ifade edilir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \Phi) + \nabla \cdot (\rho \cdot V \cdot \Phi) = \nabla \cdot (\rho \cdot \Gamma \cdot \nabla \Phi) + S \quad (2.21)$$

Eşitlik 2.21'de t süreyi, ρ yoğunluğu, Φ faz değerini, V hız vektörünü, Γ genel yayılım katsayısını ve S kaynak değerini göstermektedir. Dört temel taşınım olayı için faz değeri ve difüzyon katsayısı değerleri Tablo 2.2'de verilmiştir. Burada H entalpi,

$\alpha = k/(\rho c)$ ısıl geçirgenliğini, D grup difüzyonu, $\nu = \mu/\rho$ kinematik vizkozite, μ dinamik vizkozite.

Tablo 2.2 Dört temel taşınım olayı için faz değeri, yayılım katsayısı (Stefanescu, 2009)

Değer	Kütle	Enerji	Grup	Momentum
Φ	1	H	C	V
Γ	0	$\alpha = k/(\rho c)$	D	$\nu = \mu/\rho$
S	Faz hareketi	Faz değişimi ve faz hareketi	Faz değişimi ve faz hareketi	Faz hareketi S/L etkileşimi Doğal taşınım Çekinti

Farklı taşınım durumları için türetilen taşınım ifadeleri şöyledir;

Kütle Taşınımı

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = S_m \quad (2.22)$$

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$ ifadesi çekinti durumundaki zamana bağlı yoğunluk değişimini ifade etmektedir. Özellikle alaşımlarda sıvının katı üzerine akışının ifadesini açıklamada kullanılır.

Enerji Taşınımı

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho V H) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{c} \nabla H \right) + S_H \quad (2.23)$$

k ısıl iletkenlik ve c özgül ısıyı gösterir.

Grup Taşınımı

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C) + \nabla \cdot (\rho V C) = \nabla \cdot (\rho D \nabla C) + S_C \quad (2.24)$$

Akı yasaları, Enerji, kütle ve momentumun yayınma yoluyla taşınımı akı yasaları ile tanımlanır. Bu yasaların temeli

$$akı = \frac{akış\ hızı}{alan} = yayılım\ özelliği \cdot potansiyel\ granyant \quad (2.25)$$

olarak tanımlanır.

Şu üç yasa yayılım taşınımını açıklamaktadır;

$$\text{Enerji:} \quad q = -k \nabla T \quad \text{Fourier yasası} \quad (2.26)$$

$$\text{Kütle (grup):} \quad J_A = -D_{AB} \nabla C_A \quad \text{Fick yasası} \quad (2.27)$$

$$\text{Momentum: } \tau_{xy} = -\mu \frac{\partial v_y}{\partial x} \quad \text{Newton'un viskozite yasası} \quad (2.28)$$

q , J_A ve τ_{xy} sırasıyla ısı, kütle ve momentum akısını ve V_y y eksenini boyunca akış hızını göstermektedir. Dolayısıyla akı yasaları genel yayılım şeklinde ifade edildiğinde,

$$akı = -\text{yayılım.konsantrasyon gradyanı} \quad (2.29)$$

olmaktadır.

Böylece söz konusu üç yasa şöyle değişir;

$$\text{Enerji: } q = -\alpha \nabla(\rho c T) \quad (2.26 \text{ a})$$

$$\text{Kütle (grup)} \quad J_{Ax} = -D_{AB} \nabla C_A \quad (2.27 \text{ a})$$

$$\text{Momentum} \quad \tau_{xy} = -\nu \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial x} \quad (2.28 \text{ a})$$

Miktar değişimlerine göre enerji konsantrasyonu (enerji/hacim), kütle konsantrasyonu (kütle/hacim) ve momentum konsantrasyonu (momentum/hacim) olarak değişir.

Isı Taşınımını, hesaplamak için Eşitlik 2.18'de entalpi değeri yerine sıcaklık değeri ile hesaplama yapılır. $V=0$ olduğunda, ρ ve c değerleri sabit kabul edildiğinde $H=cT$ olur.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{S_H}{\rho c} \quad (2.30)$$

Eğer ısı akışı aşırı soğuma sırasında meydana gelirse $S_H=Q_{\text{gen}}$ olur.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{Q_{\text{gen}}}{\rho c} \quad (2.31)$$

Başlangıç durumunda eşitliğin kısmi türevi alınır,

$$T(x, 0) = f(x) \quad (2.32)$$

olur. Bu durumda ısı akışını hesaplamak için şu denklemler kullanılabilir,

$$\text{Öngörülen sıcaklık (Dirichlet denklemi)} \quad T(0, t) = T_1 \quad (2.33)$$

$$\text{Yalıtımlı sınır değeri (Neuman Denklemi)} \quad \frac{\partial T}{\partial x}(0, t) = 0 \quad (2.34)$$

Bilinen ısı akışı (Newton soğuma yasası) $-k \frac{\partial T}{\partial x}(0, t) = h(T(t) - T(0))$ (2.35)

h ısı geçiş katsayısıdır.

Faz dönüşümü veya ısı oluşumu olmadığında (kaynak değeri yok ise)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (2.36)$$

Kararlı durumda sınır durumları ve kaynak değerleri süreden bağımsız olur.

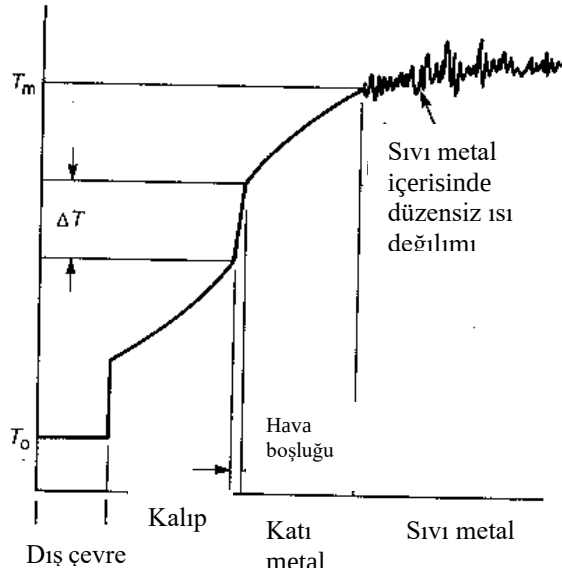
$$\nabla^2 T + \frac{Q_{gen}}{k} = 0 \quad \text{Poisson eşitliği} \quad (2.37)$$

Eşitlik 1.29'da eşit ısı dağılımı var ise ve ısı oluşumu olmadan eşitlik şöyle olur;

$$\nabla^2 T = 0 \quad \text{Laplace Eşitliği} \quad (2.38)$$

Isı taşınımı hesaplamaları dışında, sıvı metalin soğumasını kontrol eden dirençler;

1. Sıvı metal
2. Katılaşan metal
3. Metal - kalıp arayüzeyi
4. Kalıp
5. Kalıbın çevresi



Şekil 2.8 Bir metalin katılaşması sırasında oluşan sıcaklık profili (Campbell, 2003)

Benzer tüm durumlarda olduğu gibi, doldurma sırasındaki kuvvetli konveksiyon ve soğuma sırasındaki ısı konveksiyon sonucu (1) direnci göz ardı edilebilir. Türbülanslı akım ve karıştırma hızla ısıyı taşır ve sıvı fazdaki sıcaklık gradyanını düzleştirir. Sıvı akışının hızlı olması, büyük döküm ve ingotların merkezinden ısının dışarıya taşınması için geçen süre, hızları yayınma ile kontrol edilen diğer dirençler için gereksinilenden

daha az olması nedeniyle sıvı metal içindeki sıcaklık gradyanının düşmesi hızla gerçekleşir (Flemings, 1974).

Birçok durumda uygulamada (5) direnci de göz ardı edilebilir. Örneğin normal kum kalıplarda çelik katılaşıırken, kalıbın çevresinin çok ılık hale gelmesi nedeniyle kalıp çevresi katılaşmayı etkilemez. Bununla beraber, doğal olarak, bu genel kuralın ince duvarlı kalıplarla ilgili bir takım istisnaları vardır; çünkü bu gibi durumlarda kalıp duvarının inceliği nedeniyle çevre koşullarına bir bakıma daha duyarlıdır. Croning sürecinde kabuk kalıplama ile yapılan demir dökümleri kabuk kalın olduğunda daha hızlı katılaşır. Yüksek sıcaklığa ısıtılmış refrakter malzemelerden yapılmış ince bir kabuk mevcutsa hassas veya kabuk kalıba dökümlerde katılaşma gecikir, fakat çelik bilyelerle takviye edilerek ısının serbestçe çevreye yayınarak soğumasına olanak verir. Alüminyum alaşımlarının dökümünde, demir ve çelik kalıplar su ile soğutulduğunda daha hızlı soğuma gerçekleşir (Flemings, 1974).

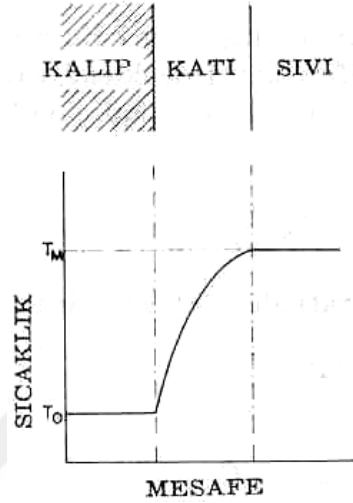
Dökümlerde (2), (3) ve (4) ısı akışına temel dirençler olup, etkilerinin iyi anlaşılması gereklidir. Bu üçünün birlikte etkileri bilgisayarlar yardımıyla kolayca incelenebilir. Problem matematik ve fizik açısından karmaşıktır ve hatta basit bir geometri (döküm parçasının şekli) dışında herhangi bir geometri ve ısı özelliklerinin sıcaklıkla değiştiği kabul edildiğinde veya saf metal yerine alaşım ele alındığında durum daha da karmaşık hale gelir. Bu nedenle basit şekilli dökümde metalin aşırı ısı göz ardı edilerek, ısı özelliklerinin sıcaklığa bağlı olmadığı, ısı konveksiyonunun bulunmadığı ve bir boyutlu yaklaşım kabul edilerek çözüme ulaşılmaktadır (Flemings, 1974).

Direnç 1: Döküm metali

Bu durumda düşük ısı iletimi nedeniyle katılaşan metalin kendisi ısı akışına direnç oluşturmaktadır. Yüksek ısı iletimli metal dökümleri için bu donma rejiminin genel bir durum olmadığı, direnç olarak kabul edilmediği bilinmelidir. Bununla birlikte;

- Pil ve akü kutup ve plakalarının üretimi için çelik kalıplara Pb-Sb alaşımının dökümü,
- Sürekli dökümde bakır kalıp içine çelik dökümü,

- Hassas dökümde mum model oluşturmak üzere sıcak mumun metal kalıplara dökümü gibi örnekler bu olayı çok iyi tanımlamaktadır. Bu durum plastik endüstrisinde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır.



Şekil 2.9 Katılaşılan metalin ısı akışına direnç oluşturması durumunda sıcaklık dağılımı (Flemings, 1974)

Başlangıç koşullarında, α_m katının ısı yayınma kabiliyeti olmak üzere, T_E ergime noktasından T_0 sıcaklığındaki kalıp duvarına tek yönlü ısı akışı durumunda, ısı akış problemi kısmi diferansiyel bağıntılarla ifade edilir;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_m \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.39)$$

$$\alpha_m = \frac{K_m}{c_m \rho_m} \quad (2.40)$$

α , ısı yayınma kabiliyeti, büyük ise termal enerji malzemede kolayca yayılır. K , ısı iletkenliği, c_p özgül ısı, ρ yoğunluktur.

Sınır koşulları

$$x=0, \quad T=T_0 \quad (T_0 \text{ kalıp sıcaklığı})$$

$$x=S, \quad T=T_E \quad (\text{katı-sıvı arayüzeyinde sıvının sıcaklığı})$$

ve katı-sıvı arayüzeyinde (katılaşma cephesinde) ısının yayılma hızı, kondüksiyonla sıcaklık gradyanının azalmasını hızı ile denge halinde olmalıdır:

$$H\rho_{km} \frac{\partial S}{\partial t} = K_{km} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=S} \quad (2.41)$$

Burada; S dökümde katılaşılan metalin kalınlığı, K_{km} katı metalin ısı iletkenliğı ve H ergime ısısı olup, çözüm:

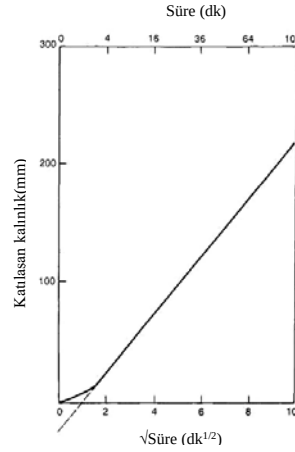
$$S = 2\gamma\sqrt{\alpha_k t} \quad (2.42)$$

Bu bağıntının dikkate alınması gereken önemli sonucu, katılaşma kalınlığının zamanla parabolik olarak değişmesidir. Bu sonuç deneysel gözlemlerle çok iyi uyushmaktadır. Örneğın, dökme demir ingot kalıbında katılaşılan çeliğın kalınlığı, (S),

$$S = at^{1/2} - b \quad (2.43)$$

olarak bulunmuştur ve burada a ve b sırasıyla 3 ve 25 mertebesinde sabitler olup birimler milimetre ve saniyedir veya birimler inç ve dakika olarak alındığında a ve b sırasıyla 1 ve 0,5 olur, Şekil 2.3. b sabiti ile gösterilen katılaşmanın başlamasındaki görünür gecikme, aşağıdaki faktörlerin sonucunda ortaya çıkmaktadır.

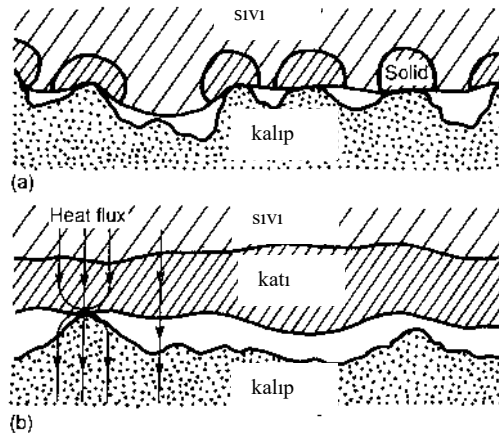
1. Döküm sırasında ve sonrasında sıvıdaki türbülans eriyikten aşırı ısının hızla uzaklaştırılmasına neden olur ve böylece katılaşmanın başlaması gecikir.
2. Sonlu arayüzey direnci, başlangıçtaki ısı kaybı hızını daha da yavaşlatır. Bu durumda, sıfır anında katılaşma hızı gerçekte sonlu fakat arayüzey kontrollü olup arayüzey direncinin olmaması haline nazaran daha yavaştır. Başlangıçta katılaşma hızı lineer olacaktır. Sonra katılaşılan metalin direnci öne çıkar ve parabolik ilişkiyi verir (Campbell, , 2003).



Şekil 2.10 Dökme demir kalıp içinde katılaşın çeliğin kalınlığının değişimi (Campbell, 2003)

Direnç 2: Metal-Kalıp Ara yüzeyi

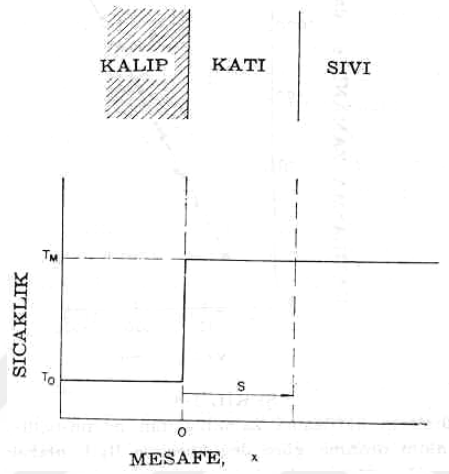
Birçok önemli döküm sürecinde ısı akışı, metal-kalıp ara yüzeyindeki direnç tarafından kontrol edilmektedir. Bu durum, metal ve kalıbın her ikisinin de kabul edilebilir yüksek hızlarda ısı iletkenliğine sahip olduğunda ortaya çıkmaktadır. Burada iki önemli direncin arasında bir sınırın olduğu durum söz konusudur. Ara yüzey, izole kalıp kaplaması uygulandığında veya döküm soğurken kalıptan uzaklaşarak büzüldüğünde ikisi arasında bir boşluk oluştuğunda veya kalıbın ısınarak genişmesi ile önemli hale gelmektedir, (Şekil 2.10). Bu koşullar, hafif metallerin metal kalıba dökümünde yaygındır.



Şekil 2.11 Metal-kalıp ara yüzeyinde boşluk oluşumu (Campbell, 2003)

Kalıp-metal ara yüzey direnci büyükse, katılaşılan metalden kalıba doğru olan sıcaklık dağılımı Şekil 2.11’de olduğu gibidir. Sıcaklık düşüşünün tamamı ara yüzeyde görülür. Kalıp-metal ara yüzeyinde kalıba doğru olan ısı akışı hızı

$$q = -\rho_k HA \frac{\partial S}{\partial t} \quad (2.44)$$



Şekil 2.12 Katılma sırasında ısı akışını kalıp-metal arayüzeyinin kontrol etmesi durumunda ısı dağılımı (Flemings, 1974)

Eşitlik 2.44’de q , kalıp-metal ara yüzeyinde kalıba doğru ısı akış hızı, A kalıp-metal ara yüzey alanı, S katılaşılan metal kalınlığı, h çevreye olan ısı kaybında ısı iletim katsayısıdır.

Isı iletim katsayısı, h , 1 K veya 1°C sıcaklık farkı için metal-kalıp ara yüzeyinin birim kesitinden (m^2) geçen enerjinin (watt) iletim hızı olarak tanımlanır. Bu tanımlama, kalıbın yeteri kadar büyük ve ara yüzey boyunca etkin olarak sabit bir $(T_E - T_0)$ sıcaklık farkını veren T_0 sıcaklığının üzerine çıkmayacağı kadar iletken olması durumunda

$$q = -hA(T_E - T_0) \quad (2.45)$$

şeklinde yazılabilir. (h : ısı iletim katsayısı olup sabit kabul ediliyor. $[\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}]$, H : ergime gizli ısı $[\text{cal}/\text{g}]$) (2.44) ve (2.45) eşitlenip $t=0$ ve $x=0$ için integrali alınır

$$S = \frac{h(T_E - T_o)}{\rho_{km} H} t \quad (2.46)$$

Eşitlik 2.46’da açıkça anlaşılacağı gibi kalıp veya döküm geometrisinin ara yüzeydeki ısı iletimine hiçbir şekilde etkisi yoktur. Bu nedenle, (2.7) eşitliği basit şekilli dökümlerin katılma süresini, t_f , “Döküm modülü” ne bağlı olarak genelleştirebiliriz. Döküm modülü, döküm hacminin yüzey alanına oranıdır. V dökümün veya katılan metalin hacmi, A “metal-kalıp arayüzeyinin” veya “dökümün soğuma” alanı olmak üzere:

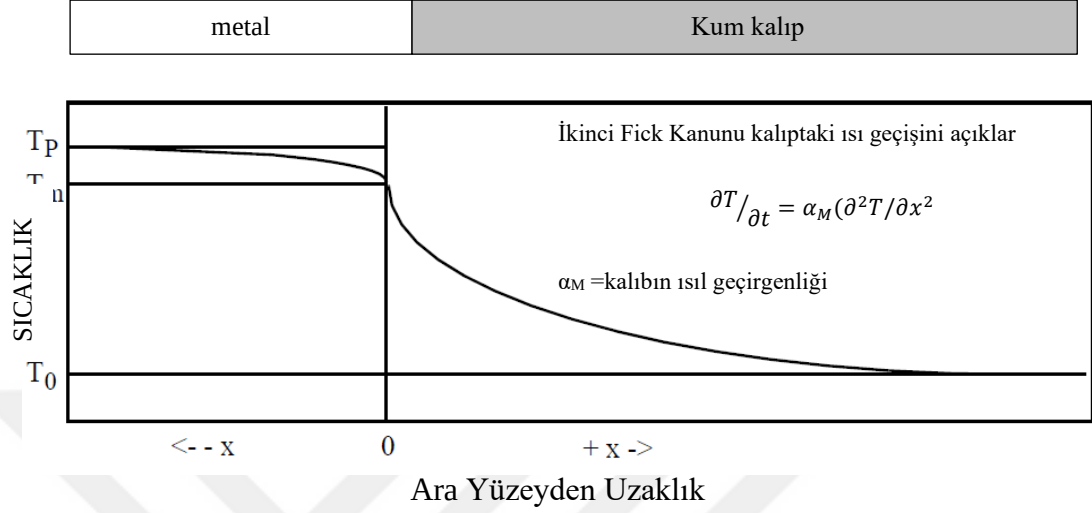
$$t_f = \frac{\rho_{km} H}{h(T_E - T_o)} \left(\frac{V}{A} \right) \quad (2.47)$$

Yukarıdaki tüm hesaplamalarda “ h ” sabit kabul edilmektedir. Bu, alüminyum alaşımlarının izole kalıp kaplamalarının uygulandığı metal kalıplara gravite ile dökümünde oldukça iyi bir yaklaşımdır. Diğer birçok durumda h değişken olup dökümün şekline bağlıdır (Campbell, 2003).

Direnç 3: Kalıp

İzole kalıplarda gerçekleştirilen döküm yöntemleri için geçerli bir durumdur; kum kalıba döküm, hassas döküm, (alt ve üst dereceli özel döküm, kabuk özel döküm). Bu iki yöntemde bir metalin katılaştırılmasındaki en büyük özellik, metalin ısıyı kalıptan daha iyi iletmesidir. Böylece, katılma hızı esas itibarıyla kalıbın ısı özelliklerine bağlıdır, (Şekil 2.11). Metalin ısı iletkenliğinin pratik olarak etkisi yoktur. Silisli kum kalıplara yapılan dökümlerde katılma, ısının kalıp tarafından absorbe edilme hızı ile kontrol edilir. Kum kalıp mükemmel bir yalıtkan gibi davranarak dökümü ılık olarak tutar. Hassas ve alçı kalıplar daha da yalıtkan olduklarından metalin erken soğuması önlenir ve akışkanlığın artmasına yardımcı olur. Bu durum, yukarıdaki döküm süreçleri için önemli bir özellik olan ince kesit doldurma kabiliyetinin mükemmel olmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte, oldukça yavaş soğumanın göreceli zayıf mekanik özelliklere neden olduğu unutulmamalıdır (Campbell, 2003).

T_p döküm sıcaklığında yalıtım özellikli (kum veya seramik) bir kalıba dökülen sıvı metalin t süredeki ısı geçişi metal-kalıp ara yüzeyinde Şekil 2.13 gibi olmaktadır.



Şekil 2.13 Kum kalıp-metal ara yüzeyindeki ısı geçişi (Rundman, 2010)

Sıvı metal kalıba dolduktan hemen sonra metal-kalıp ara yüzeyindeki metal sıcaklığı hızlı biçimde T_m sıcaklığına düşer. Bu bölgede kalıp sıcaklığına T_m sıcaklığına yükselir. $T=T_m$ ve $x=0$ durumunda

$$T(x, t) = T_0 + (T_m - T_0) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha_M t}} \right] \right\} \quad (2.48)$$

Eşitlik 2.48'ten t_s katılaşma süresi hesaplanabilir.

Eşitlik 2.48'de, t zamanındaki akı hesaplandığında

$$J = -KM(dT / dx)|_{x=0} \quad (2.49)$$

$$\frac{dT}{dx}|_{x=0} = (T_M - T_0) \frac{d}{dx} \left[1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha_M t}} \right] \right] \quad (2.50)$$

erf fonksiyonu açıldığında.

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(u - \frac{u^3}{3.1!} + \frac{u^5}{5.2!} - \frac{u^7}{7.3!} + \dots \right) \quad (2.51)$$

x=0 daki ara yüzeydeki fark,

$$J = \frac{K_M(T_M - T_0)}{\sqrt{\pi \alpha_M t}} \quad (2.52)$$

t zamanında A yüzey alanındaki ara yüzeyden geçen toplam ısı Q şöyle hesaplanır,

$$Q = A \int_0^t J dt = \frac{2AK_M(T_M - T_0)}{\sqrt{\pi \alpha_M}} t^{0,5} \quad (2.53)$$

Toplam ısı Q, katılaşma öncesindeki fazla ısı Q_s ve aşırı katılaşma ısı Q_F in toplamıdır.

$$Q_F = \rho_{Metal} \Delta H_F V_{Metal} \quad (2.54)$$

$$Q_s = \rho_{Metal} V_{Metal} (T_p - T_m) C_{Metal} \quad (2.55)$$

t_s , katılaşma sırasından bu miktardaki ısının kalıp metal ara yüzeyinden geçebilmesi için gereken süredir.

$$Q_s + Q_F = \frac{2AK_M}{\sqrt{\pi \alpha_M}} (T_m - T_0) t_s^{0,5} \quad (2.56)$$

Buradan da,

$$t_s = \frac{\pi \alpha_M \rho_{Metal}^2 V_{Metal}^2 [\Delta H_F + C_{Metal} (T_p - T_m)]^2}{4 A^2 K_M^2 (T_m - T_0)^2} \quad (2.57)$$

T_p döküm sıcaklığında belirlenen metal ve kalıp için sabitler B_s ve V/A oranı ile işlem gördüğünde Chvorinov yasası ortaya çıkar (Rundman, 2010),

$$t_s = B_s (V/A)^2 \quad (2.58)$$

Chvorinov kuralı sağlam döküm için besleme sorunlarının çözülmesinde en kuvvetli yöntemdir

Chvorinov kuralı, tek boyutlu teoremin üç boyutlu dökümlere uygulanması nedeniyle eleştirilebilir. Gerçekte konkav bir kalıp duvarında ısı akışının farklı ve daha hızlı olacağı açıktır. Bu durumu, tam olarak şöyle tanımlayabiliriz;

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha_k \left(\frac{\delta^2 T}{\delta r^2} + \frac{n \delta T}{\delta r} \right) \quad (2.59)$$

Burada n :düzlem için 0, silindir için 1 ve küre için 2 olup r dökümün yarıçapıdır. Bu eşitliğin çözümü;

$$\frac{V}{A} = \left(\frac{T_E - T_o}{\rho_m H} \right) \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{K_k \rho_k c_k} \sqrt{t_f} + \frac{n K_k t_f}{2r} \right) \quad (2.60)$$

Isı akımındaki farklılığın artması, belli bir V/A oranı için kürenin en hızlı, sonra silindirin ve son olarak plakanın donacağını göstermektedir. Kum kalıplarda alüminyum için (2.14) eşitliği bu farkların %20'ye yakın olduğunu göstermektedir. Daha sonra incelenecek olan besleme kurallarının uygulanmasında emniyet faktörü olarak 1,2 alınmasının nedeni budur. Besleme kuralları aynı modüle sahip tüm şekillerin eşit sürede katılaşıcağını kabul etmektedir (Campbell, 2003).

Tablo 2.3 Kalıp ve metallere ilişkin bazı sabitler (Campbell, 2003)

Malzeme	Ergime sıcaklığı (°C)	Katı-sıvı küçülmesi (%)	Özgül ısı (J/Kg K)			Yoğunluk (kg/m³)			Termal iletkenlik (J/mK s)		
			20°C	Katı m.p.	Sıvı m.p.	20°C	Katı m.p.	Sıvı m.p.	20°C	Katı m.p.	Sıvı m.p.
Pb	327	3,22	130	(138)	152	11680	11020	10678	39,4	(29,4)	15,4
Zn	420	4,08	394	(443)	481	7140	(6843)	6575	119	95	9,5
Mg	650	4,2	1038	(1300)	1360	1740	(1657)	1590	155	(90)	78
Al	660	7,14	917	(1200)	1080	2700	(2550)	2385	238	-	94
Cu	1084	5,30	386	(480)	495	8960	8382	8000	397	(235)	166
Fe	1536	3,16	456	(1130)	795	7870	7265	7015	73	14?	-
Grafit	-	-	1515	-	-	2200	-	-	147	-	-
Silis kumu	-	-	1130	-	-	1500	-	-	0.0061	-	-
Mullit	-	-	750	-	-	1600	-	-	0.0038	-	-
Alçı	-	-	840	-	-	1100	-	-	0.0035	-	-

2.1.4 Katılaşmanın Akışkanlar Dinamiği

Katılaşma sırasında sıvı metalin hareketi bölgesel bileşim farklılıklarının oluşmasına neden olur. Akışkanın hareketi iç veya dış itici kuvvetlerden etkilenmektedir. Çekintiler (katılaşma büzülme) akışı, doğal taşınım, kılcal kuvvetleri, gaz kabarcıklarının oluşumu ve ısı gerilme ve statik basınç nedeniyle katı fazlar deformasyonu iç etkenler arasında sayılabilir. Savurma gücü veya elektro manyetik güçler ise dış itici etkilerden sayılabilir (Stefanescu, 2009).

2.1.4.1 Çekinti Akışı

Katılaşma sırasında metallerin ve alaşımların büyük bir çoğunluğu çekinti gösterir. Katılaşma büzülmesi şöyle hesaplanır;

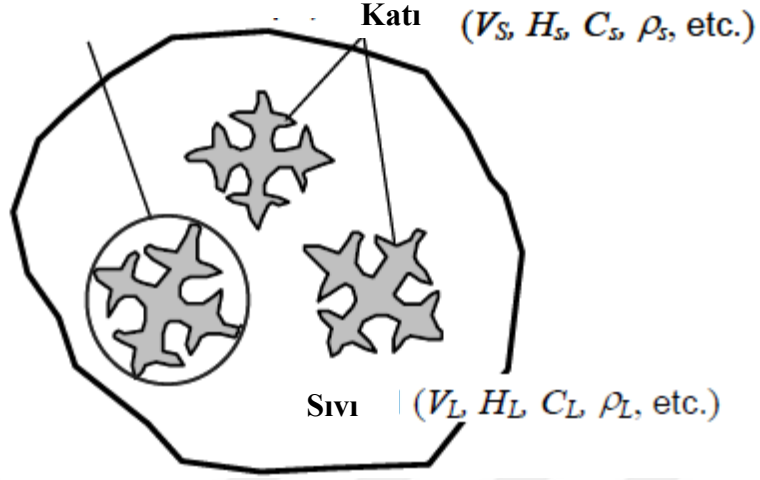
$$\beta = \frac{v_L - v_s}{v_L} = \frac{\rho_s - \rho_L}{\rho_s} \quad (2.61)$$

V_L ve V_s sırasıyla sıvı ve katı spesifik hacmi gösterir. Çekinti akışını tanımlayan makroskopik taşınım denklemi, sürekli kütlenin korunumudur;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = S_m \quad (2.62)$$

P yoğunluk, t süre, V hacim vektörü, S_m kütle kaynak değerini gösterir. Denklemdaki hacim değişim hızı sabit olmalıdır ve yoğunluk değişimi sürenin çok önüne geçerse göz ardı edilebilir. Bu nedenle çekinti akışını tanımlamaya çalışan herhangi bir model süreklilik denklemini kullanır ve sıvı ve katı yoğunluklarını farklı kabul eder (Şekil 2.14) (Stefanescu, 2009).

Ara yüzey etkileşimi



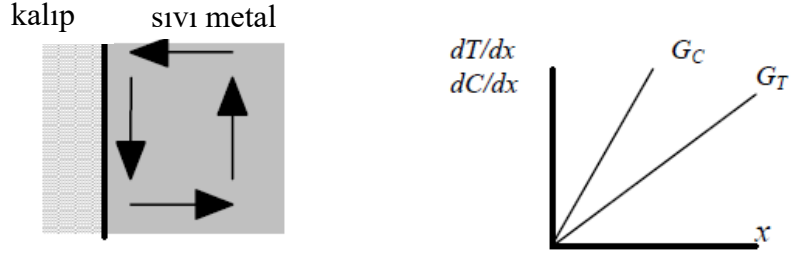
Şekil 2.14 Hacim-ortalaması modeli (Stefanescu, 2009)

2.1.4.2 Doğal Taşınım

Doğal taşınım, sıvının yer çekimi etkisi ile hareketine dayanmaktadır. Bu sırada sıvı içerisinde yoğunluk farklılıklarından dolayı bölgesel değişimler oluşmaktadır. Sıvı katı ara yüzeyinde sıvı katıdan daha soğuk olduğundan sıcaklık grantyantına bağlı olarak aşağı doğru hareket etmektedir. (Şekil 2.15). Bu durumda olarak katıda yukarı doğru bir hareket etmiş olur. Sıvı katı ara yüzeyinde tutunamayan sıvı-katı karışımı sıvıdan daha yoğun olduğundan bileşimin gradyantından (ara yüzeyde sıvıda olduğundan daha fazla çözünen) etkilenererek aşağı doğru bir akmaktadır (Şekil 2.15). Tersisi durumda daha karmaşık akış modelleri ortaya çıkacaktır.

Katının yukarı doğru bir sıvı yoğunluğu negatif gradyanti boyunca olması kararlılık için gerekli bir koşul olduğu söylenebilir. Isıl genleşme sıcaklık ve/veya yoğunluğun değişimi ile ortaya çıkar. Böylece, ısı (β_T) ve bileşimsel (β_C) genleşme katsayısı tanımlanabilir:

$$\beta_T = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} I_C \text{ ve } \beta_C = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial C} I_T \quad (2.63)$$



Şekil 2.15 Doğal taşınım ile sıvı metalin hareketi (Stefanescu, 2009)

Daha sonra $\beta_T = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial T}$ ve $\beta_C = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial C}$ eşitliklerine sıvı yoğunluğunun gradyanı uygulanırsa;

$$\frac{\partial \rho_L}{\partial x} = -\partial_L \left(\beta_T \frac{\partial T}{\partial x} + \beta_C \frac{\partial C_L}{\partial x} \right) \quad (2.64)$$

S_m değerinin hesaplanabilmesi için hidrostatik basınç gradyanı ∇P , kütle kuvveti yer çekimi ivmesi ile birlikte $\rho \cdot g$ ve S_{visc} akmaçlık değeri alınır

$$S = -\nabla P - \rho g - S_{visc} \quad (2.65)$$

Süreyle bağlı olarak hesaplama yapıldığında S_{visc} değeri ihmal edilir. Ardından $\rho = \rho_L$ olarak alınır ve kütle kuvveti yöne bağlı olarak y yönünde kabul edilir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho V^3) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} V^3) = \nabla \cdot \nabla (\mu V^3) - \nabla P - \rho g \quad (2.54)$$

Statik akışkan hesaplamasında eşitlik $\nabla P_o + \rho_o g = 0$ olarak sadeleştirilebilir. Burada P_o hidrostatik basınç ρ_o yoğunluk ve T_o sıcaklık değerine (liküdü noktası için T_L olur). Son iki eşitliğin birleştirilmesi ile;

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho V^3) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} V^3) = \nabla \cdot \nabla (\mu V^3) - \nabla (P - P_o) - (\rho - \rho_o) g \quad (2.66)$$

Eşitliğin çözülebilmesi için ∇P basınç gradyanı ve yoğunluk sıvı metal birleşimi ve sıcaklığın fonksiyonu olarak formüle edilmelidir.

Bilinmeyen basınç bölgeleri için çeşitli yaklaşımlar vardır. Bunlardan en temel olanlarından biri basınç ilişkili eşitliklerin yarı kapalı fonksiyon ile çözülmesidir. Bu eşitlikte doğru basınç P , $P=P^*+P'$ olarak ifade edilir. P^* tahmin edilen basınç, P' gerçek basınçtır. P' gerçek değeri, P^* tahmin edilen değerin yöne bağlı V^x , V^y , V^z hacim değerlerine bağlı olarak bulunur.

Belirlenen alaşım için $\rho = f(C, T)$ fonksiyonu kullanılır. Bu durumda tüm değerlerin momentumu alınmalıdır. Söz konusu verilere ulaşılamazsa ısı genleşme değerlerine gidilir. Yoğunluk dışındaki tüm sıvı özellikleri ihmal edildiğinde;

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial C} I_T dC + \frac{\partial \rho}{\partial T} I_C dT = \rho [-\beta_C (C - C_o) - \beta_T (T - T_o)] \quad (2.67)$$

C_o başlangıç birleşimini verir. β_c ve β_T yoğunluk ve sıcaklığa bağlı olarak değişir. Eğer ısı genleşme katsayısı belirli bir alaşım ve sıcaklık aralığı için sabit alınırsa, önceki eşitliğin integralinden $\rho = \rho_o \exp[-\beta_C^o (C - C_o) - \beta_T^o (T - T_o)]$ olur. T_o liküdüs sıcaklığını, C_o liküdüs noktasındaki sıvı konsantrasyonunu gösterir. Seri genleşmenin ilk iki terimi kullanıldığında $\rho = \rho_o [1 - \beta_C^o (C - C_o) - \beta_T^o (T - T_o)]$ elde edilir. ρ değeri ρ_o olduğunda β_C^o ve β_T^o aynı ifadeye sahip olur. Her ikisi de katılaşma sırasında sabit olur (Stefanescu, 2009).

$$S_b = \rho_o g [\beta_C^o (C - C_s) + \beta_T^o (T - T_o)] \quad (2.68)$$

2.1.4.3 Yüzey Gerilimi Etkin (Marangoni) Konveksiyon

Sistemde serbest ve değişebilir ara yüzeyler (sıvı-sıvı ve sıvı-gaz ara yüzeyi gibi) olduğunda sıcaklık ve birleşim gradyanı ara yüzeydeki gerilimi etkiler. Bu da yüksek γ Marangoni değerine sahip bölgelere akışı arttırır. Oluşan güç dengesi şöyle ifade edilebilir;

$$\nabla(V.m).n = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \nabla T.m \quad (2.69)$$

n serbest yüzeydeki dik birim vektörü, m ise birim eğim vektörüdür. Bu denklem, yüzey gerilimi gradyanının sıcaklık gradyanı ile orantılı olduğunu belirtir ve serbest yüzeydeki teğetsel hızın normal türevine yol açar. yüzey konveksiyon mukavemetini belirlemek için boyutsuz Marangoni sayısı kullanılır;

$$M_a = \left| \frac{dy}{dt} \right| \frac{\Delta T l_b}{\mu \alpha} \quad (2.70)$$

Hem çözelti hem de ısıl Marangoni konveksiyon denklemi;

$$\tau = \mu \left(\frac{\partial V_y}{\partial y} \right) = \left(\frac{\partial \gamma}{\partial T} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \sum_i \left(\frac{\partial \gamma}{\partial a_i} \right) \left(\frac{\partial a_i}{\partial x} \right) \quad (2.71)$$

τ yüzey gerilimi nedeniyle meydana gelen kayma gerilimidir. V_y yüzeye paralel hız bileşeni, x ve y yüzeye paralel ve dik vektörlerdir. a_i i elementinin alaşımdaki termodinamik aktivitesidir (Stefanescu, 2009).

2.1.4.4 Dentiritler Arası Akış

Dentirit bölgesi, katı ve sıvının metalin bir arada bulunduğu bölgedir. Eş eksenli dentiritlerin sıvı akabildiği sürece, akış hızının sadece viskozitedeki değişiklikten etkilendiği varsayılabilir. Bununla birlikte, dentrit tutarlılığına ulaşıldığında ve sabit bir katı ağ oluşturulduğunda veya dentiritler kolon biçimindeyse, akış, dentirit bölgesinin morfolojisinden büyük ölçüde etkilenecektir. Çoğu katılaşma modelinde, dentirit bölgeden geçen akış gözenekli ortamdan akış olarak kabul edilir ve Darcy'nin yasası matematiksel tanımlaması için kullanılır.

$$V_l = -(K/\mu g_L)(\nabla P - \rho g) \quad (2.72)$$

V_L dendiritler arasındaki sıvının hızı, K dendirit bölgesinde geçirgenlik sabiti ve g_L dentiritler arası sıvının hacim oranıdır. Darcy yasasında aşağıdaki kabuller yapılır (Stefanescu, 2009).

- Akış yavaştır ($V_L \rightarrow 0$), böylece atalet etkisi ihmal edilebilir.
- Akış kararlıdır.
- Sıvının hacim oranı eşit ve sabittir.
- Sıvı-sıvı etkileşimi ihmal edilir.

Katılaşma sırasındaki akışlar dinamiğine sıvı metalin ve sıvı-katı metalin akışı bahsedilen eşitlikler ile belirlenmektedir. Akışta meydana gelebilecek bozukluklar katılaşma hatalarına genellikle de çekintilere neden olmaktadır.

2.1.5 Katılaşma Büzülmesi

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

Döküm sıcaklığından soğuma sırasında sıvı, sıvı-katı ve katı aşamalarında büzülme meydana gelir (Şekil 2.16). Katılaşma ve soğuma sırasında Tablo 2.4’de gösterildiği gibi bazıları dışında metal alaşımlarının tamamı büzülme gösterir. Bu hacim azalması üç aşamada olur:

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

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

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

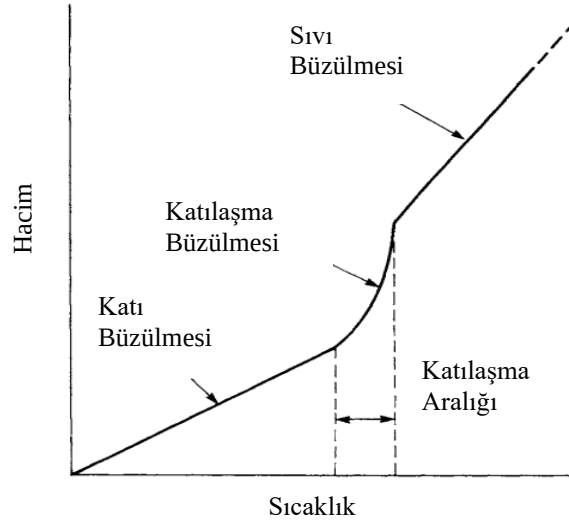
Tablo 2.4 Bazı metallerin katılaşma sırasındaki hacim değişimleri (Campbell, 2003)

Metal	Ergime Noktası (°C)	Sıvı yoğunluk (kg/m³)	Katı Yoğunluk (kg/m³)	Hacim Değişimi (%)
Al	660	2368	2550	7,14
Au	1063	17380	18280	5,47
Co	1495	7750	8180	5,26
Cu	1083	7938	8382	5,3
Ni	1453	7790	8210	5,11
Pb	327	10665	11020	3,22
Fe	1536	7035	7265	3,16
Ti	303	11200		2,2
Mg	651	1590	1655	4,1

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

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

Dökümde katılaşma sürecini karmaşık hale getiren daha birçok değişken vardır. (Campbell, 2003).



Şekil 2.16 Sıvı fazda, katılaşma sırasında ve katı da meydana gelen büzülmenin şematik gösterimi (Campbell, 2003)

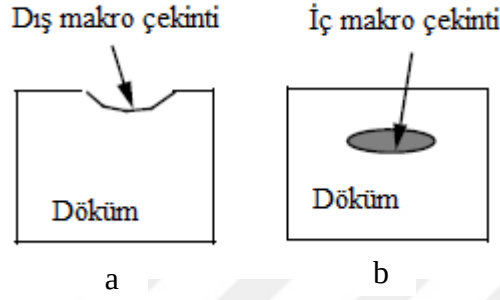
- Kalıp malzemesi ve kalınlığı
- Kalıbın şekli
- Metal (döküm) kalınlığı
- Metalin termofiziksel özellikleri; ısı iletkenliği, ergime ısısı, ısı genleşme ve katılaşma sıcaklık aralığı
- Kalıptan atmosfere ısı taşınımı
- Aşılama veya titreşim gibi yöntemlerle tane boyutunun kontrolü

gibi hususlardır. Özetlemek gerekirse, dökümün yapısı ve sağlamlığını katılaştıran metale ait özellikler, kalıp özellikleri ve ısı koşulları etkilemektedir. Bu değişkenler tüm katılaşma süreci boyunca etkisini göstereceğinden, büyük dikkat gerektirir. Akışkanlık, sıcak yırtılma eğilimi, gaz sorunu gibi diğer hususların katılaşma ile ilişkileri de ayrıca dikkate alınmalıdır (Campbell, 2003).

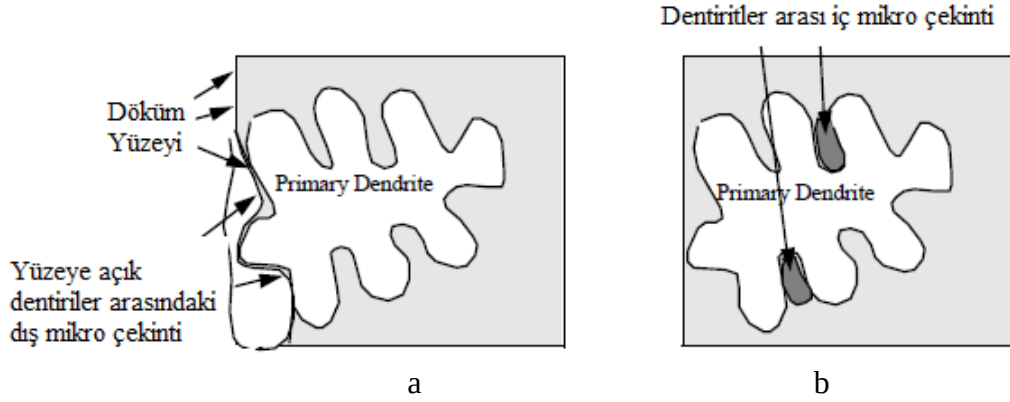
2.1.6 Çekinti Hataları ve Belirlenmesi

Çekinti oluşumu döküm içerisinde katılaşma sıcaklık aralığına bağlı olarak çeşitli şekillerde görülebilir. Katılaşma sıcaklık aralığı olarak bahsedilen likidüs ve solidüs sıcaklıkları arasındaki farktır (Şekil 2.19). Çekintiler büyüklüklerine göre makro ve mikro çekintiler olmak üzere temelde ikiye ayrılır. Makro çekintiler gözle rahatlıkla

tespit edilebilirken, mikro çekintileri belirlemek için optik incelemelere ihtiyaç duyulur. Her iki çekinti de kendi içerisinde iç ve dış çekintiler olarak ikiye ayrılır. Dış çekintiler döküm yüzeyinde oluşurken, iç çekintilerin döküm yüzeyinin hemen altında oluşur (Şekil 2.17, Şekil 2.18).

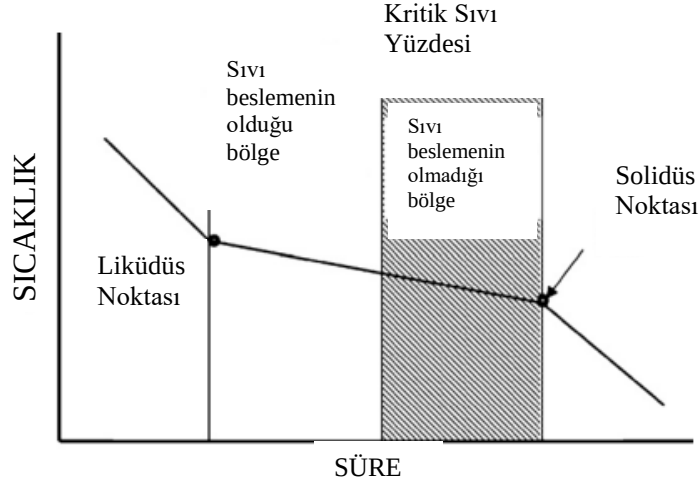


Şekil 2.17 a; dış makro çekinti, b; iç makro çekinti (Rundman, 2010)



Şekil 2.18 a; dış mikro çekinti, b; iç mikro çekinti (Rundman, 2010)

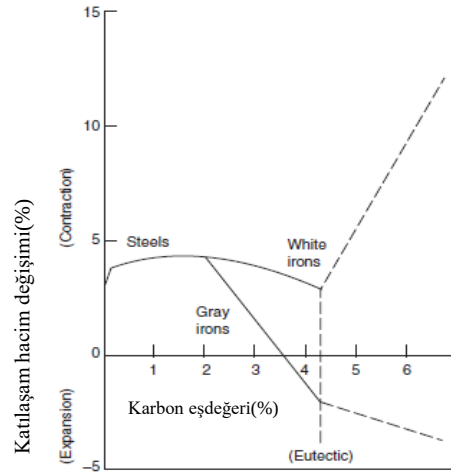
Oluşan çekintiler tasarlanan besleyici sistemi ile giderilebilir. Besleyiciler genellikle makro çekintileri gidermek için tasarlansa da mikro çekinti oluşumuna da engel olurlar. Eğer çekinti oluşumu engellenmezse döküm yüzeyindeki veya içerisindeki boşluklar mekanik özellikleri düşürerek ani hasar oluşumlarına neden olabilir (Rundman, 2010).



Şekil 2.19 Alaşımın katılaşma eğrisindeki kritik sıvı yüzdesi (Kumruoğlu ve Özer, 2008)

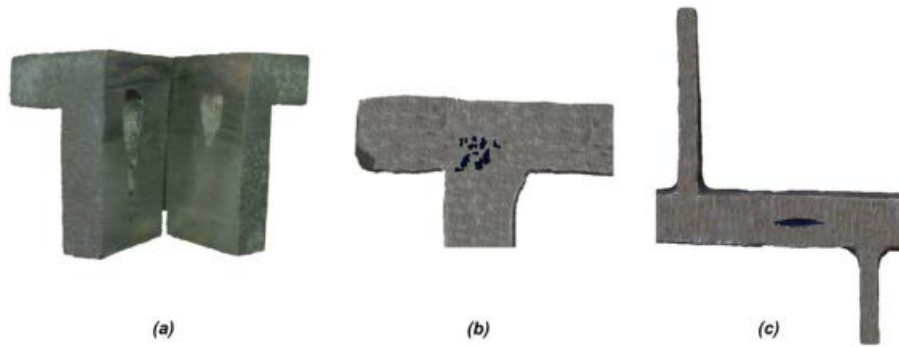
Makro büzülme hatalarının yanı sıra bir de mikro büzülme hataları bulunmaktadır. Mikro büzülme hataları özellikle çelikler gibi dar katılaşma aralığına sahip olan katılaşması sırasında görülmektedir. Niyama ve arkadaşları tarafından geliştirilen basit bir eşitlikle mikro büzülme hataları tahmin edilebilmektedir (Kumruoğlu and Özer, 2008).

Sıvı metallerini birçoğu katılaşırken büzülürler. Gri dökme demir ve bizmut ise katılaşırken genişleyen ender metal alaşımlarıdır. Katılaşırken genişleme özelliğinden dolayı bizmut yazıcı kartuşlarına atkı olarak konur ve yazım işlemi tamamlandığında harflerin daha net görülmesini sağlar. Karbon eşdeğeri %3,6 büyük olan gri dökme demir de ise içeriğinde düşük yoğunluklu grafit oluşumu nedeniyle, grafitin etrafını saran demir yapının büzülmesini engeller (Şekil 2.20) (Campbell, 2003).



Şekil 2.20 Fe-C alaşımlarının karbon eşdeğerine bağlı hacim değişimi (ASM, 1998)

Katılaşma sırasında etrafında kabuk oluşturarak katılaşan ve sıcak bölge oluşturan kısımlar oluşabilir. Bu kısımlara katılaşma tamamlandıktan sonra yeterli sıvı metal iletilememesinden dolayı büzülme boşluğu olarak kalabilir. Şekil 2.21’te bu hatalardan bazıları gösterilmektedir. Sıcak itibaren katılaşan bir besleme yolunun uygulanabilmesi ile bu bölgelerin beslenebilmesi mümkün olabilmektedir. Bu da ya önceden bilenen matematiksel hesaplama yöntemleriyle ya da bilgisayar programları ile öngörülerek gerekli besleyici tasarımı ile giderilmektedir (Ravi, 2008).

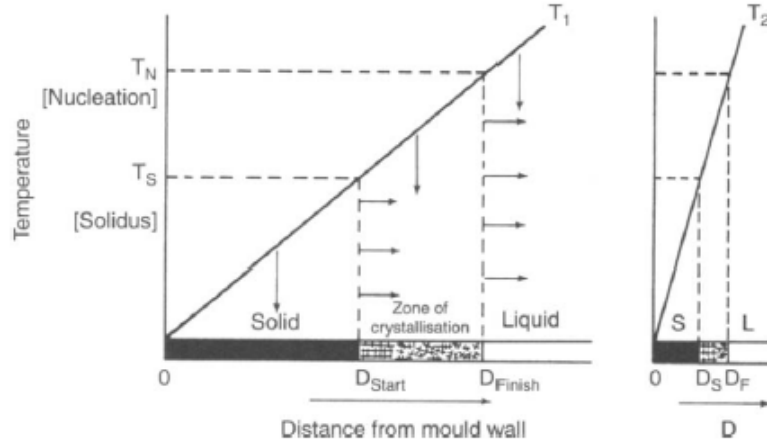


Şekil 2.21 a) Tümleşik boşluk hatası, b) Dağılmış boşluk c) Merkezi çizgisel boşluk hatası (Saturia ve diğ., 2012)

Dökümlerde katılaşma ve besleme mekanizmaları birlikte dikkate alındığında özellikle katılaşma sırasında ortaya çıkan büzülmeler sonucu taneler ve dentritler arasında oluşabilecek hataların giderilmesi için besleyici kullanımı gerekli hale gelmektedir (Beeley, 2001).

2.2 Alaşımlarda Besleme

Katılma çekirdek oluşumu ile başladıktan sonra çekirdeklerin büyümesi ile devam eder. Bu aşamada besleme etkinliği alaşımın yapısına doğrudan bağlıdır. Katılma aralığı ve çekirdek ilerlemesinin şekli beslemenin etkinliğini değiştirmektedir. Şekil 2.23'te, donma aralığının, kiritellenme bölgesinin belirlemesindeki önemini göstermektedir. Ayrıca katılma başlangıcını ve sonunu temsil eden mesafe-zaman eğrileri ile gösterilebilir. Saf bir metal ve uzun katılma aralığı olan katı bir çözelti alaşımı için tipik eğrileri Şekil 2.24'da gösterilirken, dendritik ve ötektik kristalleşmenin art arda aşamalarını içeren hipo-ötektik gri dökme demirin daha karmaşık katılması, ilgili başlangıç Şekil 2.24 c'de gösterilmektedir.



Şekil 2.22 Sıcaklık gradyanının ve alaşım yapısının kristallenme bölgesine etkisi (Beeley, 2001)

Hiçbir iki alaşım aynı besleme karakteristiğine sahip değildir, ancak katılma davranışlarına göre alaşımları üç gruba ayırmak mümkündür;

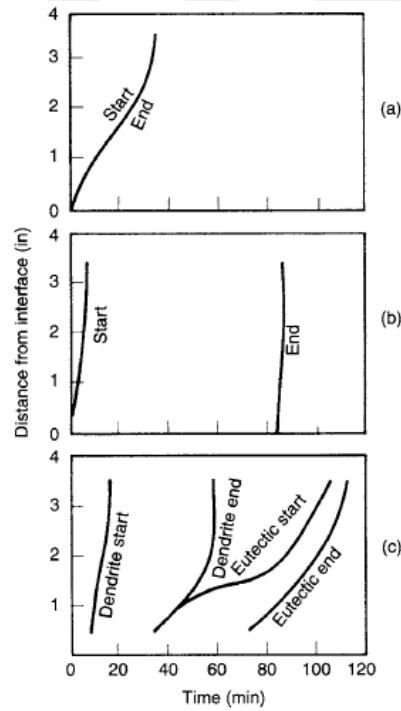
- Kabuk oluşturarak katılma alaşımlar
- Geniş kristallenme aralığına sahip alaşımlar
- Katılma sırasında genleşme gösteren alaşımlar, gri dökme demir gibi

Bu kategorilerin her birindeki bazı önemli alaşımlar Tablo 2.5'te listelenmiştir, ancak böyle bir sınıflandırmanın sadece yaklaşık olabileceği kabul edilmelidir.

Tablo 2.5 Alaşımların katılaşma karakteristikleri (Beeley, 2001)

Grup 1 Kısa katılaşma aralığına sahip olanlar	Grup 2 Uzun katılaşma aralığı sahip olanlar	Grup 3 Genleşerek katılaşanlar
Düşük karbonlu çelik Bronz Alüminyum bronzu Alüminyum Bakır	Orta ve yüksek karbonlu çelik Nikel alaşımları Fosfor bronzu Bakır kalay çinko alaşımları Magnezyum alaşımları Karmaşık alüminyum alaşımları	Gri dökme demir Küresel grafitli dökme demir

Birinci grup alaşımlarda yönlü katılaşma rahatlıkla elde edilebilir. Dar bir katılaşma aralığına sahiptirler. Katılaşma yüzeyden sıcak bölgelere doğru hızla ilerler. Çekinti büyük boşluk olarak besleyiciye doğru yönlendirilebilir. Metalin kendisi son derece sağlam olma eğilimindedir, ancak oldukça büyük besleyici gereksinimi nedeniyle verim düşüktür. Eğer besleme yeterli değilse, ortaya çıkan boşluklar termal merkez bölgesinde yoğunlaşma eğilimindedir.



Şekil 2.23 Kum kalıpta mesafeye göre katılaşma süresinin gösterimi, (a)Bakır (99.8% Cu), (b)88/10/2 bakır çinko kalay alaşımı, (c) ötektik üstü gri dökme demir (Beeley, 2001)

İkinci alaşım grubu, uzun donma aralığı ile karakterize edilir, böylece katılaşma dökümün çoğunda eşzamanlı olarak ilerlemektedir. Alaşımın yüksek termal yayılma özelliği, belirli bir soğutma oranı için sıcaklık gradyanını azaltarak bu katılaşma durumunu destekler. Aşırı katılaşma sıcaklık dereceleri, örneğin yoğun soğutma ile

tetiklenemediği sürece, bu alaşımlarda aşamalı katılaşma daha az belirgindir. Dökümler, sonuç olarak yaygın gözenekliliğe eğilimli olup, genellikle düşük yoğunluklu ve hidrolik sızıntıya neden olur: yoğunluk ölçümleri ve basınç testleri, bu nedenle kalite testleri olarak uygun olabilir. Bu tip bir alaşımda beslenmeye karşı çıkan bir başka faktör, çözünmüş gazların donma esnasında çekirdeklenmiş boşluklara yayılımı sonucu oluşan gaz basıncıdır. Özellikle dentritler arasına hapsolan gazların yayılımı zorlaştırarak mikro çekinti oluşumunu desteklemektedir. Bu alaşım grubu için kullanılan döküm tekniği her zaman yönlü katılaşmaya dayanmaz. Bazı durumlarda, ayrı gözenekliliğin varlığı kabul edilir ve sıcaklık derecelerini vurgulamak yerine soğutma oranını eşitleyerek yerel gözeneklilik konsantrasyonlarından kaçınmaya yönelik çaba gösterilir. Bu yaklaşım benimsenirse, döküm daha ince ve soğutma sırasında lokal sıcak noktalardan kaçınmak için kullanılan çoklu girişlerle yolluklandırılmalıdır (Beeley, 2001).

Tipik bir hipötektik gri demir, daha önce Şekil 2.23'de gösterilen iki ardışık katılaşma aşamasından geçer; bu aşamaların ikincisi tamamen ayırt edicidir. Katılaşma başlangıçta ostenit dendritlerin büyümesiyle devam eder. Bu dönemde büzülme ve beslenme, katılaşma aralığı geniş alaşımlara benzer, interdendritik beslenme aşamasıdır. Bununla birlikte, sıcaklığın daha da düşmesiyle birlikte, ötektik katılaşma aşaması, interdendritik sıvının karbon zenginleşmesinin ardından grafitin çökmesi ile başlar. Östenit-grafit ötektiğinin katılaşması, hacim genişlemesi ile birlikte sistem içinde pozitif bir baskı yaratır. Tamamen sert bir kalıpta bu genişleme metalik fazın büzülmesini dengelemek için yeterlidir, Sonuç olarak, döküm daha sonradan kendiliğinden beslenir. Benzer bir durum kısmen küresle grafitli dökme demir içinde durumunda da geçerlidir. Fakat grafitlerin küresel biçimde çökmesi pozitif basıncı düşürmektedir (Beeley, 2001).

2.3 Besleyici Tasarımı

Besleyici tasarımının temelinde çekinti boşluğu içermeyen sağlam döküm elde etmek yatmaktadır. Fakat besleyici tasarımı sırasında döküm verimliliği ve maliyette

göz ardı edilmemelidir. Söz konusu kısıtlar göz önünde bulundurularak besleyici boyutlandırılmasında sistematik bir yol izlenmelidir (Campbell, 2004).

Besleyicinin belirlenmesinde tek bir yöntemle bağlı kalmak hata olasılığını artırır. Geliştirilen yöntemlerin birçoğu çekinti oranının yüksek olduğu çelik alaşımlarına yöneliktir. Besleyici şekli ve boyutu belirlenirken ilk olarak yönlü katılaşmanın besleyicide bitmesi ve besleyicideki sıvı metalin en son katılaşmasıdır. İkinci olarak besleyicinin döküm parçadaki çekintiyi karşılayabilecek yeterli hacimde sıvı metali bulundurmasıdır. Bu iki durum tasarım sırasında *katılaşma süresi* ve *besleme hacmi* kriterlerini doğurur (Campbell, 2004)

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

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

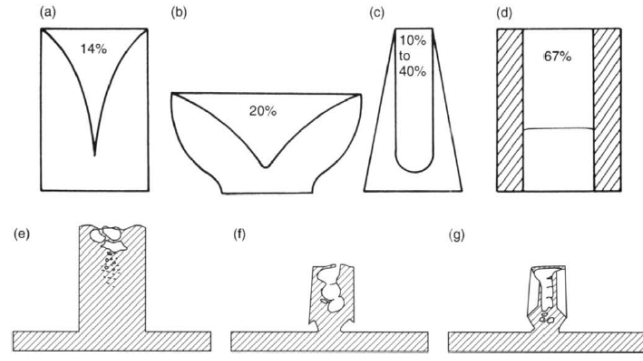
- Çil kullanımı ile çubuk ve plakalarda besleme mesafesi düzenlenmelidir.
5. Sıvı metalin akışı doğru yönde olmalıdır ve besleme malzemesinin akmasına yetecek kadar yeterli basınç farkı olmalıdır.
 6. Döküm içindeki tüm noktalarda boşlukların oluşumunu ve büyümesini bastırmaya yetecek basınç olmalıdır.

Dökümün katılaşması sırasında besleyicinin işlevini yerine getirebilmesi için aşağıdaki değişkenler göz önünde bulundurulmalıdır. (Campbell, 2004)

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

2.3.1 Besleyici Şekli

En iyi besleyici özellikleri küre biçimdeki besleyiciler ile sağlanabilir. Fakat kürenin son katılaşılan kısmının merkezinin olması ve kalıplama zorlukları kullanılabilirliğini engellemektedir. Bu nedenle silindirik şekle en yakın olan tasarımlar kullanılmaya çalışılmaktadır. Şekil 2.24’de kullanılan besleyici şekillerinden bazıları görülmektedir. Besleyici şeklinin değişmesi verimliliği değiştirmektedir. Fakat döküm parçaya bağlantı durumuna göre en uygun besleyici şekli seçimi yapılmaktadır (Beeley, 2001).



Şekil 2.24 Farklı şekillerdeki besleyicilerin metal verimleri. a) silindirik, b) yarı küresel, c) ters tepe açılı, d) ekzotermik gömlek, e) kum besleyici, f) yalıtım esaslı besleyici, g) ekzotermik çift konik (Campbell, 2003)

2.3.2 Besleyicilerin Boyutlandırılması

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

1930’larda Chvorinov, Fugar’ın yaklaşımını katılaşma hızı üzerinden yorumlayarak besleyici tasarımında halen kullanılan en temel bağıntıyı ortaya koymuştur (Eşitlik 2.48) (Candeğer, 2001).

1940’larda geliştirilen NRL metodu kullanılarak besleyici tasarımı için besleyici ve döküm arasında uygun hacim oranları grafiklerinden de boyut tayini yapılmaktadır

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

2.3.2.1 Caine Yöntemi

Besleyici hesaplamalarının büyük bir kısmı Chvorinov kuralına dayanmaktadır (Eşitlik 2.48). Katılaşma süresi göz önünde bulundurularak. Besleyici daha geç

katılacak şekilde (V/A) döküm modülünün belirlenecek şekilde seçilmesidir. Caine tarafından bu metot çalışılmış ve Chrorinov bağıntısından faydalanarak bir katılma oranı F bulunmuştur

$$F = \frac{A_D/V_D}{A_B/V_D} > 1 \quad (2.73)$$

A_D döküm yüzey alanı, V_D döküm hacmi, A_B besleyici yüzey alanı, V_B besleyici hacmi.

Caine metodunda Chvorinov oranı bağıntısının tersine yüzey alanı hacme oranlanmıştır. Isı yayılımı yüzey alanının bir fonksiyonu olarak gelişir, ısı içerik ise hacmin bir fonksiyonudur (Yüksel, 2019).

2.3.2.2 NRL Yöntemi

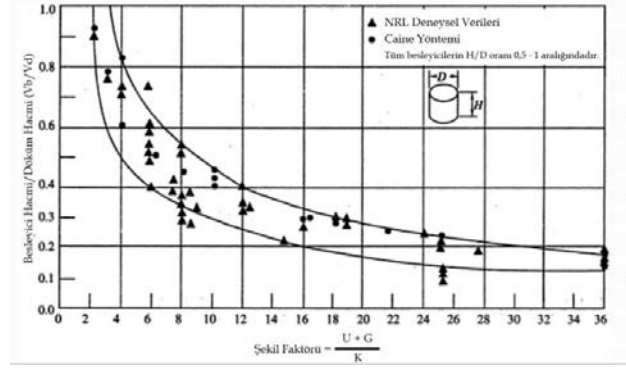
NRL yönteminin dayandığı ana prensip A/V oranı küçük olan dökümlerde V_C/V_D oranının büyük olması gerekliliğidir. Metodun basitliği, yüzey alanının ölçülme zorluluğunu gideren bir şekil faktöründen kaynaklanmaktadır. Bu faktör basit şekiller için çok kolay, kompleks şekiller için ise nisbeten yaklaşık olarak tayin edilmektedir.

$$\text{Şekil Faktörü} = \frac{U+G}{K} \quad (2.74)$$

U uzunluğu, G genişliği, K kalınlığı gösterir.

Bir döküm için yöntemin uygulanmasında aşağıdaki adımlar izlenmelidir.

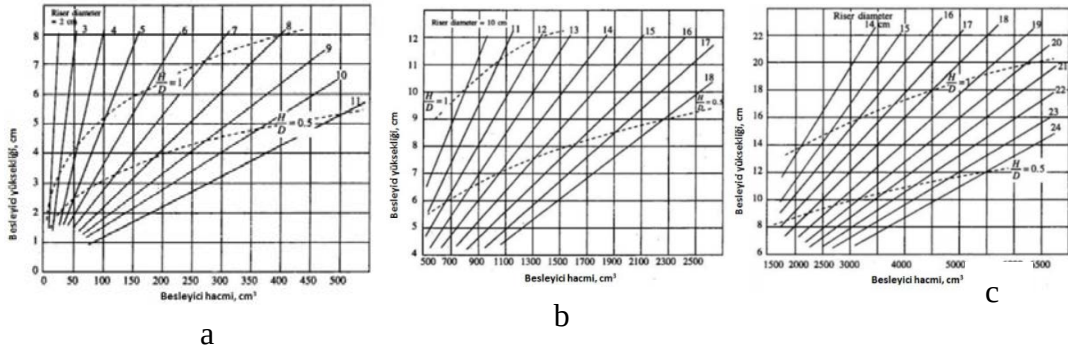
- Şekil Faktörü tespit edilmelidir.
- Şekil 2.25 yardımıyla V_C/V_D yani Besleyici Hacmi/Döküm Parça Hacmi oranı bulunur.
- V_D bilindiğine göre V_C için tercih edilen çap veya yükseklik
- Şekil 2.26'dan tayin edilir.



Şekil 2.25 Şekil faktörü-hacim oranları grafiği (Beeley, 2001)

Şekil 2.26'da verilen eğrilerden üstteki kalın eğri $h/d=1$ için besleyici çapı, altındaki kalın eğri ise $h/d=1/2$ için uygun besleyici çapını hesaplamaya yardım eder. Grafikteki eğrilerin farklılığı eğer üstten besleme yaparsanız $h/d=1/2$, yandan besleme yapılacak ise $h=d$ veya $h/d=1$ seçilir. Üstten besleme esnasında radyasyon ile ısı kaybı söz konusu olabileceğinden mümkünse yandan besleyici tasarımı kullanarak daha verimli sonuçlar alınması olasıdır.

Şekil 2.26'da dört farklı skalaya sahip grafikler mevcuttur. Fakat hepsi aynı sonuca götüren grafiklerdir. Bulunur besleyici hacmi hangi skala için daha kolay hesaplanıyorsa o skaladaki eğrileri kullanılır (Yüksel, 2019).



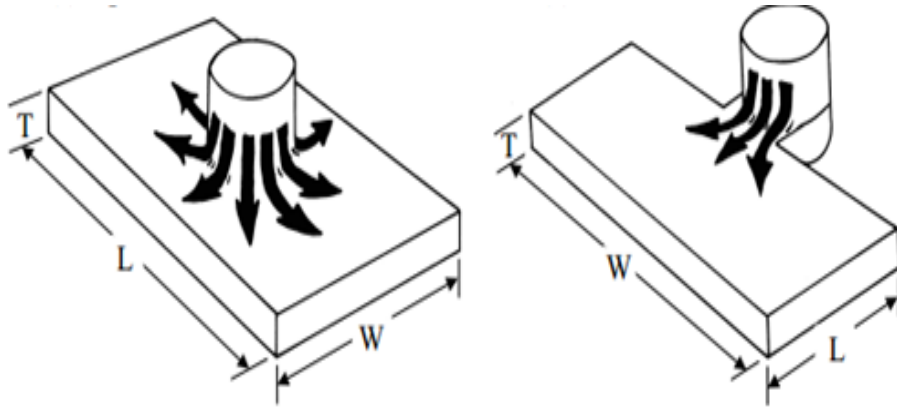
Şekil 2.26 A: besleyici çapı 2 cm kadar, B: besleyici çapı 10 cm kadar olan, C: besleyici çapı 14 cm kadar olanlar için besleyici hacmi-Besleyici yüksekliği grafiği (Özel, 2019)

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 2.27’de üst ve yandan besleme şekilleri gösterilmektedir (Hardin ve ve diğer., 2001).

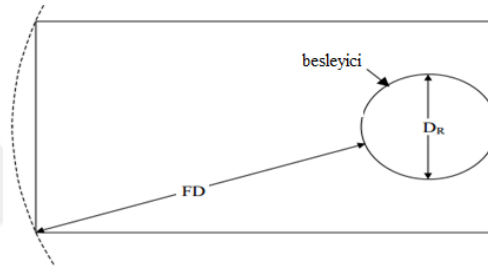


Şekil 2.27 Üstten ve yandan beslenen döküm parçaları (Hardin ve ve diğer., 2001)

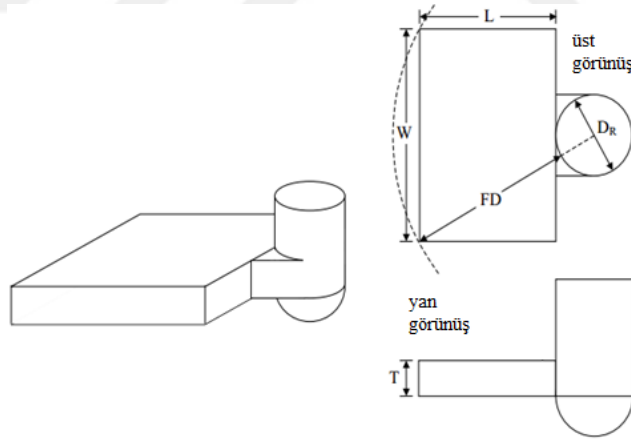
Besleme mesafesi besleyicinin döküm parçası üzerinde boşluksuz olarak besleme yapabileceği en büyük uzaklık olup, besleyicinin dış çapından döküm parçasının en uç

kesitine kadar olan mesafe olarak gösterilir (Şekil 2.28ve Şekil 2.29). Besleme mesafesi gerekli olan besleyici sayısını belirlemektedir. Birden fazla besleyici kullanımının söz konusu olduğu durumlardaki besleme mesafesi Şekil 2.30'de gösterilmiştir (Ou ve ve diğer., 2002).

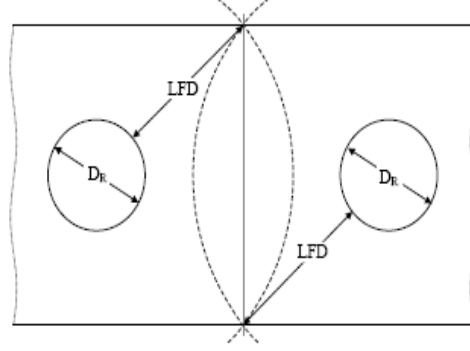
Kesikli çizgiler içinde kalan bölge besleme mesafesidir. Birden fazla besleyici kullanımının söz konusu olduğu durumlarda besleyicilerin besleme mesafeleri birbiri ile kesişmelidir ve dökümün tüm kesitleri kesikli bölgeler içinde kalmalıdır (Ou ve ve diğer., 2002).



Şekil 2.28 Üst besleyici besleme mesafesi (Ou ve ve diğer., 2002)



Şekil 2.29 Yan besleyici besleme mesafesi (Ou ve ve diğer., 2002)

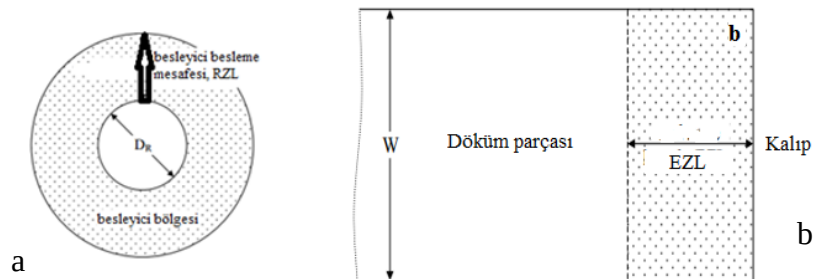


Şekil 2.30 İki besleyici kullanılması durumunda yan besleme mesafesi (Ou ve ve diğer., 2002)

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

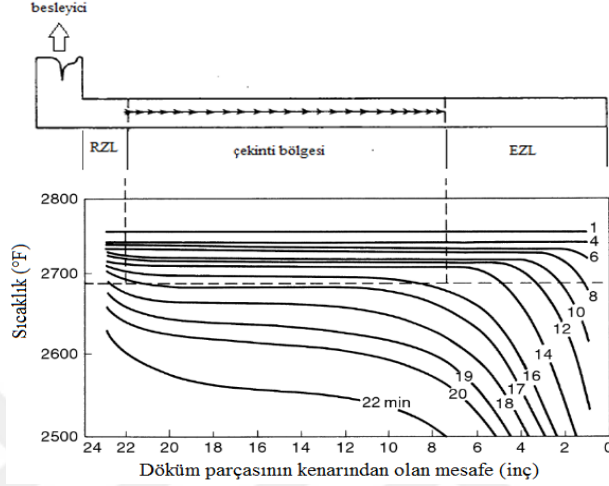
- Besleyici besleme bölgesi
- Soğuk uç etkisi ile besleme bölgesi

Besleyicinin döküm parçasına göre daha geç katılaşmasından dolayı dik bir sıcaklık gradyanı oluşumu söz konusudur. Bu sıcaklık gradyanı sonucunda çekinti hatasının önlendiği mesafeye besleyici besleme mesafesi (RZL) denilmektedir (Şekil 2.31a). 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 2.31b). 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 2.31 a) Besleyici besleme bölgesi, b) soğuk uç besleme bölgesi (Ou ve ve diğer., 2002)

Şekil 2.32’te döküm parçasının kenarından olan mesafeye göre sıcaklık dağılımı gösterilmektedir. RZL ve EZL bölgeleri dik bir sıcaklık gradyanı söz konusu iken çekinti bölgesinde yataya yakındır (Şekil 2.32). EZL bölgesinden besleyiciye doğru bir yönlü katılaşma söz konusudur. Çekinti bölgesinde ise sıcaklık gradyanının yataya yakın olmasından dolayı besleme yetersizdir.



Şekil 2.32 Karakteristik sıcaklık dağılımı (Beeley, 2001)

2.3.3.1 Niyama Kriteri

Son yıllarda çelik döküm parça üzerinde çekinti oluşturabilecek bölgelerin belirlenmesinde sıklıkla Niyama Kriteri’ne başvurulmaktadır. Niyama Kriteri bölgesel ısı gradyanının, bölgesel soğuma hızının kareköküne bölünmesi ile bulunur (Eşitlik 2.42).

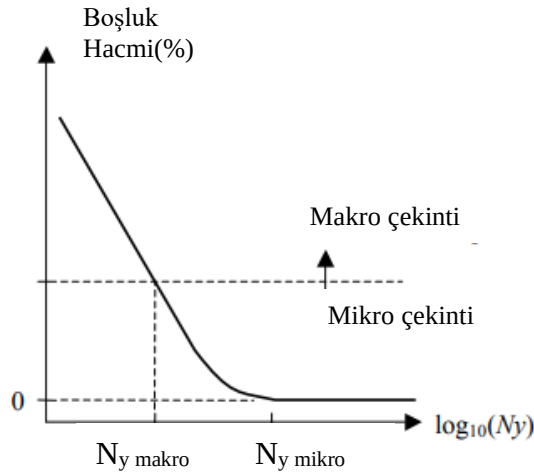
$$N_y = G / \sqrt{\dot{T}} \quad (2.75)$$

Niyama Kriteri için genellikle kullanılan birimler “(C-s)^{1/2}/mm”, “(C-dk)^{1/2}/cm” ve “(F-dk)^{1/2}/inç”dir, birimler birbirine Eşitlik 2.43’teki gibi eşitlenebilir.

$$1,0 (C-s)^{1/2}/mm = 1,29 (C-dk)^{1/2}/cm = 4,40 (F-dk)^{1/2}/inç$$

Niyama kriteri katılaşmaya yakın bir andaki çekinti oluşumunu öngörür. Niyama kriteri ve çekinti boşluğu oluşumu arasındaki ilişki Şekil 2.33’de verilmiştir. Yeterince büyük Niyama değerinde çekinti görünmez. Niyama değeri kritik değerin (N_y mikro)

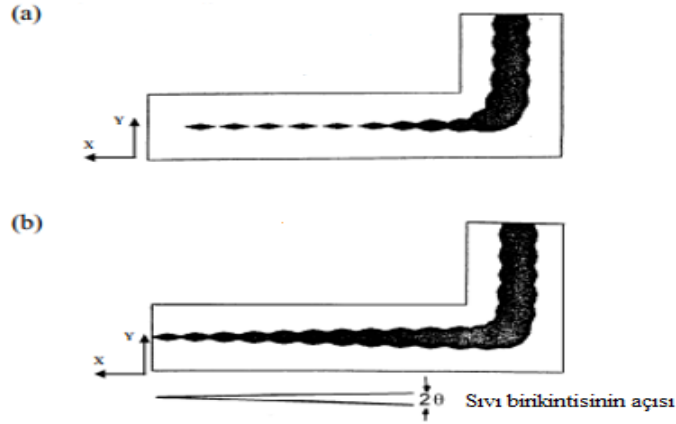
altına düştüğünde mikro çekintiler görölmeye başlar. Niyama değeri düştükçe mikro çekintiler standart radyografik analizler ile tespit edilebilecek boyutlara ulaşır. Bu durum ikinci bir kiritik değere ($N_{y \text{ makro}}$) devam eder. Niyama değeri $N_{y \text{ makro}}$ değerin altına düştükçe makro çekintiler oluşum artar. Böylece Niyama Kriteri çekinti oluşumuna esas besleme mesafesi ölçümlerinde kullanılabilir (Carlson ve Beckermann, 2008).



Şekil 2.33 Niyama Kriteri ve çekinti oluşumu arasındaki ilişkinin şematik gösterimi (Carlson ve Beckermann, 2008)

N_y değerinin hesaplanmasında kullanılan sıcaklık gradyanının dik olması döküm parçasında çekinti oluşumunu etkilemektedir. Şekil 2.34b’de sıcaklık gradyanının Şekil 2.34a’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 2.34a). 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 ısı iletim katsayısı, yoğunluk, özgül ısı gibi termofiziksel özelliklerine bağlı olarak N_y değeri değişecektir.



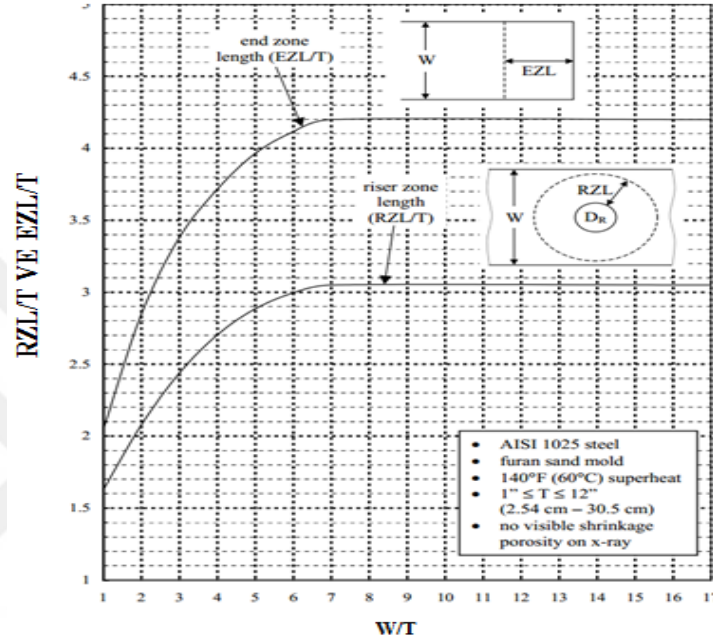
Şekil 2.34 a) Besleme yolu kapalı çekinti oluşumu söz konusu b) Besleme yolu açık çekinti oluşmaz (Carlson ve ve diğer., 2002)

2.3.3.2 Besleyici ve Soğuk Uç Etkisi

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 2.35’de W/T oranına bağlı olarak RZL/T ve EZL/T oranları verilmektedir.

Şekil 2.35 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 eksenine 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 değeri de açıklanabilir. Grafikte W/T nin 7'den büyük olduğu durumlarda RZL/T değeri 3,05'te sabitlenmiştir (Şekil 2.35). RZL ve EZL uzunluklarından yararlanılarak besleyici tarafından beslenen kesitin boşluksuz olup olmadığı, çekinti oluşması durumunda oluşan çekintinin hangi bölgede oluşabileceği belirlenebilmektedir (Ou ve diğ., 2002).

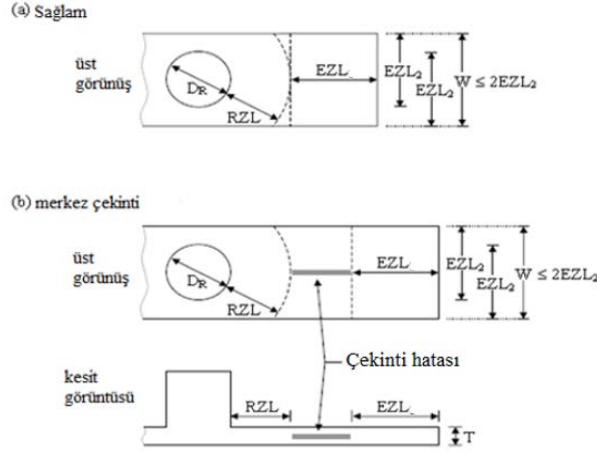


Şekil 2.35 Besleyici ve uç besleme bölgelerinin kesit kalınlığı ve genişliğe bağlı değişimi (Ou ve diğ., 2002)

2.3.3.3 Üstten Besleme

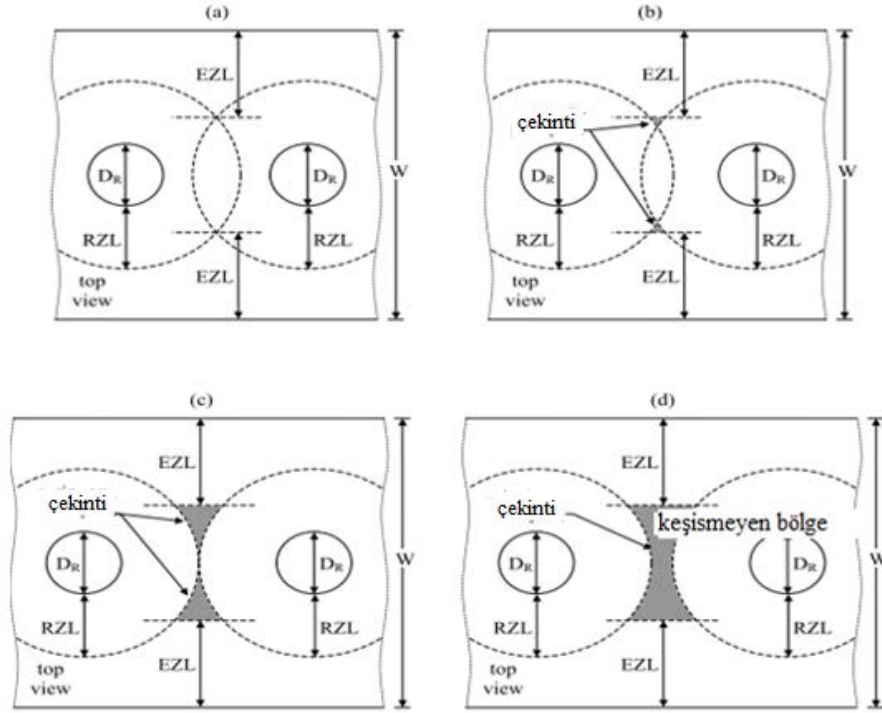
Şekil 2.36'da kesit kalınlığının (W) uç bölge uzunluğuna eşit veya daha küçük olduğu durumu göstermektedir. Kalıp ile metal ara yüzey uyumlulukları değiştiği için EZL ve EZL_2 farklı değerlerde olabilir. Bunun sonucunda; EZL W kalınlığının bir fonksiyonu olup, EZL_2 yan kenarların fonksiyonudur. $W < 2EZL_2$ olan durumlarda üstten beslenen ve uç etkisi gösteren plaka şekilli döküm kesitleri için RZL VE EZL bölgeleri Şekil 2.36'da gösterilmektedir. Şekil 2.36a'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 2.36b'de besleyici ile uç besleme bölgelerinin kesişmemesi

durumunda arada belli bir mesafe olacaktır ve bu bölgede çekinti oluşacağı görülmektedir (Ou ve ve diğer., 2002).



Şekil 2.36 a) Besleyici bölgesi ve uç bölgesi kesişmekte, b) İki bölgenin kesişmeme durumu (Ou ve ve diğer., 2002)

Şekil 2.37'de $W > 2EZL_2$ olan plaka şekilli dökümlerde RZL ve EZL bölgeleri gösterilmektedir. Şekil 2.37a'da döküm parçası besleyici ve uç bölgelerin sınırları içinde kalmaktadır ve döküm parçası hata içermemektedir. Şekil 2.37b'de ise plaka uzunluğunun artmasıyla döküm parçası besleyici ile uç bölge arasında boşluğun kalmasından dolayı belirli bir uzaklıktan sonra çekinti oluşumu görülmüştür. W'nin EZL_2 'den büyük olması sonucunda çekinti oluşumu görülmemiştir. Kesit genişliğinin artması sonucunda çekinti bölgeleri büyüyecektir (Şekil 2.37c, Şekil 2.37d). Şekil 2.36a ve Şekil 2.37c kıyaslandığında EZL uzunlukları aynı olmasına rağmen kesit genişliği büyük olan Şekil 2.37c'de çekinti hatası artmaktadır (Ou ve ve diğer., 2002).



Şekil 2.37 a) Uç bölgeler besleyici içinde kalırsa plaka sağlam, b) Plaka uzunluğu arttıkça görülen çekinti hataları (Ou ve 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 ve diğer., 2002).

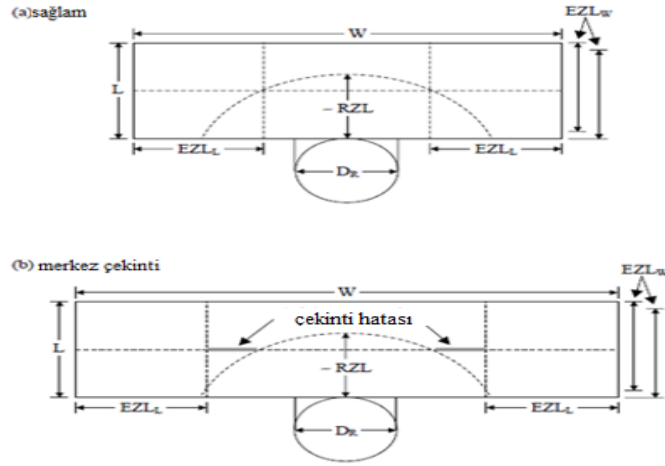
2.3.3.4 Yandan Besleme

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 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 ve diğer., 2002).

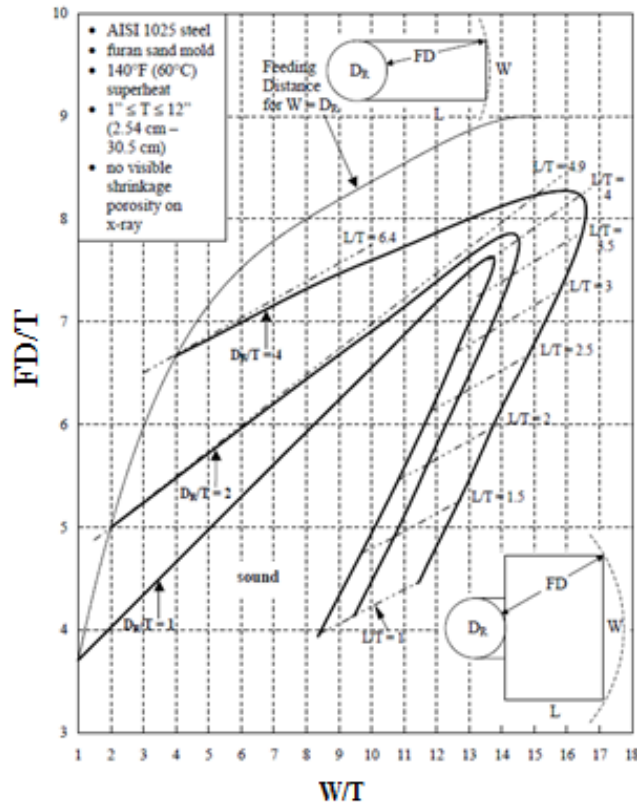
Şekil 2.38a’da uç noktaların kesişme noktaları besleyici besleme bölgesi içindedir ve döküm kesitinin tamamı besleyici ve uç besleme bölgeleri içinde kalmaktadır. Şekil 2.38b’de uç noktaların kesişme noktaları besleyici bölgesinin dışında kalmıştır ve bunun sonucunda çekinti hataları oluşmuştur. Belirtilen 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 ve diğer., 2002).



Şekil 2.38 Yandan beslenen plaka; a) Uç bölgeler besleyici bölgesi içinde, b) Besleyici bölgesi içinde uç bölge oluşumu yoktur, çekinti oluşur (Ou ve ve diğer., 2002)

2.3.3.5 Soğuk Uç Etkili 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 2.39'da kesikli çizgiler L/T oranını ifade etmektedir (Hardin ve ve diğer., 2001).



Şekil 2.39 Döküm parça uzunluğu, döküm parça genişliği ve besleyici çapına bağlı besleme mesafesi (Hardin ve ve diğer., 2001)

2.3.4 Besleyici Veriminin Arttırılması

Besleyici verimini arttırmak üzere genel olarak şu yöntemler kullanılır;

- Elektrik arkı ile ısıtma (genellikle ingot döküm için kullanılır)
- Dökümden sonra aralıklarla sıvı metal ilave edilmesi (dökümcüler tarafından gerek döküm ağzından gerekse besleyici üzerinden sıklıkla uygulanan işlemdir.)
- Besleyici destek elemanı olarak yalıtım ve ısı yastıklarının kullanımı
- Soğutma etkisini arttırmak için çil uygulamaları,
- Ekzotermik ve yalıtım özellikli gömleklerin kullanımı.

2.4 Besleyici Gömlekler

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

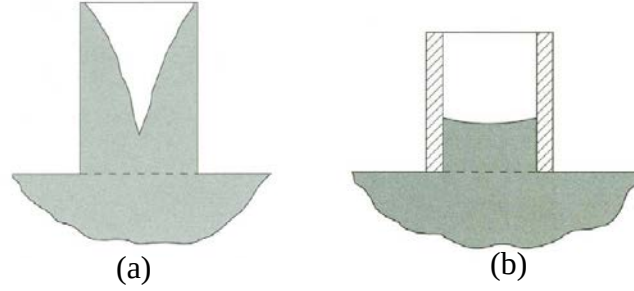
Ekzotermik beslemenin esası tipik termit reaksiyonu ile sağlanmaktadır. İnce toz alüminyum ve uygun metal oksit bileşimi ile sağlanır. Ekzotermik özellikli gömleklerin kullanımı besleyici verimini %80'e kadar artırabilmektedir (Şekil 2.47) (Sorelmetal, 2000).



Ekzotermik bileşikler iki yolla metale uygulanır;

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

- Besleyicilerin üretiminde doğrudan ekzotermik katkı malzemelerinin kullanılması



Şekil 2.40 Dökümlerde a: kum besleyici ve b: besleyici gömlek kullanımı (Brown, 2000)

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

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

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

Yalıtım ve ekzotermik özellikli bir döküm besleyici gömleğinin temel bileşenleri;

- Ekzotermik reaksiyon elemanları (ısı verme)
- Ateşleyiciler (ekzotermik reaksiyonu başlatmak ve iletirmek)
- Yalıtım elemanları, hem döküm metalinin yaydığı ısıyı daha yavaş kaybetmesi için hem de ekzotermik reaksiyon ile elde edilen ısının yayılımını azaltmak için
- Bağlayıcılar genellikle organik karakterlidir ve besleyici gömlek bileşenlerini bir arada tutmak için (Twardowska ve Aufderheide, 2002).

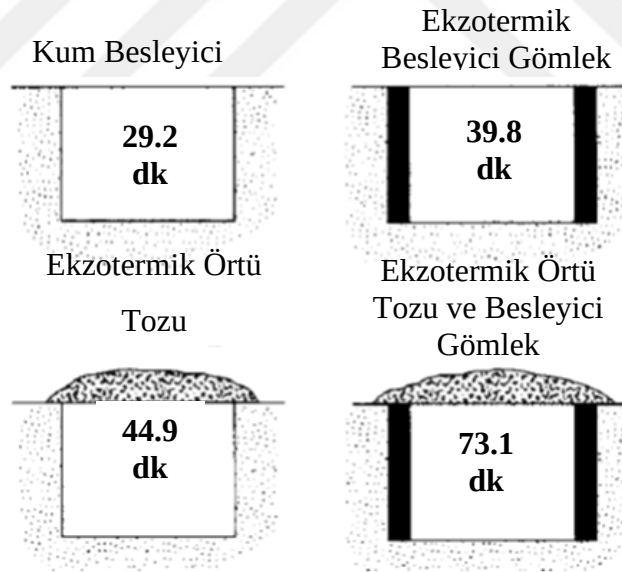
2.4.1 Besleyici Gömlek Isıl Modülü

Besleyici gömlek kullanımı ile besleyici metalinin yüzeyinden ısı kaybı hızı düşer. Kum besleyiciler ile karşılaştırılarak besleyici gömlek kullanımı ile besleyici metalinin kullanım oranı düşürülebilir. Besleyici gömlek kullanımı ile katılma süresi şöyle hesaplanır;

$$t_F = kM_F^2 \quad (2.78)$$

t_F besleyicinin katılma süresi, M_F besleyici modülü, k gömlek ve toz olmak üzere iki bileşene bağlı katsayıdır.

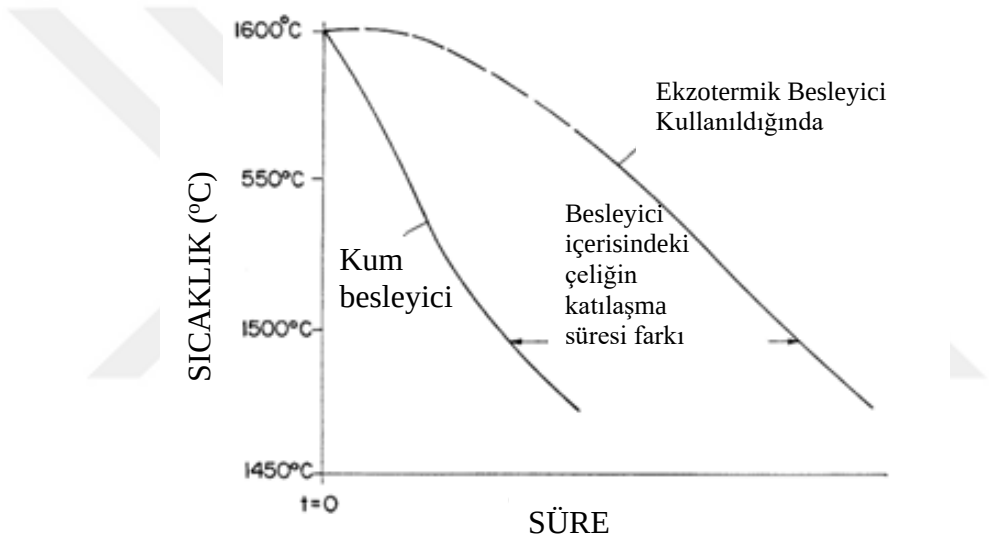
Besleyici metali yan duvarlarında gömlek kullanımı metalin ısı kaybını azaltmaktadır. Fakat en iyi besleme etkinliği için besleyici gömlek ile birlikte gömlek bileşimine benzer özelliklere sahip örtü tozu kullanımı gereklidir (Şekil 2.41). Besleyici gömlekler kapalı veya kapaklı olarak kullanıldığında örtü tozu kullanımına gerek kalmayabilir (Brown, 2000)



Şekil 2.41 200 mm çapta 250 mm yüksekliğindeki çelik parçada besleyici gömlek ve ekzotermik toz kullanımının soğuma hızlarının karşılaştırılması (Brown, 2000)

Bütün besleyici gömlek tiplerinin asıl amacı, gömleksiz kullanımdan daha az metali daha uzun süre sıvı tutabilecek besleme sistemini sağlamaktır. Ekzotermik gömlek kullanıldığında ve kullanılmadığında karbon çeliğinin soğuma rejimi Şekil 2.42’da

verilmektedir. Sıvı metal hareketinin en kolay olduğu, soğuma eğrisinin düzleşmeye başlamadan hemen önceki kısma kum içerisindeki sıvı çelik daha hızlı ulaşırken gömlek içerisindeki sıvı metal nispeten daha uzun sürede ulaşmaktadır. Bu da katılaşma tamamlanana kadar döküm parça için sıvı metal deposu olarak kullanılan besleyicinin daha geç katılaşmasını sağlamaktadır. Ayrıca besleyici gömlekler sahip oldukları ısıtma ve yalıtım özelliği sayesinde daha az metalle daha uzun mesafeyi besleyebilmektedir. Böylece bilinen tüm yöntemlerle yapılan besleyici hesaplarında bu gömlekler sayesinde belirgin bir etkin besleme mesafesi artışı olmuştur (Menon, 1997).



Şekil 2.42 Ekzotermik besleyici kullanımının sıvı çeliğin soğumasına etkisi (Menon, 1997)

2.5 Döküm Benzeşim Programı

Karmaşık geometri ve farklı kesit kalınlıklarına sahip döküm parçaların besleyici ve yolluk tasarımı oldukça zordur. Yoğun mühendislik bilgi ve becerisi ile deneyimi gerektirmektedir. Fakat bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmelere bağlı olarak döküm süreçlerinin modellenmesi, döküm mikro ve makro yapılarının önemli ölçüde ön görülmesi döküm benzeşim programları sayesinde sağlanmaktadır. Döküm süreçlerinin modellenmesi, program kullanıcısının sanal ortamda kalıp doldurulurken

ve doldurma yapıldıktan sonra kalıp içerisinde neler olduğu hakkında hızlı ve doğru öngörülebilmesi için gerekli bir matematiksel yöntemdir.

2.5.1 Benzeşim Programı Girdileri ve Program Çıktılarının Değerlendirilmesi

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

Piyasada birçok döküm benzeşim programı mevcuttur (Tablo 2.6). Döküm benzeşim programları; yeni bir teknoloji olarak döküm kalıplama tasarımını kolay, ekonomik ve doğru yapabilmeye olanak sağlayarak deneme ve yanılma maliyetini ortadan kaldırmaktadır. Bütün tasarım ve analizlerin bilgisayar ortamında yapılması ile model ve kalıp hazırlama ve boşuna hurda malzeme üretmeye gerek kalmaksızın dökümhane ortamında deneme-yanılma yapmayı ve gereksiz sakat ve hurda döküm üretmeyi ortadan kaldırmaktadır. Benzeşim programlarını kullanarak 3 boyutlu katı model üzerinde, kaç tane ve hangi ebatla besleyicinin gerekli olduğunu ve nereye yerleştirileceği belirlenerek, yolluk-besleyici tasarımı bilgisayar üzerinde yapılabilir. Tasarımı tamamlanan parçanın benzeşim programında uygulamaları yapılarak doldurma, katılaşma ve çekinti oluşumu gibi birçok sonuç görülebilir. Bu sonuçlardan faydalanarak gerekiyorsa tasarımda mümkün olan en iyi ve en ekonomik döküm için revizyon yapılabilir. Ayrıca parça tasarımında optimizasyon sistem tarafından optimum kalite ve verim elde edilecek şekilde otomatik olarak yapılabilir. Tüm bunların hepsi çok kısa zamanda yapılabilir. Yani model, kalıp ve ilk döküm yapıldığında yüksek oranda başarı ve yüksek oranda verim elde edilir. Böylece zamanında teslimat, tek seferde başarılı üretim ve döküm parça kullanım süresinin uzamasıyla daha yüksek kalite ve daha düşük maliyet sağlanabilir (Çolak ve Kayıkçı, 2002, s.2-5).

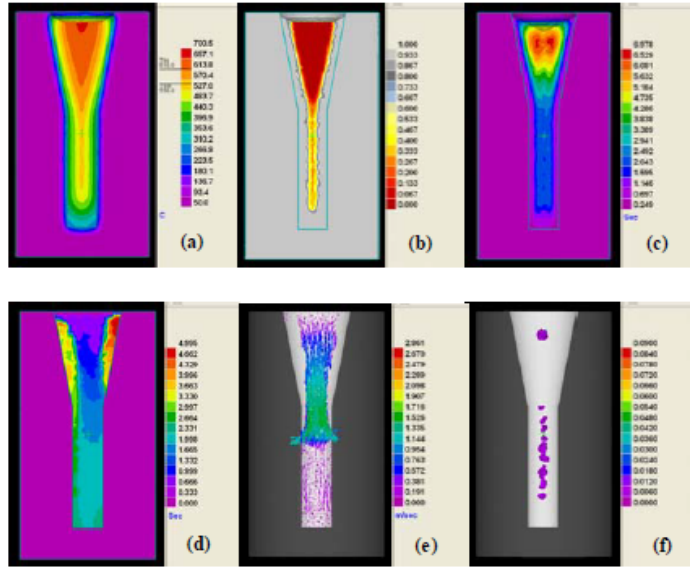
Tablo 2.6 Yaygın kullanılan döküm benzeşim programları (Abhilash ve Joseph, 2009)

Software	Methodology	Vendor	Website
ADSTEFAN	FDM	Frank Hunt, Hitachi America Ltd, MI, USA	www.dm.hap.com
AnyCasting	FDM	Anycasting Co. Ltd., Seoul Korea	www.anycasting.com
AutoCAST	VEM	Advance Reasoning Technologies, Mumbai, India	www.autocast.co.in
CAPCAST	FEM	EKK, Inc., Michigan, USA	www.ekkinc.com
CastCAE	FVM	CT-Castech, Inc. Oy, Kerava, FinLand	www.casttech.fi
Flow-3D	FDM	Flow Science, Inc, USA	www.flow3d.com
MAGMASOFT	FDM	Magma GmbH, Aachen, Germany	www.magmasoft.com
Mavis Flow	FDM	Alphacast Software, Ltd. Northampton, UK	www.alphacast-software.co.uk
NovaFlow & Solid	FDM	Novacast Technologies, Tyringe, Sweden	www.novacast.se
ProCAST	FEM	ESI group, Paris France	www.esi-group.com
SoftCAST	FDM	Oriental Software Pvt Ltd, Bangalore, India	www.oriental-software.com
SUTCAST	FDM	Sutcast Foundry Technologies, Inc, Vancouver, Canada	www.sutcast.com
Virtual Casting	FDM	NIIST, Trivandrum, India	w3rnt.csir.res.in
WINCAST	FEM	RWP GmbH, Germany	www.rwp-simtec.de
SOLIDCast, OPTICast, FLOWCast	FDM	Finite Solutions, Inc, USA	www.finitesolutions.com

Her programın hesaplama şeklinde farklılıklar olsa da genel olarak programa girilen verilen ve çıktılar benzerdir. Hesaplanması istenen döküm tasarımının ve döküm kalıp tasarımı bileşenlerinin üç boyutlu modeli programa tanıtılır. Metal ve kalıbın ısı iletkenlik, yoğunluk, özgül ısı gibi termofiziksel özellikleri ile döküm sıcaklığı, döküm hızı ve kalıbın ilk sıcaklığı gibi döküm parametreleri programa girilir. STL, STEP ve IGES gibi farklı CAD dosya formatları katı modellerin programa tanıtılabilmesi için kullanılabilir. Programdan çıktılar, programın çalışma algoritması ile çeşitli hesaplama tekniklerine dayanan güçlü çözümler kullanılarak üretilir. Benzeşimden elde edilen çıktı, sıcaklık, katılma ve soğuma hızı dağılım çizgileri olarak gösterilir. Isı akışı, gözenek dağılımı, soğutma eğrileri ve çeşitli kriterler gibi ilgili bilgilerin birçoğu da işlem sonrası işlemde elde edilebilir. Procast simülasyon çalışmalarından sonra elde edilen çıktıların bazıları, Şekil 2.43'te gösterilmiştir (Abhilash ve Joseph, 2009).

Tablo 2.7 Yaygın kullanılan 3 boyutlu çizim programları (Abhilash ve Joseph, 2009)

CAD Package	Vendor	Website (URL)
AutoCAD	Autodesk Inc., 111 Main St Parkway, San Rafael, CA 94803, USA.	www.autodesk.com
CADCEUS	Nihon Unisys Exolutions Ltd., Shinjuku, 33-8 Wakamatsu-cho, Shinjuku-ku, Tokyo.	www.cadceus.com
CADKEY	Kubotek Corporation Creation Engineering Division, USA.	www.kubotekusa.com
CATIA, SolidWorks	Dassault Systèmes HQ, 10, Rue Marcel Dassault, 78140 Vélizy-Villacoublay, France.	www.3ds.com, www.solidworks.com
Cimatron E Mold Design	Cimatron Ltd., 11 Gush Etzion, St. Givat Shmuel 64030, Israel.	www.cimatron.com
form.Z	AutoDesSys Inc., 2011 Riverside Drive, Columbus, OH 43221.	www.formz.com
IronCAD	IronCAD Corporate Office, 700 Galleria Parkway Suite 300, Atlanta, Georgia.	www.ironcad.com
Pro/ENGINEER	Parametric Technology Corporation, Needham, MA 02484, USA.	www.ptc.com
SpaceClaim Engineer	Space Claim Corporation, Corporate Headquarters, 160 Baker Ave Ext, Concord, USA.	www.spaceclaim.com
TurboCAD	M&I Design, LLC, 25 Leveroni Ct, Novato, San Francisco California CA.	www.turbocad.com, www.imdsdesign.com
Unigraphics NX, Solid Edge, I-DEAS	Siemens PLM Software, 6800 Granite Parkway, Suite 800, Plano, USA.	www.plm.automation.siemens.com
VaricAD	VaricAD s.r.o., Jectedská 168, Liberec, 460 08, Czech Republic, EU.	www.varicad.com
ZWCAD	ZWCAD Software Co Ltd, Rm. 608, No. 888, Tianhe North Rd., Guangzhou, China.	www.zwcad.org



Şekil 2.43 Benzeşim çıktıları: a) sıcaklık dağılımı, b) katı oranı dağılımı, c) katılaşma zamanı, d) doldurma zamanı, e) doldurma hızı, f) çekinti boşluğu (Abhilash ve Joseph, 2009)

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

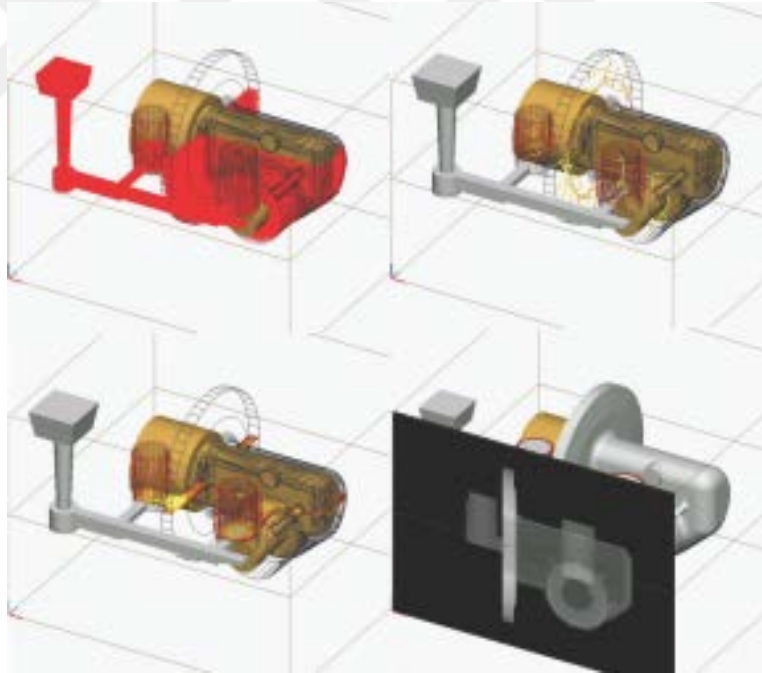
- Malzeme ve özelliklerinin seçimi
- Döküm ve kalıp modeli oluşturma
- Modelin hücrelere ayrılması ve benzeşim
- Sonuçların değerlendirilmesi şeklindedir.

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

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

Benzeşim programlarının diğer girdileri ise kullanılacak malzeme özelliklerini (döküm alaşımı, kalıp, maça, besleyici gömlekler, soğutma elemanları, kalıp boşluğunun durumu, kalıp kaplamaları gibi.) ve işlem parametrelerini (kalıplama yöntemi, metal-kalıp arası ısı akış sabiti, döküm sıcaklığı, tüm bileşenlerin ilk sıcaklığı, döküm şekli gibi) kapsar.

Benzeşim programlarının temel çıktıları dökümün, katılaşmanın ve oda sıcaklığına kadar olan soğumanın görsel akışıdır (Şekil 2.44). Kalıp dolum benzeşimleri, toplam dolma süresi, kum hatalarına neden olan kalıp erozyonlarının, tamamlanmamış dolma ve hava sıkışması gibi durumların ön görülmesine yardımcı olur.



Şekil 2.44 Döküm, besleme aşamaları, katılaşma ve radyografik incelemenin görsel akışı (Ravi, 2008)

Gaz sıkışmalarından dolayı gaz hataları yetersiz gaz çıkışı nedeniyle meydana gelir ve ön görülmesi güçtür. Döküm benzeşim programları sıcaklık gradyanı ve soğuma hızını gösterir. Bu sayede Niyama veya diğer kriterlere bağlı olan çekintileri ön görmek mümkün olur. Oda sıcaklığına kadar olan katılaşmanın benzeşim programı

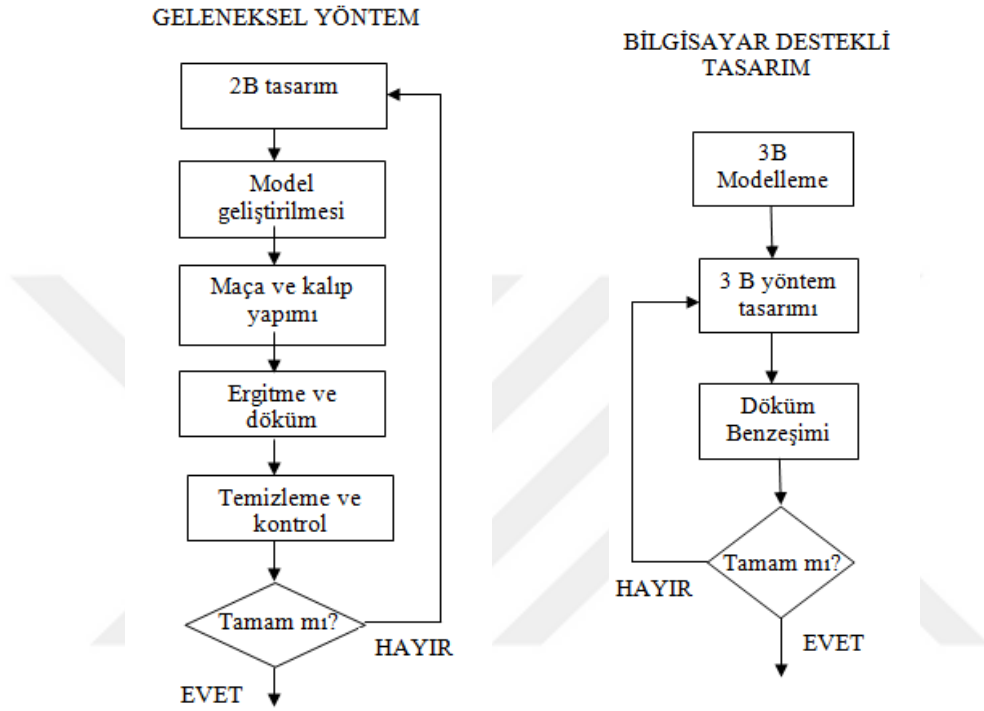
mümkündür. Bu da mikro yapının, mekanik özelliklerin, artık gerilmelerin ve çarpılmaların öngörülmesini sağlar. Çoklu fiziksel modellerin kullanılması döküm sırasında, katılma ve gerilmeler için anlık yaklaşımların ortaya konmasını sağlar. Bu da özellikle ince kesitli metal dökümlerin elde edildiği yüksek basınçlı metal kalıba döküm uygulamalarında oldukça kullanışlı olmaktadır.

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

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

Yöntem Optimizasyonu; Yeni parçaların dökümünde ve var olan parçaların üretiminin deneme dökümleri yapılmadan geliştirilmesinde tercih edilir. Yöntem geliştirilmesinde (parçanın kalıptaki duruşunun belirlenmesinde, kalıp tasarımında, besleyici, besleme yardımcıları, soğutma elemanları, kalıp kaplamaları ve yolluklarda)

oluşabilecek hataların bilgisayar üzerinde denenerek giderilmesidir. İstenen kalite ve verim elde edilene kadar denemeler gerçekleştirilebilir. Mevcut dökümlerde yapılacak küçük iyileştirmeler, büyük miktardaki üretimlerde belirgin malzeme, enerji, donanım ve iş gücü kaynağı tasarrufu sağlar (Şekil 2.28).



Şekil 2.45 Geleneksel ve bilgisayar destekli tasarımların karşılaştırılması (Ravi, 2008)

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

Parça tasarımının geliştirilmesi; parçaların büyük oranda dökülebilirliğini arttırmak ve sonuçta parçada meydana gelecek boyut değişiminin etkilerinin ön görülmesine yardımcı olur. Parçaların, üretim tasarımı sırasındaki döküm benzeşiminde yüzeysel hataların önceden tespit edilmesini sağlar. Örneğin, çekinti ve soğuk katlanma hatalarına yatkın olan, çok ince ve kalın kesitlerin birleştiği bölgeler sahip olan parçaların analizinde kullanılır. Döküm aşamasında, verimi düşüren ek besleyici kullanımı ve fazladan işleme gibi pahalı önlemlere gerek kalmadan üretimin

sağlanabilmesi için kullanılır. Parça tasarımında malzeme özelliklerini değiştirmeyecek küçük değişikliklerin yapılması üretilebilirliği artırmaktadır (Ravi, 2008).

2.5.2 Benzeşim Programlarının Hesaplama Güçlükleri

Benzeşim programlarının tamamı matematiksel kabullere dayanarak hesaplamalar yapmaktadır. Bu durumda gerçek döküm şartları ile uyumun artırılmasında çeşitli güçlükler ortaya çıkarmaktadır.

2.5.2.1 Sürecin fiziği

Döküm işlemi yürütülürken çeşitli fiziksel gereklilikler doğmaktadır. Bu işlemlerin fiziksel yönleri Tablo 2.8'de açıklanan işlemlerin tüm yönlerini tanımlamak için gerekli işlem fiziğinin tamamen anlaşıldığı açık değildir. Halen öne çıkan bu sorunlardan bazıları Tablo 2.9'da belirtilmiştir. Bu özelliklerden bazıları, örneğin köpük filtreleri gibi bazı yazılım paketlerinde modellenmiştir, ancak benzeşimde kullanılan modellerin gerçekte ne olduğunu net değildir. Tablo 2.9'da listelenen tüm özellikleri tam olarak modellemek için kesinlikle göz önünde bulundurulmaları ve hesaba katılmadan önce tahmin edilen sonuçların etkileri dikkate alınmalıdır. Örneğin, kalıp kaplamaları, sadece iyi deneysel veriler elde etmek gerekli olabilir, böylece ısı transfer katsayısı üzerindeki etki doğru bir şekilde modellenenebilir, ancak aslında kaplamanın ayrı bir faz olarak modellenmesi muhtemelen çoğu durumda gerekli değildir (Jolly, 2002).

Tablo 2.8 Yaygın döküm süreçleri (Jolly, 2002)

Döküm Süreci	Parça Ağırlığı	Üretim Süresi	Döküm Metali
Kum Kalıp	100 g - 250 ton	saniyeler - günler	Tüm metaller
Hassas Döküm	10 g - 100 kg	dakikalar – saatler	Tüm metaller
Reçineli Kabuk Kalıp	100 g – 100 kg	dakikalar – saatler	Fe, Cu
Metal Kalıba Gravite Döküm	2 kg - 50 kg	dakikalar	Al, Zn, Mg ve bazı Cu
Alçak Basıncılı Döküm	5 kg – 25 kg	dakikalar	Al ve Mg
Yüksek Basıncılı Döküm	10 g – 20 kg	saniyeler	Al, Mg, Zn
Sıkıştırılmalı Döküm	100 g – 20 kg	dakikalar	Al

Tablo 2.9 Döküm benzeşim programının hesaplamakta zorlandığı işlemler (Jolly, 2002)

Olgu	Problem	Etkileri
Köpük filtreler	Düzensiz köpük yapısı ve karmaşık yapı	Yüzey türbülansı, yüzey oksitlerinden dolayı hız farkı
Kalıp genleşmesi	Bükülme ve genleşme	İç gözenekler
Kalıp metal ara yüzeyindeki ayrılmalar	iç çekintiler ve kalıptaki değişimlerle birlikte katılaşan kabuk üzerinde gerilme	Ara yüzey ısı transfer katsayısı, yüzey kalitesi
Kalıp kaplamaları	Özel kimyasal yapı, 1-100 µm kadar çok ince yapı	Ara yüzey ısı transfer katsayısı
Tane küçültmek ve modifikasyon için yapılan metalürjik uygulamalar	Çekirdek sayısı, ön katılaşmaya etkisi	Tane boyutu, mikro yapı, alaşımın katılaşma ve besleme davranışı
Kalıpta uygulanan aşılایıcılar	Kuvvetli kimyasal reaksiyon	Akış, mikro yapı, curuf ve oksit kalıntıları

2.5.2.2 Termofiziksel veriler ve sınır koşulları

Ekzotermik malzemeler; Çelik ve bazı demir dökümhanelerinde, sıvı metallerle temas halindeyken termit reaksiyonu gösteren malzemelerden üretilen gömlekler besleyiciler yaygın bir uygulama alanına sahiptir. Bu tescilli malzemeler besleyiciyi sıcak tutar, böylece sıvı metalin daha uzun süre sıvı kalmasını sağlar. Bir dizi yazılım paketi, termofiziksel verinin mevcut olmasına rağmen, bu malzemelerle doğru çalışması ile ilgili ciddi şüpheler vardır (Tablo 2.10).

Standart olmayan alaşımlar; standart olmayan alaşımlar, genel erişim için evrensel termofiziksel veri tabanı bulunmadığından, dökümcü için sıkça soruna neden olmaktadır. Standart alaşımların verilerini bulmak oldukça kolaydır. Yıllık üretim tonajı düşük ve potansiyel olarak daha fazla döküm problemi olan standart olmayan ve standart alaşımlardan hafif sapma gösteren alaşımlar için veriler kamuya açık değildir ve üretilmesi son derece pahalıdır. Bununla birlikte, kimyasal bileşimlerden hesaplanan termofiziksel verileri üretmek için kullanılabilecek bir dizi yazılım paketi vardır.

Kalıp malzemelerini özellikleri; Özellikle kum kalıplar ve hassas döküm kabuk kalıpları için malzemelerin termofiziksel veriler iyi belgelenmemiştir. Sorunlar, kum özelliklerinin dökümhaneden dökümhaneye değişeceği gerçeğinden kaynaklanmaktadır. Hassas döküm kalıbı teknolojisi genellikle bir dökümhaneye

özgüdür ve tescilli bir “sanat” olarak kabul edilir. Modellemede bu sorunun nasıl çözülebileceğini öngörmek zordur. Dökümlerin belirli termofiziksel verileri tahmin edebilmeleri için bazı basit kurallara dayalı teknikler kullanılarak bu alan içerisinde bir miktar ilerleme sağlanmıştır. Bu araçlar, dökümhanede başka durumlarda örneğin kalıp kaplamalarında uygulanabilir. Kum maça üfleme sürecinin modellenmesi üzerine yapılan çalışmalar, döküm işlemi sırasında maçaların etkisinin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunacaktır.

Ara yüzey ısı iletim katsayısı(h); muhtemelen döküm modellemesinin en “uydurulmuş” bölümlerinden biridir. Kalıp malzemesi özellikleri tam olarak bilinmediğinden, bazı girişimlerde bulunulmasına rağmen ara yüzey ısı transfer katsayılarının doğru ölçümlerinin yapılması mümkün değildir. Sık sık kalıp ve ara yüz belirli mekanizmalar olmasına rağmen aynı ve tek olarak kabul edilir. döküm işlemi sırasında h'nin değerini değiştirmesi gereken meydana gelir. Genelde arayüz, yazılım kullanıcısının doğru hata tahminine ulaşmasını sağlayan ısı transfer katsayıları kullanılır (Jolly, 2002).

Tablo 2.10 Ekzotermik malzemeler için gerekli termofiziksel veriler ve teknikler (Jolly, 2002)

Yanmamış Besleyici Gömlek (Reaksiyon öncesi) sıcaklığa bağlı yoğunluk, iletkenlik, özgül ısı değerleri	Döküm sırasında gömlek ısınır gereken standart malzeme özellikleri
Ateşleme Aşaması (düzenli yaklaşım) ateşlenme hızı ve sıcaklığı	yanmanın başlayabileceği hızı dikkate alır
Ateşleme Aşaması (yalın yaklaşım) ateşlenme sıcaklığı	besleyici gömleğin yanmaya ve enerji vermeye başladığı sıcaklık
Yanma Aşaması (düzenli yaklaşım) yanma hızı yanma enerjisi	saniyede ve kilogramda ortaya çıkan enerji ortaya çıkan toplam enerji
Yanma Aşaması (yalın yaklaşım) yanma sıcaklığı yanma süresi	Besleyici gömlek, yanma süresi boyunca yanma sıcaklığında kalır ve enerjiyi çevre malzemeler içine sabit bir oranda serbest bırakır
Yanmış Besleyici Gömlek (Reaksiyon öncesi) sıcaklığa bağlı yoğunluk, iletkenlik, özgül ısı değerleri	Yanma işleminden sonra, birçok besleyici gömlek yanmadan önceye göre daha zayıf yalıtım özelliklerine sahiptir, bu yüzden bu aşamayı ayrı ayrı düşünmek gerekir

2.5.2.3 Zaman Ölçeği

Son birkaç yılda zamandaki en büyük azalma bilgisayar benzeşim ön işleme aşamasında olmuştur. Bu, bilgisayar destekli tasarımın mühendisliğe nüfuz etmesinin ve daha birçok bileşenin artık elektronik olarak ortaya çıkmasının bir sonucudur. Benzeşim yazılımını kullanan dökümcülerden ve henüz benimsemeyenlerden gelen en yaygın geri bildirimler, bir kalem ve kağıtla daha hızlı yapabilecekleridir. Çoğu dökümcünün bir kalem ve kağıt ile yazılım kodunun çözeceği tüm sorunları çözmeyeceği gerçeği göz önüne alındığında, bu hala ciddi bir konudur. Zaman çizelgeleri azalıyor ve paralel kodlar yazıldığından ve çok işlemcili ve ağ bilgi işlemlerinden daha yaygın hale geldikten sonra donanım kısıtlamaları bir engel daha kalkmaktadır. Yüksek derecede tanımlanmış bir tek işlemcili PC'nin şu anda 24-48 saat içinde “ortalama” bir iş için sonuç vermesi beklenir. ancak bu, kesin geometriye ve sonuçlardan gereken bilgi miktarına son derece bağlıdır. Örneğin, karmaşık bir geometride bile basit bir katılaşma birkaç saat içinde gerçekleşir. Kullanıcı tam bir doldurma, gerilme, havalandırma ve katılaşma analizi gerektiriyorsa, süre 10 ila 20 kat bir faktörle arttırılabilir. Ancak bilgi işlem zamanını tecrübe ve kurallarla öğrenen bilgi ya da yapay zeka tabanlı bir yazılımla karşılaştırırken benzeşim kodları için çok daha uzundur (Jolly, 2002).

BÖLÜM ÜÇ

LİTERATÜR ÖZETİ

Besleyici gömlekler döküm sanayinde yaygın olarak kullanılmasına rağmen yapı ve termofiziksel özellikleri hakkında veriler ve araştırma sonuçlarının yer aldığı literatür çalışmaları oldukça kısıtlıdır. Bu bölümde besleyici gömleklerin tasarımı, geliştirilmesi ve üretimi için literatürde yer alan besleyici gömlek özellikleri, döküm uygulamaları ve benzeşim uygulamaları incelenmiştir.

Bu kapsamda; ekzotermik besleyici gömleklerde metalotermik reaksiyon kinetiği ve termodinamiği, döküm uygulamalarında besleyici boyut, modül ve parça bağlantıları, benzeşim uygulamalarında, benzeşim programları ile besleyici tasarımı, katılaşma özelliklerini belirlenmesi, besleyici gömlek parametrelerinin benzeşim programlarındaki uygulamaları üzerine yapılan çalışmalar incelenerek değerlendirilmiştir.

3.1 Metalotermik Reaksiyonlar

S. H. Fischer ve M. C. Grubelish 1998 yılında yayınladıkları çalışmalarında metal ve metal oksitler arasında gerçekleşen termit reaksiyonu sonucunda elde edilen teorik enerjiyi hesaplamışlardır. Reaksiyonların gerçekleşmesi için faz dönüşümü olmaksızın gerekli sıcaklıklar ve sonucunda elde edilen reaksiyon ısısı birim kütle ve hacim için termit reaksiyonu gerçekleştirebilen metaller için sıralanmıştır (Fischer ve Grubelish, 1998).

J. Mei ve arkadaşları 1999 yılında yaptıkları çalışmada alüminyum ve Fe_2O_3 arasındaki termit reaksiyonu için şartlarını belirleyerek, termodinamik açıdan reaksiyonun gerçekleşme ihtimalini ortaya koymuşlardır. Aynı zamanda farklı sıcaklıklarda reaksiyondan elde edilen ısıнын ve mikro yapının kontrol edilebilirliğine bakmışlardır. Böylece özellikle seramik ve metal matrisli kompozitlerin üretimde hem enerji hem de bileşen kaynağı olarak kullanılan termit reaksiyonunun termodinamik analizini yapmışlardır. Reaksiyon sürecini incelemek için DTA analizinden

faýdalanmışlardır. Ürünlerin ve oluşan kompozit yapının karakterizasyonu için X-ışınları kırınım ve elektron mikroskobundan yararlanmışlardır (Mei ve ve diğer., 1999).

Luisa Dures ve arkadaşları 2007 yılında yayınladıkları çalışmada $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}$ termit reaksiyonu stokiometrik oranlardaki alüminyumlanmış bileşenlerle gerçekleştirilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Ürünler X-ışınları kırınımı ve Mössbauer spektrometresi ile karakterize edilmiştir. Reaksiyonlar sonucunda Al_2O_3 ve Fe elde edilirken girenlerdeki alüminyum oranının düşürülmesiyle hersinit (FeAl_2O_4) ve hızlı soğuma durumlarında sitokiometrik olamayan alumina elde edilmiştir (Dures ve ve diğer., 2007).

Jeffrey Gesner ve arkadaşlarının 2012 yılında yaptıkları çalışmada yakıt olarak kullanılan molibden trioksit (MoO_3) ile Al bileşiminin alev yayınına oksit kalınlığının etkisine bakmışlardır. Ortalama 95 nm boyutundaki Al tozlarını 480°C 'de 180 dk oksijen 90 dk argon altında tutarak oksit kalınlığı artışı ölçmüşlerdir. Isıl analizleri yapmak için TGA/DSC analizlerinden, oksit kalınlığı ölçümü için ise geçirimli elektron mikroskobundan (TEM) yararlanmışlardır. Ortalama 5 nm oksit kalınlığına sahip Al tozlarında ısı yayınının daha iyi olduğunu ortaya koymuşlardır (Gesner ve ve diğer., 2012).

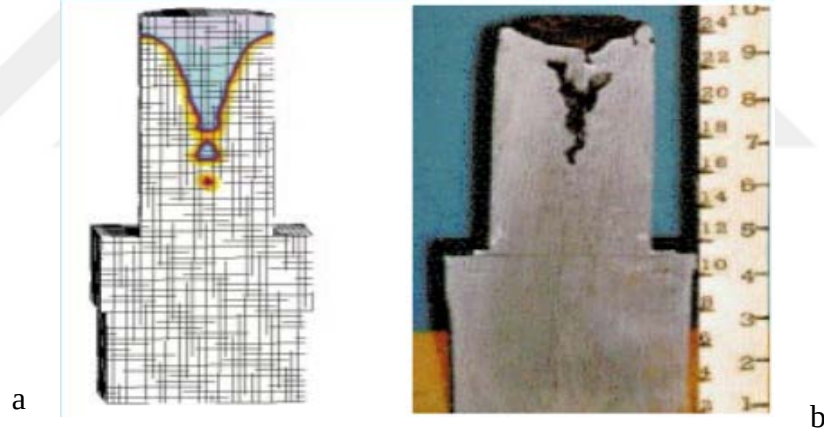
3.2 Dökümlerde Besleyici Gömlek Uygulamaları

2000 yılında besleyici gömlek üreticisi bir firma tarafından yapılan çalışmada, yalıtım ve/veya ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin yüzeyler arası ısı geçiş sabiti, ısıl iletkenlik, özgül ısı ve yoğunluğu gibi termofiziksel sıvı metal testleri, DT-TG analizleri, DSC analizleri ve “Laser Holometrix and Guarded Hot Plate” testi ile belirlenmiştir. Sıvı metal denemeleri sırasında döküm kalıbının çeşitli bölgelerine yerleştirilen termal çiftlerden sıcaklık ölçümü alınarak yapılmıştır. Bu testler sonucunda elde edilen veriler matematiksel yaklaşımlar olarak döküm benzeşim programına aktarılmıştır. Daha sonra bu program kullanılarak besleyici tasarımları yapılmış ve benzeşim-gerçek döküm şartları karşılaştırılması yapılmıştır. Deneysel

alışmalar düşük yoğunluklu yalıtım özellikli, orta yoğunluklu ekzotermik-yalıtım özellikli ve düşük yoğunluklu yalıtım-ekzotermik özellikli besleyici gömlekler ile yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 3.1’de verilmiştir. En yakın sonuç %8’lik bir hata ile düşük yoğunluklu ekzotermik-yalıtım özellikli besleyici gömlek Döküm uygulamasından elde edilmiştir. şekil 3.1’de düşük yoğunluklu ekzotermik-yalıtım özellikli besleyici gömleğin gerçek döküm şartları ve benzeşim programı karşılaştırması bulunmaktadır (Foundry, 2013).

Tablo 3.1 Besleyici gömlek tiplerine göre benzeşim ve gerçek döküm uygulamaları sonuçlarının karşılaştırılması (Foundry, 2013)

Gömlek Tipi	Benzeşim Programı ile öngörülen ekinti (%)	Gerçek dökümler Sonucunda Oluşan ekinti (%)
Düşük yoğunluklu yalıtım zellikli	32	36
Orta yoğunluklu ekzotermik-yalıtım zellikli	19	22
Düşük yoğunluklu yalıtım-ekzotermik özellikli	37	40



şekil 3.1 Düşük yoğunluklu ekzotermik-yalıtım özellikli besleyici gömleğin benzeşim programı sonuçlarının (a) ve gerçek döküm şartları (b) karşılaştırması (Foundry, 2013)

2005 yılında gerçekleştirilen bu çalışmada Ignaszak ve arkadaşları besleyici gömleklerin ekzotermik yalıtım özelliklerine etki eden termofiziksel parametreleri belirlemişlerdir. Kalıp içerisine yerleştirilen termal çiftler ile döküm anında sıcaklık ölçümleri alınarak termofiziksel özellikleri ifade eden katsayılar hesaplanmıştır. Zamana bağlı olarak ekzotermik reaksiyon sonucu ortaya çıkan ısı değerleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen benzeşim sonuçları ile yapılan deney

Ignaszak ve arkadaşları sonuç olarak; döküm sırasında ölçülen sıcaklık değerleri ile benzeşim esnasında ölçülen sıcaklık değerlerinin benzer olduğunu gözlemlenmiştir. L2 ve L5 olarak adlandırılan besleyici gömlekler için toplam ısıyı Calcosoft çözüm yöntemi ile hesaplayarak besleyici gömleklerin termofiziksel özellikleri ortaya koymuşlardır (Ignaszak ve ve diğer., 2005).

75

İ. Arda ve arkadaşları 2011 yılında GGG40, GGG60 ve GGG80 olarak üç farklı EN-GJS-500 malzemeden 1 cm, 2,54 cm ve 3,5 cm modüllerinde küp şeklinde üç farklı döküm gerçekleştirmişlerdir. Küp geometriler sırasıyla (100mm x 100mm x 100mm) 1cm, (156mm x 156mm x 156mm) 2,54 cm ve (210mm x 210mm x 210mm) 3,5cm modülleri olan planlanarak imal edilmiştir. 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 genişlemeye etkisini incelemişlerdir. Ergimiş metale curuf giderme işlemi uygulanmış olup argon gazı ile temizlenmiştir. Bu işlemlerin ardından 1380°C’de furan reçineli kalıba dökülmüştür. Modülün küreselleşmeye etkisini irdelemek amacıyla dökülen parçalardan numuneler çıkartılarak incelenmiştir. Elde ettikleri verilerin doğruluğunu arttırmak amacıyla tahribatsız muayene yöntemi olan sıvı penetrant yöntemini kullanmışlardır. Sıvı metalin katılaşması sırasında katılaşma bilgilerini almak amacıyla termal analiz deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu veriler doğrultusunda grafit genişmesi ile sıvı metal besleme ihtiyacının nasıl değiştiğini tespit etmek amacıyla modelleme oluşturulmuştur. SolidCast programı içinde bulunan besleyici tasarım sihirbazını kullanarak besleyici boyutlarını belirlenmişlerdir. Sonuç olarak kullanılan döküm kumunun grafit oluşumuna dayanan döküm genişmesine karşı koyabildiğini gözlemlemişlerdir. Döküm sonuçları incelendiğinde 100 mm boyutlarına sahip küp dökümlerin yüzeylerinde oluşan çöküntülere dayanarak bir miktar çekme etkisi altında katılaştığını ancak besleyicilerin bu çekintiyi karşılayabilecek boyutta olduğunu tespit etmişlerdir. Gerçekleştirilen benzeşim çalışmalarında herhangi bir gözenekliliğin bulunmadığını gözlemlemişlerdir. 156 mm boyutlarındaki küp dökümlerde porozite oluşmadığını, ancak GGG40 sınıfından dökülen deney numunesinin besleyici bağlantı bölgesinde bir miktar çekinti gözlemlenmiştir. 210 mm boyutlarındaki küp dökümlerde herhangi bir porozite gözlenmemiştir. Besleyicilerin çekinti miktarlarına bakarak modül büyümesinden kaynaklı genişlemenin arttığı sonucuna varmışlardır. Benzeşim sonuçları doğrultusunda 100 mm, 156 mm, 210 mm boyutlarındaki küp numunelerde çekinti riski oluşmadığını görülmüştür. Bu doğrultuda gerçek döküm sonuçları ile benzeşim sonuçlarının benzerlik gösterdiği sonucuna varmışlardır (Arda ve ve diğer., 2011).

2007 yılında Ramazan Kayıkçı ve arkadaşları döküm benzeşim programı kullanarak farklı kesit kalınlıkları içeren 1020 sade karbonlu çelik parçanın tasarlanmasını ve katılma davranışını incelemişlerdir. Dökülecek olan parçanın katı modeli üç boyutlu döküm benzeşim programı olan SolidCast benzeşim programı ile modellenmiştir. Döküm benzeşim programı kullanılarak farklı yolluk ve besleyici tasarımları gerçekleştirilmiştir. Farklı yolluk ve besleyici tasarımlarının döküm benzeşim sonuçlarına göre dökümün katılma süresi, döküm verimliliği, toplam döküm ağırlığı karşılaştırılarak en verimli dökümün gerçekleştirilebilmesi için uygun olan tasarıma karar verilmiştir. Besleyici tasarımı sıcak nokta kriteri, hacim kriteri, besleme yolu kriteri ve modül kriterleri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Benzeşim programında iki farklı besleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. İlk gerçekleştirilen besleyici tasarımında silindirik besleyiciler, ikinci olarak gerçekleştirilen tasarımda oval besleyiciler kullanılmıştır. Sonuç olarak gerçekleştirilen ikinci tasarım, besleyici tasarım kriterlerini sağlamakla birlikte döküm verimliliği (parça ağırlığı/toplam döküm ağırlığı) ilk tasarıma göre daha yüksek bulunmuştur. İlk besleyici tasarımı ve ikinci besleyici tasarımının benzeşim programında katılma süreleri incelendiğinde ikinci tasarımın katılma süresi ilk tasarımın katılma süresinden 2 kat daha hızlı olduğu tespit edilmiştir. Benzeşim sonrası analizler doğrultusunda parçanın oval besleyiciler kullanılarak gerçekleştirilen ikinci tasarım ile makro ve mikro gözenek içermeyecek şekilde dökülebileceği sonucuna varılmıştır. 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 Akar, 2007).

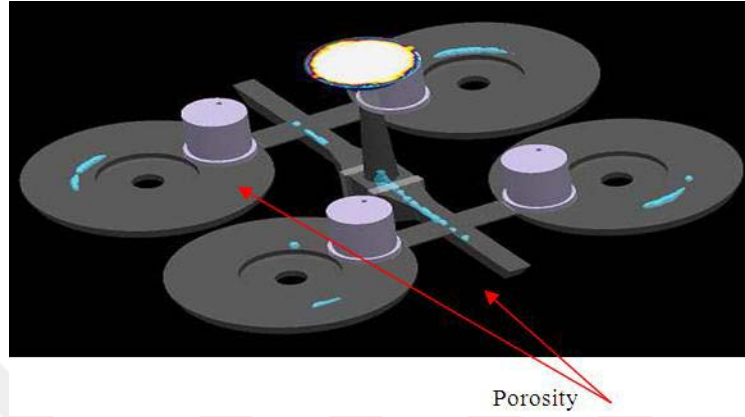
F. Sola 2014 yılında döküm öncesi ve döküm sonrası ekzotermik besleyici gömlekleri karakterize etmiştir. Karakterizasyon çalışmalarında, ekzotermik besleyici gömleklerin kimyasal ve morfoloji farklılıkları SEM görüntüleri ve XRD analizleri ile yansıtılmıştır. Yapılan çalışmada farklı besleyici gömlek karışımları kullanılmıştır. Besleyici gömlek karışımları arasındaki fark; ilk karışımda seramik fiber, ikinci karışımda mineral yün kullanılması olarak belirtilmiştir. Döküm çalışmalarında

ASTM A351 standartına uygun kompozisyona sahip CF8M çeliği tercih edilmiştir. Döküm çalışmalarında döküm sıcaklığı 1540°C olup kum kalıba döküm yapılmıştır. Döküm öncesi mineral yün içeren ekzotermik besleyici gömlek karışımlarının SEM görüntüleri incelendiğinde; yapıda bulunan mineral yünün uzunluğu boyunca ölçülen çap ölçülerinin ortalamasının Avrupa(European Regulation) limitlerinin üzerinde olduğu ve bunun sonucu olarak mineral yün esaslı ekzotermik besleyici gömleğin kanserojen olmadığı belirtilmiştir. Döküm sonrası seramik fiber esaslı ekzotermik besleyici gömleğin XRD sonuçları incelendiğinde Fe ve Mn elementleri görülmüştür. Yapılan EDS analizi sonucunda fiberlerin yüzeyinde Al_2O_3 yapıları görülmüştür. SEM görüntüleri ile fiberlerin yüzeyinde bulunan Al_2O_3 yapıları gösterilmiştir. Döküm sonrası mineral yün esaslı ekzotermik besleyici gömleğin XRD sonuçları incelendiğinde Al_2O_3 , Fe, Mn tespit edilmiştir. Ekzotermik besleyici gömlek ile sıvı metalin teması sonucunda mineral yünün ergidiği belirtilmiştir. Yazarlar bu etkileşim sonucunda ergiyik metalin ekzotermik besleyici gömleğin yapısına penetre ettiğini ve XRD sonuçlarında tespit edilen Mn ve Fe elementlerinin bu nedenlerden dolayı görüldüğünü belirtmişlerdir. Döküm öncesi her iki ekzotermik besleyici gömlek için yapılan XRD analizi incelendiğinde yoğunluklu olarak Al fazı tespit edilmiştir. Döküm sonrası her iki karışıma sahip ekzotermik besleyici gömleklerin XRD analizleri incelendiğinde termit reaksiyonu sonucunda korundum fazının ağırlıklı olarak görüldüğü yazarlar tarafından vurgulanmıştır (Sola, 2014).

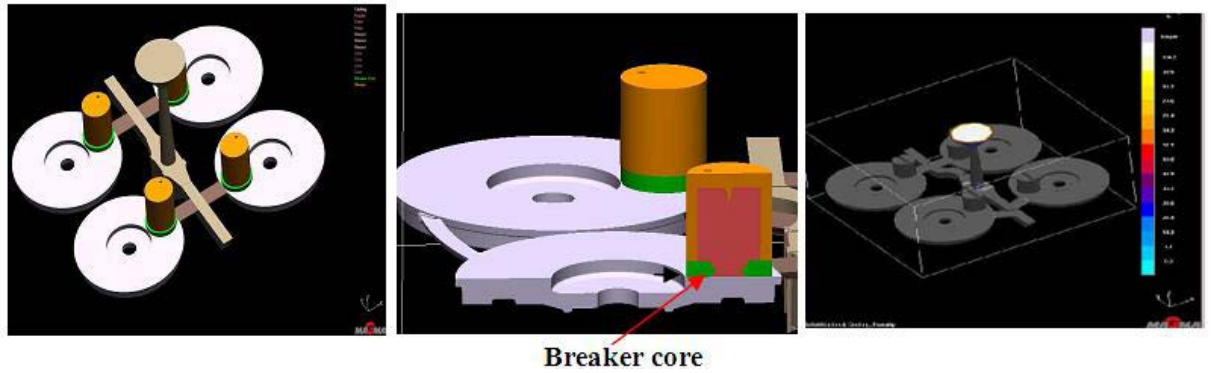
3.4 Besleyici Tasarım ve Benzeşim Uygulamaları

T. Ramu ve arkadaşlarının 2012 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada MagmaSoft benzeşim programını kullanarak EN-GJS-500 malzemesinden üretilen volan parçasının döküm maliyetini ve döküm hatalarını azaltmayı hedeflemişlerdir. Döküm hatalarını azaltmak ve hatasız döküm gerçekleştirmek için besleyici adedini değiştirerek farklı tasarımlar denemişlerdir. Üç farklı tasarımın döküm verimliliklerini ve gözeneklilik değerlerini karşılaştırmışlardır (Şekil 3.3). T.Ramu ve arkadaşları aşağıdaki şekillerde görüldüğü gibi tek besleyici kullanılması sonucunda parçada gözenekliliklerin oluştuğunu tespit etmişlerdir. İki besleyici kullanılarak gerçekleştirdikleri tasarımda gözenekliliğin ihmal edilebilir seviyede olduğunu

gözlemlemişlerdir. Bu üç farklı tasarım içinden kırıcı maça kullanılarak gerçekleştirilen tasarımda döküm verimliliği değerinin en yüksek, gözeneklilik değerinin en düşük olduğu sonucuna varmışlardır (Şekil 3.4) (Ramu ve ve diğer., 2012).



Şekil 3.3 Tek besleyici kullanılarak gerçekleştirilen benzeşim (Ramu ve ve diğer., 2012)



Şekil 3.4 Kırıcı maça kullanılarak gerçekleştirilen tasarım (Ramu ve ve diğer., 2012)

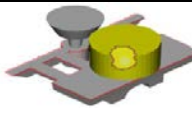
Dökülen parçalar ultrasonik muayene ile incelenerek benzeşim sonuçları ile değerlendirilmiştir. Sonuç olarak benzeşim ve deneysel çalışmaların birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir (Ramu ve ve diğer., 2012).

U. Khade ve S. Sawant tarafından 2014 yılında gerçekleştirilen çalışmada, dökme demir fren diski parçası için döküm verimini arttırmak amacıyla optimum silindirik besleyici boyutları belirlenmiştir. Fren diski parçası 3 boyutlu çizim programında oluşturularak döküm benzeşim programına tanıtılmıştır. Besleyici konumlarını belirlemek amacıyla besleyicisiz bir şekilde döküm parçasının katılaşması

incelenmiştir. Döküm 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 katılma davranışları değerlendirilmiştir. Döküm benzeşim çalışmalarıyla birlikte geleneksel olarak bilinen modül ve hacim kriteri esas alınarak hesaplar yapılmıştır. Döküm benzeşim sonuçlarına göre optimum besleyici boyutları belirlenmiştir. Optimum besleyici tasarımı ile gerçekleştirilen döküm benzeşim çalışması sonucunda döküm verimi arttırılmıştır (Narwade ve ve diğer., 2014).

A.R. Narwade ve arkadaşlarının 2014 yılında yaptıkları çalışmada, döküm hatalarını elemine etmek ve verimi arttırmak amacıyla optimum silindirik besleyici boyutları belirlenmiştir. Döküm benzeşim çalışmaları LM6 alüminyum parçası üzerinde yapılmıştır. Kalıp malzemesi olarak silis kumu kullanılmış olup farklı boyutlarda besleyiciler ile Auto-Cast programı kullanarak döküm benzeşim çalışmaları yapılmıştır. Döküm benzeşim çalışmalarında besleyicisiz olarak katılma davranışı incelenen parçanın sıcak noktaları belirlenmiştir. Belirlenen sıcak noktalara farklı yükseklik ve çapa sahip silindirik besleyiciler konularak döküm parçasının katılma davranışı ve döküm verimi incelenmiştir. Yapılan farklı besleyici tasarım denemelerinde besleyici gömleklerde kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.2’de gösterilmektedir (Narwade ve ve diğer., 2014).

Tablo 3.2 Farklı besleyici tasarımlarından elde edilen sonuçların kıyaslanması (Narwade ve ve diğer., 2014)

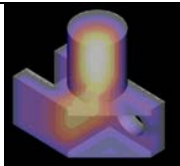
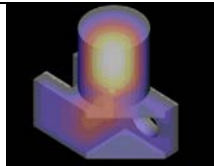
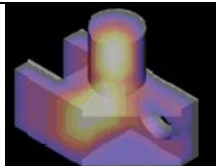
Besleyici boyutu	İlk tasarlanan besleyici	Büyük besleyici	Küçük besleyici
Benzeşim sonucu			
Besleyici ve boyun bölgesi boyutları(mm)	Besleyici(H)=55 Besleyici(D)=48 Boyun Bölgesi(H)=5 Boyun Bölgesi(D)=37	Besleyici(H)=55 Besleyici(D)=74 Boyun(H)=5 Boyun(D)=60	Besleyici(H)=55,28 Besleyici(D)=37,43 Boyun(H)=4,68 Boyun(D)=30,50
Çekinti	Küçük çekinti	Çekinti yok	Büyük çekinti

Verim(%)	62	58	70
----------	----	----	----

Sonuçlar incelendiğinde büyük besleyici (H=55, D=74) kullanılarak gerçekleştirilen tasarımın diğer iki tasarıma göre verimi daha düşüktür. Bununla birlikte büyük besleyici ile yapılan tasarımda döküm parçası çekinti içermemektedir. Yazarlar bu doğrultuda; Tablo 3.2’de büyük besleyici olarak adlandırılan tasarımın optimum tasarım olduğunu belirlemişlerdir (Narwade ve ve diğer., 2014).

Vishal S. Jadhao ve Prof. J.J.Salunke 2014 yılında yapılan çalışmada, döküm benzeşim programı ile döküm veriminin artırılması ve hataların azaltılması için besleyici optimizasyonun önemi vurgulanmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışmada dökme demir malzemesi 3 boyutlu çizilerek döküm benzeşim programına tanıtılmıştır. 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 3.3’de farklı tasarımlardan elde edilen sonuçlar yansıtılmaktadır (Jadhao ve ve diğer., 2014).

Tablo 3.3 Farklı besleyici tasarımlarından elde edilen sonuçların kıyaslanması (Jadhao ve ve diğer., 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

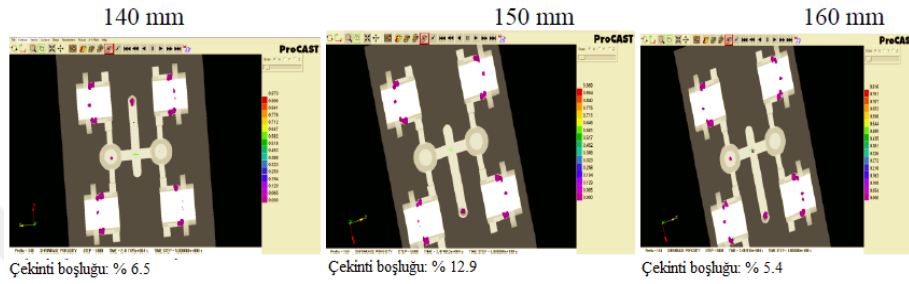
Sonuç	Kabul edilemez	Kabul edilebilir	Besleyici gömlek ile kabul edilebilir
--------------	----------------	------------------	---------------------------------------

Sonuç olarak; büyük besleyici olarak adlandırılan tasarımın diğer iki tasarıma kıyasla döküm verimliliği en düşüktür ve döküm parçası çekinti içermemektedir. Optimum silindirik besleyicinin boyutları $H=112$ mm, $D=60$ mm olarak belirlenmiştir (Jadhao ve ve diğer., 2014).

2011 yılında T. Nandi ve araştırma ekibi tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı besleyici boyutları ile plaka şeklindeki alüminyum parçasının katılaşma davranışı döküm benzeşim programı ile incelenmiştir. Döküm benzeşim programı ile gerçekleştirilen döküm benzeşim çalışmaları sonucunda optimum silindirik besleyici boyutları belirlenmiştir. Yapılan çalışmada; alüminyum plakanın boyutları $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 20\text{mm}$, kalıp boyutları $330\text{mm} \times 330\text{mm}$ olarak belirlenmiştir. Kalıp kumu olarak bentonit bağlayıcılı silis kumu kullanılmıştır. $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 20\text{mm}$ boyutlarına sahip alüminyum plaka için optimum silindirik besleyici boyutları döküm benzeşim programında parçanın katılaşma davranışı incelenerek belirlenmiştir. Geleneksel yöntemle besleyici modül hesapları yapılmıştır ve sonuçların döküm benzeşim programı ile tutarlı olduğu görülmüştür. Bu çalışmalara ek olarak; farklı kalınlıklardaki alüminyum plakalar için optimum silindirik besleyici boyutları bulunmuştur. Döküm benzeşim çalışmaları yapılan deneysel çalışmalarla desteklenmiştir. Döküm sonucunda üretilen alüminyum plakaların çekinti içerip içermediği silindirik besleyici boyutları ile ilişkilendirilmiştir. Yazarlar, LM6 alüminyum plaka için besleyici tasarım katsayısı 1,2 yerine 1,06 alındığında çekinti içermeyen sağlam bir parçanın üretilebileceğini yapılan döküm benzeşim çalışmalarıyla yansıtmışlardır (Nandi ve ve diğer., 2011).

2013 yılında B. J. Chudasama Pro-Cast döküm benzeşim programını kullanarak silindirik besleyici yüksekliğinin(H) ve yolluk yüksekliğinin döküm parçası içerisindeki çekinti miktarına olan etkisini incelemiştir. Araştırmacı, döküm benzeşim programlarından elde ettiği sonuçları deneysel çalışmalardan elde ettiği sonuçlarla karşılaştırmıştır. B. J. Chudasama'nın gerçekleştirdiği çalışmada döküm benzeşim programı ile incelenecek olan parçanın sıcak noktaları belirlenerek besleyici ve döküm

parçasının 3 boyutlu çizimi gerçekleştirilmiştir. 3 boyutlu çizimi gerçekleştirilen döküm parçası ve silindirik besleyiciler döküm benzeşim programına tanıtılmıştır. Kalıp malzemesi olarak döküm benzeşim programında ve deneysel çalışmalarda silis kumu kullanılmıştır. Şekil 3.5’de farklı yüksekliklere sahip silindirik besleyici gömleklerin kullanılması sonucunda çekinti miktarlarının yüzdeleri yansıtılmıştır (Chudasama, 2013).

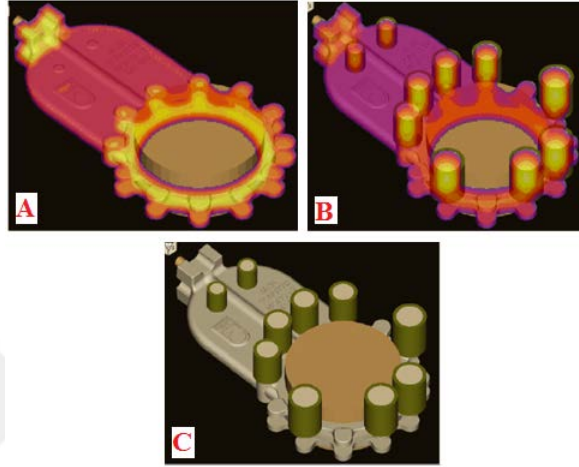


Şekil 3.5 Farklı boyuttaki besleyicilerin kullanılması durumunda çekin sonuçlarının karşılaştırılması (Chudasama, 2013)

Deneysel çalışmalar sonucunda dökümü gerçekleştirilen parçaların çekinti seviyeleri X-Ray yöntemi ile tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda üretilen parçaların çekinti yüzdesi ile döküm benzeşim çalışmaları sonucunda elde edilen çekinti yüzdeleri tutarlıdır. Sonuç olarak; gerçekleştirilen bu çalışmada silindirik besleyici yüksekliği ve yolluk yüksekliği optimize edilerek en düşük çekinti yüzdeleri veren tasarımlar belirlenmiştir (Chudasama, 2013).

L. D. Amin ve çalışma ekibi 2014 yılında endüstriyel alanda kullanılan AISI 430 ferritik paslanmaz çelik malzemesinden üretilen valf parçasını Auto-Cast döküm benzeşim programı ile tasarlayarak hata içermeyecek şekilde sağlam olarak üretimi gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar ilk olarak; besleyici konulması gereken yerleri belirlemek için besleyicisiz olarak döküm parçasının katılaşma davranışını döküm benzeşim programında incelemişlerdir. Şekil 3.6’de gösterildiği gibi döküm benzeşim programında döküm parçasının katılaşması tamamlandıktan sonra sıcak noktalar belirlenerek besleyici konulacak bölgeler tespit edilmiştir. Yazarlar, sıcak noktalara ayrı ayrı tasarımlar olacak şekilde kum ve ekzotermik silindirik besleyiciler koyarak döküm benzeşim çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Auto-Cast döküm benzeşim

programı tarafından hesaplanan optimum silindirik besleyiciler sıcak bölgelere yerleştirilerek döküm parçasının katılaşma davranışı incelenmiştir. Döküm parçasının sağlam olarak üretilebileceği sonucuna varılmıştır. Döküm benzeşim çalışmaları doğrultusunda yapılan tasarıma göre ferritik paslanmaz çelik malzemesi olan valf parçası sağlam olarak üretilmiştir (Amin ve ve diğer., 2014).



Şekil 3.6 a; sıcak bölgelerin belirlenmesi, b; kum besleyici kullanımı, c; besleyici gömlek kullanımı (Amin ve ve diğer., 2014)

A. Gwizdź ve arkadaşlarının 2010 yılında yaptıkları çalışmada, MagmaSoft döküm benzeşim programı kullanarak GS20Mn5 alaşımlı çeliğin katılaşma davranışını incelemişlerdir. Yazarlar hata içermeyen mekanik özellikleri standartlar içerisinde olan parça üretmeyi hedeflemişlerdir. İlk olarak döküm benzeşim çalışmaları sonucunda parça içinde sıcak noktalar tespit edilmiştir. Belirlenen sıcak noktalar, 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 (Gwizdz ve ve diğer., 2010).

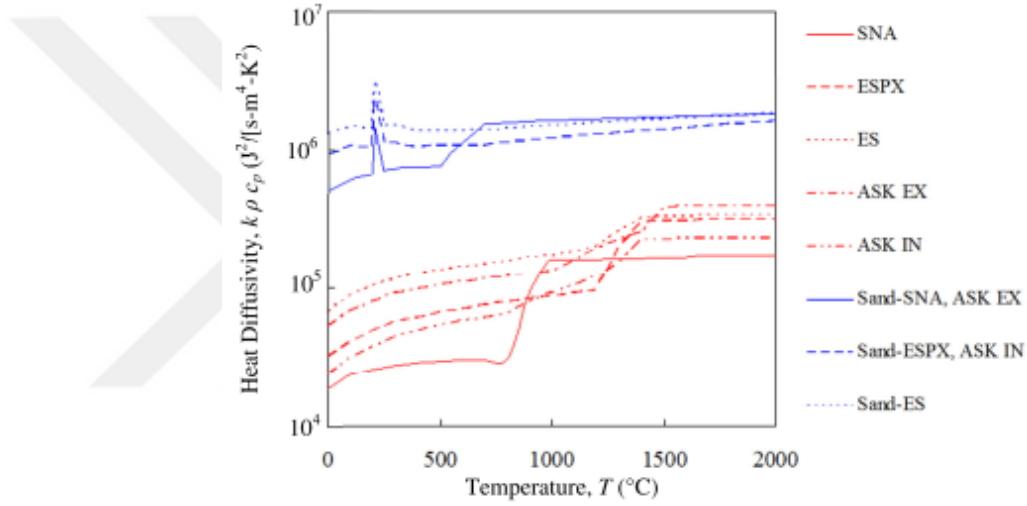
2014 yılında M. Perzyk ve arkadaşları döküm benzeşim programı ile endüstriyel çalışmaların uyumluluğunu karşılaştırarak besleyici etkinliğini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarda levha şekilli AISI 1026 ve AlSi10Mg alaşımlı parçalar üzerinde farklı h/D oranlarına sahip silindirik ve küresel besleyiciler kullanılmıştır. Besleyicilerin h/D oranı 1 ve 1,5 olacak şekilde değiştirilmiştir. Döküm benzeşim

alışmalarında NovaCast programı kullanılmıştır. Döküm benzeşim çalışmaları sonucunda elde edilen görüntüleri bakarak çekinti oluşumunun parça içinde olup olmadığı incelenmiştir. Parça içinde çekinti oluşumunu elimine etmek amacıyla besleyici boyutları arttırılmıştır. Döküm benzeşim çalışmalarındaki çekinti ve besleyici verimlilikleri, gerçekte dökümü yapılan alaşımların çekinti ve besleyici verimlilikleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalara ek olarak silindirik ve küresel besleyicilerin verimlilikleri literatür çalışmaları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak; döküm benzeşim programı verilerine göre hesaplanan besleyici verimlilik değeriinin literatür çalışmalarında verilen değeriinden daha yüksek olduğu yansıtılmıştır (Perzyk ve diğeri., 2014).

2015 yılında M. Perzyk ve arkadaşları NovaCast döküm benzeşim programı kullanarak farklı kalıp tasarımlarının çekinti oluşumuna etkisi incelenmişlerdir. Döküm benzeşim çalışmalarında, farklı boyutlarda levha ve boru şekline sahip karbon eliğı ve gri dökme demir alaşımı seçilmiştir. Kalıp kumu olarak yaş kum ile furan esaslı silis kumu kullanılmıştır. Yapılan çalışmada farklı kalıp tasarımları denenmiştir. Yapılan kalıp tasarımlarında; boyun bölgesi boyutlarının ve ekzotermik besleyici gömlek adetinin değeriştirilmesi ile farklı h/D oranına sahip besleyici kullanımının çekinti oluşumuna etkisi döküm benzeşim sonuçları incelenerek yorumlanmıştır. Kalıp tasarımları değeriştirilmeden döküm benzeşim çalışmalarının gerçekleştirilmesi sonucunda farklı alaşımların kullanılması ile farklı çekinti görüntülerinin görüldüğü belirtilmiştir. Aynı alaşımın farklı kalıp kumları kullanılarak yapılan çalışmada çekinti görüntülerinin benzer olduğu görülmüştür. Besleyici ile döküm parçası arasındaki boyun bölgesinin boyutları değeriştirilerek gri dökme demirlerde çekinti oluşumu görülmemiştir. Gri dökme demirlerde boyun bölgesinin boyutunun arttırılması sonucunda çekinti oluşumunun besleyiciye doğru yöneleceğı belirtilmiştir (Perzyk ve diğeri., 2015).

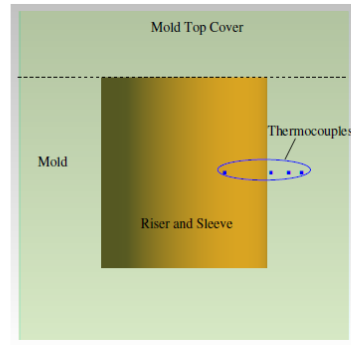
3.5 Besleyici Gömleklerin Tasarım ve Seçim Parametreleri ile Benzeşim Uygulamaları

Thomas J. Williams ve arkadaşları 2014 yılında yayınladıkları çalışmalarında 2 farklı üreticiye ait 5 farklı besleyici gömleğini, benzeşim ve deneme dökümleri ile karşılaştırmalarını yapmışlardır. Magmasoft döküm benzeşim programı üzerinde deneme yanılma yöntemi ile deneme dökümlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Deneme dökümleri sadece gömlekler kalıplanarak yapılmıştır. Gömlek içerisindeki metale, gömleğe ve kuma yerleştirilen termal çiftler ile sıcaklık ölçümleri yapılmışlar ve sonuçlar benzeşim sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Aynı zamanda gömlek yoğunluğu (ρ), ısı iletim (k), özgül ısı (c_p) ve kum kontrol ölçümlerine bağlı olarak ısı geçirgenlik eğrileri elde edilmiştir (Şekil 3.7) (Thomas ve ve diğer., 2014).

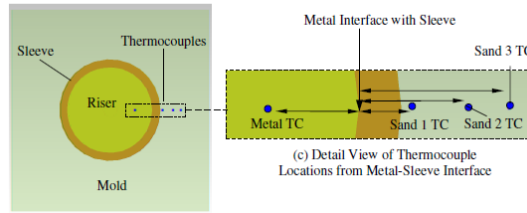


Şekil 3.7 Farklı gömleklere ait ısı geçirgenlik eğrileri (Thomas ve ve diğer., 2014)

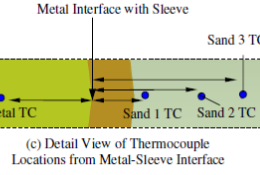
2013 yılında R. A. Hardin ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, döküm sırasında ölçülen sıcaklık değerleri doğrultusunda besleyici gömleklerin soğuma davranışını ve termofiziksel özellikleri yansıtılmıştır. Araştırmacılar, kum besleyici kullanarak yapılan deneysel çalışmayı referans döküm olarak kabul etmişlerdir. Şekil 3.8’de besleyici gömlekler için sıcaklık ölçümü alınan bölgeler gösterilmektedir. Döküm çalışmalarında, çelik metalin sıcaklığını ölçmek için B-tipi termal çift, kalıp kumundan sıcaklık verileri almak için K-tipi termal çift kullanılmıştır. Besleyici gömleklerin performansı referans dökümle karşılaştırılarak yansıtılmıştır. Tablo 3.4’de 4 farklı tasarım parametreleri yansıtılmaktadır (Hardin ve ve diğer., 2013).



(a) Side View of Sleeve Experiment



(b) Top View of Sleeve Experiment



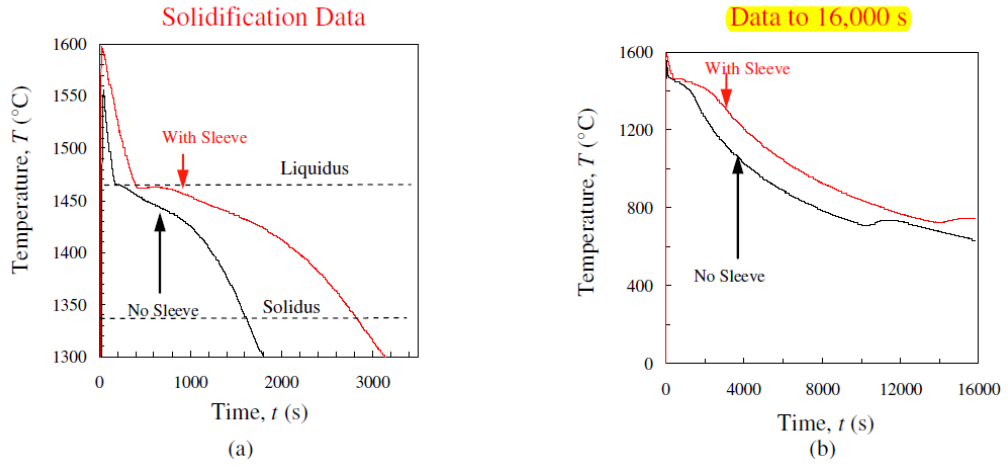
(c) Detail View of Thermocouple Locations from Metal-Sleeve Interface

Şekil 3.8 Besleyici gömlelerde termal çiftlerin yerleştirilmesi a) yan görünüş, b) üst görünüş, c) kalıp kesiti (Hardin ve ve diğer., 2013)

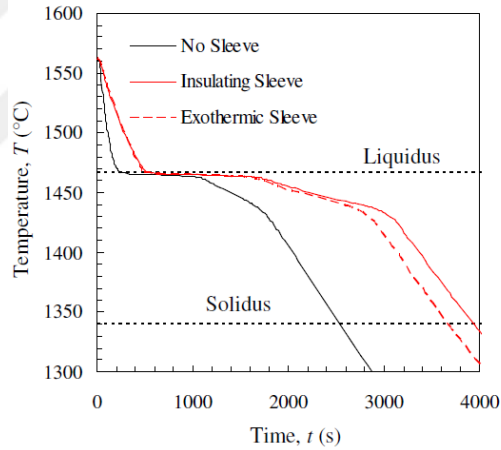
Tablo 3.4 Besleyici gömlek parametreleri (Hardin ve ve diğer., 2013)

Experiment Casting #	Sleeve Type	Riser Diameter (in)	Sleeve Height (in)	Sleeve Thickness Measured (mm)	Thermocouple Distance from Metal Interface (mm)			
					Steel TC	Sand 1 TC	Sand 2 TC	Sand 3 TC
1	No Sleeve	6	8		18	13	36	
2	Kalmin 70	2.5	6	10	20	16	33	46
3	Kalminex 2000	3.5	6	14	24	18	35	51
4	Kalminex 2000	6	8	15	26	18	36	51

Döküm uygulaması için alaşımsız karbon çeliği alaşımını seçmişlerdir. Kalıp kumu olarak %1,25 pepset bağlayıcılı silis kumu seçilmiştir. Gerçekleştirilen farklı tasarımlarda termal çiftlerin sıcaklık ölçümleri ile besleyici gömleklerin katılma eğrisi incelenmiştir. 4 Nolu tasarımın katılma eğrisi Şekil 3.9’de gösterilmektedir. Farklı özellikte besleyici gömlekler kullanılarak yapılan döküm çalışmalarından elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 3.10’te gösterilmektedir (Hardin ve ve diğer., 2013)

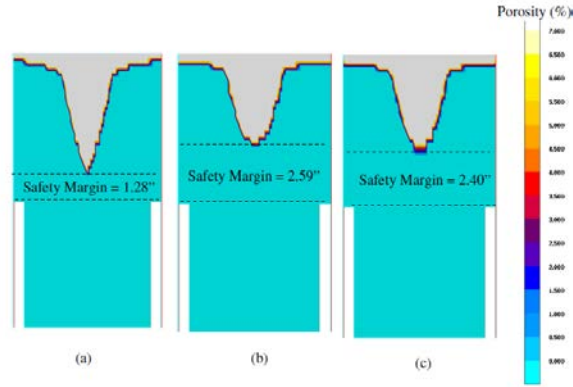


Şekil 3.9 a) Besleyici gömlekli ve gömleksiz soğuma eğrisi, b) sıcaklık ölçüm değerleri 16.000 saniyeye kadar; kırmızı çizgi besleyici gömlek kullanılan tasarımı, siyah çizgi referans tasarımı nitelemektedir (Hardin ve diğ., 2013)



Şekil 3.10 Farklı besleyici gömleklerin kullanılması sonucunda metalin katılaşma davranışı (Hardin ve diğ., 2013)

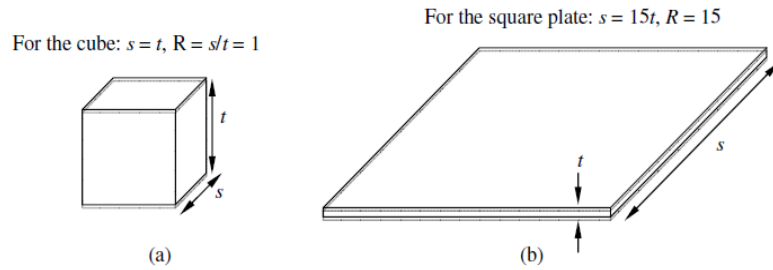
Şekil 3.10 incelendiğinde yalıtım özellikli gömlek kullanılarak gerçekleştirilen tasarımın, ekzotermik özellikli ve besleyici gömlek kullanılmadan gerçekleştirilen tasarımlara göre, döküm parçasının daha geç katılaşmasını sağladığı görülmektedir. Besleyici gömleksiz, ekzotermik esaslı besleyici gömlek kullanılan ve yalıtım özellikli besleyici gömlek kullanılarak yapılan üç farklı tasarım için ön görülen çekinti miktarları Şekil 3.11’de gösterilmektedir (Hardin ve diğ., 2013).



Şekil 3.11 a)besleyici gömlek kullanılmadan, b)yalıtım özellikli gömlek kullanılan, c)ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılan kalıp tasarımlarının benzeşim sonuçları (küpün bir kenarı 15cm) (Hardin ve ve diğer., 2013)

Şekil 3.11’de görüldüğü gibi yalıtım esaslı gömleğin emniyet marjı, ekzotermik esaslı besleyici gömleğin emniyet marjından çok az daha büyüktür. Çekinti görünümleri kıyaslandığında en iyi sonucun yalıtım esaslı gömlek kullanılması ile elde edildiği görülmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmalara ek olarak araştırmacılar, döküm tasarımında kullanılan ekzotermik ve yalıtım özellikli besleyici gömleklerin küp ve levha şekline sahip döküm parçalarındaki döküm verimine etkisi incelemiştir. Ekzotermik ve yalıtım özellikli besleyici gömleklerin işlevi karşılaştırılmıştır. Farklı besleyici gömleklerin kullanılması ile gerçekleştirilen tasarımların döküm verimlilikleri birbirlerine yakındır. Şekil 3.12’te parça şekline ait geometrik parametreler gösterilmektedir. (Hardin ve ve diğer., 2013).

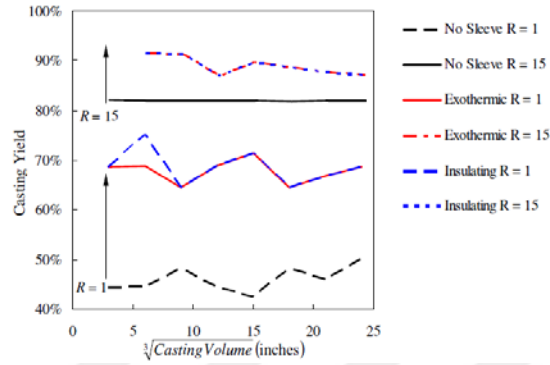
Tablo 3.5’te boyutsal veriler yansıtılmıştır. Şekil 3.13’da deney sonuçları gösterilmektedir (Hardin ve ve diğer., 2013).



Şekil 3.12 a)küp şekilli ve b)levha şekilli döküm parçalarının boyutları (Hardin ve ve diğer., 2013)

Tablo 3.5 Döküm benzeşim çalışmalarında kullanılan boyutlar (Hardin ve ve diğer., 2013)

Simulation Cases										
Rangeiness	Shape	Dimensions	Lengths (in)							
1	Cube	s	3	6	9	12	15	18	21	24
15	Square Plate	s	7.5	15	22.5	30	37.5	45	52.5	60
		t	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4



Şekil 3.13 Farklı besleyiciler kullanılan döküm çalışmalarında döküm veriminin döküm hacmi ile değişimi (Hardin ve ve diğer., 2013)

Şekil 3.13 incelendiğinde besleyicisiz gerçekleştirilen uygulamalarda küp dökümler için döküm verimi %45 iken, plaka dökümler için döküm verimi %80 civarındadır. Araştırmacılar, küp ve plaka parçaların döküm verimliliğinin farklı olmasının nedenini küp dökümün daha yüksek modüle sahip olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ekzotermik ve yalıtım esaslı gömlekler ile gerçekleştirilen uygulama sonucunda; gömleklerin döküm parçasının verimine olan etkisi benzerdir. Ancak Şekil 3.13 göstermektedir ki şekil boyutu arttıkça verimlilik artmaktadır (Hardin ve ve diğer., , 2013).

T.J. Williams ve arkadaşlarının 2014 yılında yaptıkları çalışmada döküm benzeşim programında kullanılan yalıtım ve ekzotermik esaslı besleyici gömleklerin ısı iletim katsayısı, yoğunluk, ısı kapasitesi gibi termo-fiziksel özelliklerini belirlemişlerdir. Yapılan çalışmada deneme dökümleri yapılarak sıcaklık ölçümleri termal çiftler yardımıyla 3 farklı bölgeden(döküm parçası, besleyici gömlek, kalıp kumu) ölçülmüştür. Deneme dökümlerinde 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. Deneme dökümlerinde 1020 karbon

çeliği tercih edilmiştir. Döküm kumu olarak silis kumu kullanılmıştır. Yapılan çalışmada her besleyici gömlek için kontrol grubu belirlenmiştir. Kontrol gruplarında besleyici gömlek kullanılmamıştır. 1020 çeliğinin sıcaklığa bağlı özellikleri incelendiğinde; 700°C-800°C sıcaklık aralığında ısı kapasitesinin 6000 j/kg.K olduğu, ısı iletim katsayısının 500°C'ye kadar 40 W/m.K, 1500°C'de 150 W/m.K değerlerine çıktığı görülmüştür. Isı iletim katsayısı değerleri incelendiğinde metalin ergimesi sırasında ısı iletim katsayısının artışı görülmektedir. Yoğunluk değişimi incelendiğinde sıcaklık artışı ile birlikte 7800 kg/m³ değerinden parabolik olarak azaldığı belirtilmiştir. Kalıp tasarımında kullanılan kumun özellikleri incelendiğinde; ısı iletim katsayısı 700 j/kg.K değerinden başlayıp 300°C'de 2000 j/kg.K değerine çıktığı ve ardından sıcaklığın artmasıyla 700 j/kg.K değerinde sabit olarak kaldığı görülmüştür. Kum yoğunluğunun sıcaklığın artması ile iki kademeli doğrusal eğri şeklinde 1460 kg/m³ değerinden 1380 kg/m³ değerine kadar azalmıştır. Deneysel çalışmalarda ölçülen sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği incelendiğinde; kontrol dökümlere kıyasla besleyici gömlekleri ile yapılan dökümlerde ölçülen sıcaklık değerleri daha yüksek olduğu ve kontrol dökümlerin daha kısa sürede katılaştığı görülmüştür. Kontrol dökümlerde döküm parçasından ölçülen sıcaklık değerleri ile döküm benzeşim programında ölçülen sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında, 1400 saniyeye kadar döküm parçasından ölçülen sıcaklık değerlerinin döküm benzeşim programına kıyasla daha yüksek değerlerde olduğu ve daha uzun sürede azaldığı görülmüştür. Kontrol döküm olarak adlandırılan döküm uygulamasında döküm kumundan alınan sıcaklık ölçümleri ile döküm benzeşim programında ölçülen sıcaklık değeri karşılaştırıldığında, döküm benzeşim programında ölçülen sıcaklık değerinin deneysel uygulama ölçülen sıcaklık değerinin daha 20-25°C daha fazla olduğu ve en yüksek 1500 sn'de 600°C olduğu görülmüştür. Besleyici gömleklerin termofiziksel değerleri belirlenmiştir. Yapılan çalışmada besleyici gömleklerin termofiziksel özelliklerin önemi üzerinde durulmuştur. 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. Yapılan döküm benzeşim çalışmaları sonucunda besleyici gömleklerin ısı kapasitesinin döküm benzeşim sonuçlarını çok etkilemediği

belirtilmiştir. Deneysel çalışmalarda ölçülen sıcaklık değerleri ile döküm benzeşim programında ölçülen besleyici gömleklerin sıcaklık değerlerinin uyumlu olması ısı iletim katsayı değerinin önemini yansıttığı belirtilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan bütün besleyici gömleklerin termofiziksel özelliklerini belirlemek için termal difüzyon testi yapılmıştır. Düşük termal difüzyonite değerine sahip besleyici gömleklerin düşük ısı yayılımı yapacağı bilgi olarak belirtilmiştir. Besleyici gömleklerin et kalınlık değerlerinin besleyicilerin performansını etkileyen önemli parametrelerden biri olduğu belirtilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan besleyici gömlekler ile döküm kumlarına termal difüzyonite testi yapılmıştır. Bu test sonucunda farklı besleyici gömleklerin yanma sıcaklıkları, yanma süreleri, ısı değerleri hesaplanmıştır. Döküm uygulamalarında besleyici gömleklerden ölçülen sıcaklık değerleri ile döküm benzeşim programında ölçülen sıcaklık değerlerinin uyumlu olduğu görülmüştür. Yazarlara göre döküm kumundan ölçülen sıcaklık değerlerinin döküm benzeşim programında ölçülen sıcaklık değerlerinden farklı olmasının nedeni; döküm kumunda gaz boşluklarının oluşması şeklinde ifade edilmiştir. Oluşan gaz boşluklarının ısı iletimine etki ettiği düşünülmektedir. Ancak yazarlar, besleyici gömlek içinde oluşan gaz kabarcıklarının döküm kumuna geçmesi halinde besleyici gömleğin işlevini etkilemeyeceğini düşünmektedir. Yapılan bu çalışma göstermektedir ki; endüstride kullanılan besleyici gömleklerin termofiziksel özellikleri belirlenerek döküm benzeşim programına tanıtılması sonucun döküm tasarımı aşamasında yapılacak olan döküm benzeşim uygulamaların doğruluğunu artırarak yapılacak olan uygulamayı bilgisayar ortamında test etmeye olanak sağlayacaktır. Bunun sonucunda yapılan döküm benzeşim çalışmaları ile deneysel uygulamaların birbiri ile uyumluluğu artacaktır ve olası hatalı dökümlerin önüne geçilmesi söz konusu olacaktır (Thomas ve diğ., 2014).

2010 yılında W. K. Krajewski ve ekibi, plaka şekline sahip 1040 çeliği dökümünde kalıp yardımcı malzemesi olarak kullanılan yalıtım karakterli besleyici gömleğin termo-fiziksel özelliklerini hesaplamışlardır. Kalıp tasarımında termal çiftler yardımıyla 6 farklı yerden sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Farklı bölgelerden alınan sıcaklık ölçümlerinin zamana bağlı değişimi yansıtılmıştır. Ölçülen sıcaklık değerleri ile 1040 çeliğinin termo-fiziksel özellikleri kullanılarak termal difüzyon katsayısı

hesaplanmıştır. Termal difüzyon katsayısı, yoğunluk ve ısı iletim katsayısı değerleri kullanılarak yalıtım esaslı besleyicinin ısı kapasitesi hesaplanmıştır. Yalıtım esaslı besleyici gömleğin ısı iletim katsayı ve ısı kapasitesi sırasıyla; 0,85 W/m.K, 990 j/kg.K bulunmuştur.

2008 P.K. Sandell'in yazdığı makalede besleme mesafesi, termal gradyant, niyama kriteri kavramlarını açıklayarak hatalı olarak üretimi gerçekleştirilen sade karbon çelik alaşımına sahip mil parçası üzerinde çekinti oluşumunu azaltmaya yönelik çalışmayı yansıtmıştır. Yapılan çalışmada, kum besleyici ve ekzotermik besleyici kullanımının termal gradyanta etkisi vurgulanarak çekinti oluşumu üzerinde açıklamalar yapılmıştır. Yapılan denemelerin sonuçları incelendiğinde ekzotermik besleyici kullanılarak yapılan döküm çalışması sonucunda döküm parçası sağlam olarak üretilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen döküm parçası X-kırınım yöntemi ile kontrol edilmesi sonucunda çekinti seviyesinin 1 olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, katılaşma prensipleri detaylı olarak açıklanarak besleyici gömlek kullanımı sonucunda besleme mesafesinin arttığı ve merkez çekinti hatalarının önlendiği yansıtılmıştır (Sandell, 2008).

BÖLÜM DÖRT

MATERYAL VE YÖNTEM

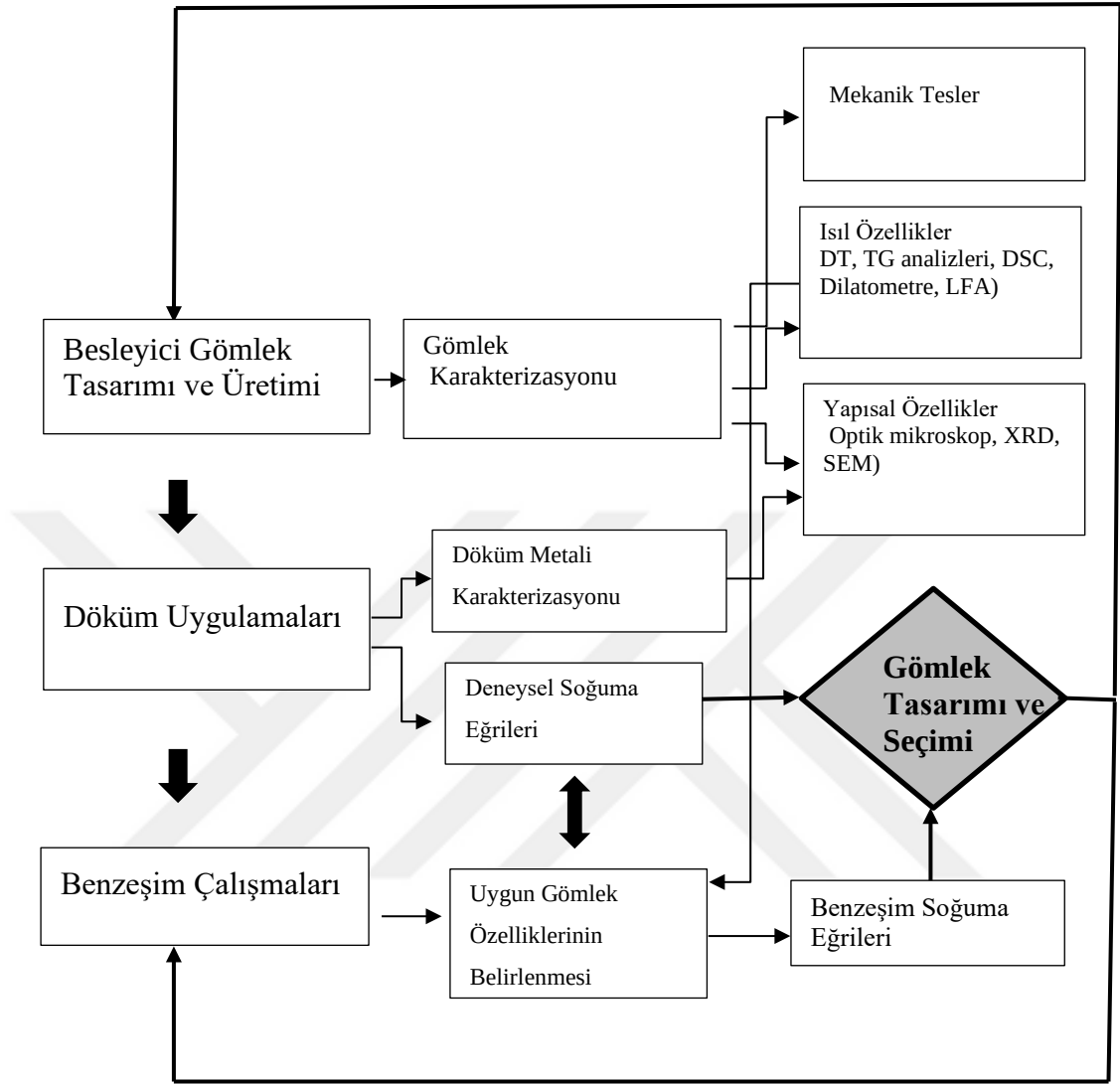
Tez çalışmaları kapsamında döküm sanayinde oldukça sık kullanılan besleyici gömleklerine yönelik olarak yeni nesil ön şekillendirilmiş besleyici gömleklerin bileşimsel ve geometrik tasarımı, optimizasyonu ve üretimi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda tasarımı yapılan besleyici gömlekleri Çukurova Kimya Endüstrisi A.Ş. Ar-Ge laboratuvarlarında üretilmiştir.

Üretilen besleyici gömleklerinin yapısal ve ısı özellikleri belirlenerek döküm uygulamaları ile gömleklerin metal katılaşma sürecine ve katılaşma sonrası metal yapısına etkileri incelenmiştir. Çalışmalarda izlenen yol ve uygulanan yöntemler Şekil 4.1’de verilmiştir.

Besleyici gömlekler, ısı verme ve yalıtım özelliklerini bir ara bulunduran kompozit malzemelerden üretilmektedir. Gömleklerin ısı verme özellikleri test edilirken yalıtım özelliği, yalıtım özellikleri test edilirken ısı verme özelliklerini göz ardı eden geleneksel test yöntemleri ile analiz edilmesi zordur. Bu nedenle test cihazları ile elde edilen bulguların döküm uygulama çalışmaları ile doğrulanması gerekir. Enstrümantal analiz çalışmalarından ve döküm uygulamalarından elde edilen bulgular benzeşim programı ile sanal ortam uygulamalarının gerçekliğe yakınlığının irdelenmesinde kullanılmıştır.

4.1 Malzemeler ve Numuneler

Tez çalışmalarında esas olarak tasarımı ve üretimi yapılan farklı özelliklerdeki besleyici gömlekler ile besleme performansının incelendiği döküm uygulamalarında kullanılan metaller olmak üzere iki farklı malzeme türü söz konusudur. Besleyici gömlekler bileşimi ve özelliklerine göre dört farklı karışımdan hazırlanmıştır. Döküm uygulamalarında küresel grafitli dökme demir, alaşımsız karbon çeliği, yüksek manganlı çelik ve paslanmaz çelik döküm metali olarak kullanılmıştır.



Şekil 4.1 Deneysel çalışmalarda izlenen süreçler

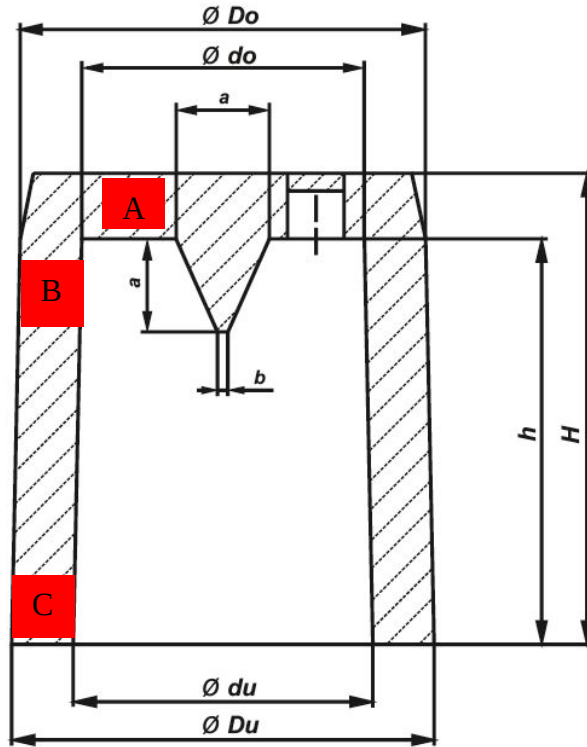
4.1.1 Besleyici Gömleklerin Bileşim Tasarımı

Deneysel ve benzeşim çalışmalarında kapalı silindirik besleyici gömlekler üzerinden gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2, Tablo 4.2). Tüm besleyici gömleklerin hazırlanmasında bağlayıcı olarak fenolik reçine, oksitleyici olarak demir oksit ve mangan oksit, ekzotermik eleman olarak toz alüminyum kullanılmıştır. Gömlek karışımı olarak orta ve yüksek ekzotermik olarak bilinen karışımlar kullanılmıştır. Döküm metaline ve çevreye etkileri bilinen flor içeriği fazla olan ateşleyicilerle karşılaştırmak üzere baryum içeren ateşleyiciler kullanılmıştır. Ayrıca yalıtım elemanı olarak kısa ve kalın fiberlerden oluşan alüminyum silikat (bundan sonra “fiber” olarak

anılacaktır) ve tozuma oranının daha az olduğu bilinen biyoçözünür uzun ve ince fiber (bundan sonra “yün” olarak anılacaktır) yapısına sahip kalsiyum silikatlar kullanılmıştır. Yapılan çalışmaların sonuçlarının karşılaştırılmasında kullanılan gömlek karışımlarının içerikleri ve özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Gömlek içerikleri ve bazı özellikleri

Karışımlar	Yalıtım Elemanı Tipi	Ekzotermik Elemanı Oranı	Ateşleyici Tipi	Yoğunluk (g/cm ³)	Ekzotermik Karakteri
Karışım 1	Yün	% 15-18	Baryum esaslı	0,623	Orta
Karışım 2	Fiber	%15-18	Flor esaslı	0,625	Orta
Karışım 3	Fiber	%20-24	Flor esaslı	0,558	Yüksek
Karışım 4	Yün	%20-24	Baryum esaslı	0,617	Yüksek



Şekil 4.2 DT-TGA analizlerinin için numune çıkarılan kapalı besleyici gömlek ve numunelerin alındığı kısımlar(A,B,C)

Tablo 4.2 Döküm uygulamalarında kullanılan besleyici gömleklerin modül ve boyutları

Gömlek TİPİ	MODÜL (cm)		BOYUTLAR (mm)					
	Isıl	Geometrik	du	Du	Do	Do	h	H
KGDD Döküm uygulaması	3,20	2,00	118,00	154,50	112,00	148,00	130,00	150,00
Çelik Döküm uygulaması	2,50	1,55	89,00	115,00	81,00	110,00	104,50	120,00

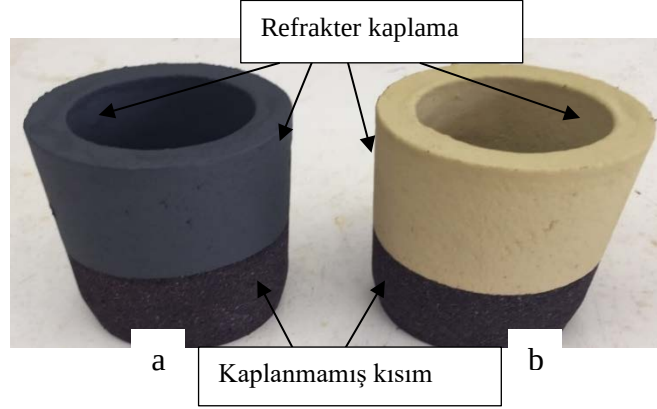
4.1.2 Besleyici Gömleklerin Geometrik Tasarımı

Yapılan çalışmalarda piyasada mevcut ürünlerden ve literatürde bahsedilen besleyici gömlek tasarımlarından tamamen farklı geometrik tasarımlar geliştirilerek gerçekleştirilmiştir. Besleyici gömleklerde bileşim tasarımı dışında geometrik tasarımlar da yapılmıştır.

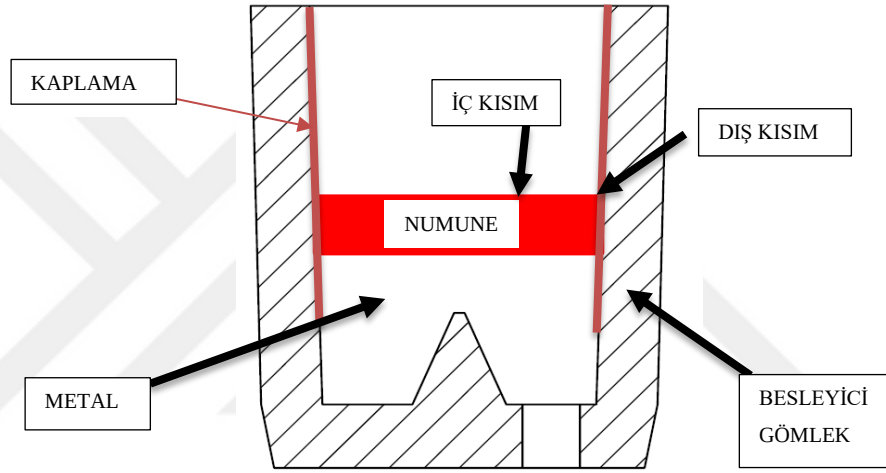
Tasarlanan gömlek sistemi Manisa Celal Bayar Üniversitesi Deneysel Fen Bilimleri Araştırma ve Uygulama Merkezi laboratuvarlarında Shimadzu AGX 300kN Ünlversal test cihazı ile basma testleri uygulanmıştır. Testlerden sonra besleyici gömlek sistemi yüksek basınç otomatik yaş kum kalıplama sisteminde döküm uygulaması yapılmıştır.

4.1.3 Besleyici Gömleklerin Döküm Metali ile Etkileşim Tasarımı

4.2.2 Döküm Metalinin Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi” aşamasında yüksek ekzotermik özellikli lif bazlı gömleklerin küresel grafitli dökme demir alaşımlarında mikro yapıyı etkilediği görüldüğünden etkileşim tasarımı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bileşimi Çukurova Kimya Endüstrisi A.Ş. tarafından gizli tutulan yalıtım ve ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin iç ve dış yüzeyine, yine bileşimi Çukurova Kimya Endüstrisi A.Ş. tarafından gizli tutulan grafit ve zirkon bazlı refrakter özelliği yüksek kaplamalar değişik yöntemler kullanılarak uygulanmıştır (Şekil 4.6). Kaplama uygulaması ile metal besleyici gömlek etkileşiminin en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Kaplama uygulaması yapılmış gömleklerde metal-gömlek etkileşiminin mikroyapı üzerinde etkileri inlemek amacıyla Şekil 4.7’deki numunelere Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında OLYMPUS GX51 optik mikroskop incelemesi yapılmıştır.



Şekil 4.3 a) grafit bazlı, b) zirkon bazlı refrakter kaplama ile kaplanmış besleyici gömlek (Kişisel arşiv, 2019)



Şekil 4.4 Kaplama uygulaması yapılmış gömleklerden numune çıkartılan bölgeler

4.1.4 Döküm Alaşımları

Döküm uygulamaları ile besleyici gömlek özelliklerinin karşılaştırılmasında 4 farklı alaşım kullanılmıştır. Küresel grafitli dökme demir döküm uygulamasında metal alaşımı olarak kimyasal bileşimi Tablo 4.3’de verilen, EN GJS-500 (ISO) standardına sahip alaşım tercih edilmiştir. EN-GJS-500 döküm uygulaması çalışmalarında karşılaştırmalı ölçümler alabilmek amacıyla Tablo 4.1’de belirtilen Karışım 1 ve Karışım 2 bileşimine sahip olan besleyici gömlekler birlikte, Karışım 3 ve Karışım 4 bileşimine sahip olan besleyici gömlekler birlikte kullanılmıştır. Böylece yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlekler ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin kendi aralarından karşılaştırmaları yapılmıştır. Döküm uygulamaları Medöksan Metal Döküm Sanayi ve Tic.Ltd.Şti’inde yapılmıştır.

Çelik alaşımları deneme dökümlerinde; GS-60 çeliği, düşük alaşımlı çelik (AISI 4130), östenitik mangan çeliği (ASTM-A128M-A93A, ASTM-A128M-A93-C) ve paslanmaz çelik (AISI 316) olmak üzere 4 farklı döküm alaşımı tercih edilmiştir. Döküm uygulamaları Derman Döküm Yedek Parça İmalat Ltd.Şti.'de ve Pınar Döküm A.Ş.'de gerçekleştirilmiştir. GS-60 alaşımlı çelikten 1 adet, diğer alaşımlardan ise 2'şer adet olmak üzere 7 adet çelik döküm uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.3 Döküm uygulamalarında KGDD kimyasal kompozisyonu (% ağırlık)

		C (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Mg (%)	Mn (%)	Cr (%)
YÜKSEK	1. Döküm	3,41	2,52	0,023	0,060	0,043	0,195	0,044
	2. Döküm	3,69	2,56	0,010	0,061	0,053	0,205	0,038
	3. Döküm	3,66	2,51	0,018	0,057	0,049	0,194	0,036
ORTA	4. Döküm	3,60	2,66	0,023	0,027	0,050	0,439	0,086
	5. Döküm	3,69	2,62	0,021	0,029	0,047	0,428	0,084
	6. Döküm	3,71	2,58	0,018	0,031	0,044	0,420	0,073
		Ni (%)	Mo (%)	V (%)	Cu (%)	Sn (%)	Ce (%)	Al (%)
YÜKSEK	1. Döküm	0,007	0,011	0,008	0,052	0,002	0,004	0,019
	2. Döküm	0,009	0,013	0,010	0,012	<0,001	0,001	0,016
	3. Döküm	0,005	0,005	0,008	0,028	<0,001	0,002	0,017
ORTA	4. Döküm	0,012	0,001	0,012	0,013	0,002	<0,001	0,017
	5. Döküm	0,010	<0,001	0,010	0,016	0,003	<0,001	0,012
	6. Döküm	0,009	<0,001	0,012	0,020	0,005	<0,001	0,014

Döküm uygulamalarında kullanılan farklı alaşımların kimyasal bileşimleri ilk olarak döküm yapılan firmada belirlenmiştir.

Tablo 4.4'de pota numunelerinin analiz sonuçları gösterilmektedir. Kimyasal analiz sonuçları belirlenmesinde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Deneysel Fen Bilimleri Araştırma ve Uygulama Merkezi laboratuvarlarında Bruker,Q4 TASMAN CCD

(Charge Coupled Device)Based Optical Emission Spectrometer marka cihaz kullanılmıştır.

Tablo 4.4 Döküm uygulamalarında KGDD kimyasal kompozisyonu (% ağırlık)

Alaşım	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)	Al (%)	Ti (%)	S (%)	P (%)
GS-60	0,4	0,36	0,66	0,13	0,02	0,07	0,027		0,02	0,02
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- A93-A-1	1,15	0,35	10,50	0,2	-	0,010	0,020	-	0,010	0,022
A128M- A93-B-3	1,14	0,69	13,2	0,81	-	0,139	0,006	-	0,029	0,031
AISI 316-1	0,06	1,17	1,108	18,8	2,26	9,71	0,009	0,001	0,005	0,038
AISI 316-2	0,04	1,10	1,098	18,85	2,24	9,61	0,013	<0,00 1	0,005	0,030

4.2 Yapısal İncelemeleri

Besleyici gömleklerin içeriğin kullanılan hammaddelerin dağılımını ve yapıdaki durumunu belirlemek için yapısal incelemeler yapılmıştır. Özellikle farklı yalıtım elemanı kullanılan gömleklerdeki yapısal farklar ortaya konmuştur.

Döküm metalleri üzerinde yapılan yapısal incelemelerde gömleklerin döküm metalinin yapısı üzerine etkisi incelenmiştir. Gömlek ve metal arasındaki etkileşimin metal yapısı üzerinde oluşturduğu değişiklikler ortaya konmuştur.

4.2.1 Gömleklerin Yapısal İncelemeleri

Bileşiminde y n ve fiber kullanılan besleyici gömleklerden Şekil 4.2 A bölgesinden çıkarılan 10x10x10 mm boyutlarında numunelerde Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında Zeiss SteREO Discovery.V12 stereo mikroskop incelenmiştir. İncelemeler 12x büyütmede yapılmıştır. Yapı içerisinde dağılan bileşenlerin durumu ve farkları ortaya konmuştur.

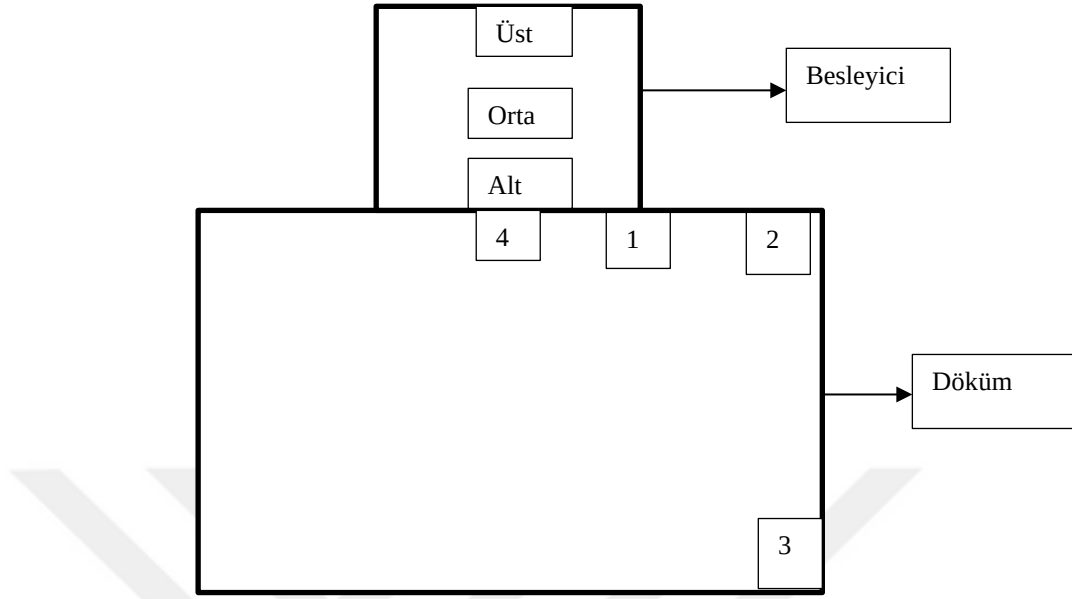
Optik incelemeler için çıkarılan numunelere İzmir Katip  elebi Üniversitesi Merkez laboratuvarlarında Carl Zeiss 300VP SEM cihazı ile yapısal incelemelere devam edilmiştir. Gömlek içeriği ikincil elektron görüntüleme modunda incelenmiştir. Ayrıca numunede belirli bölgelerden EDS alınarak elementel dağılım belirlenmiştir. EDS analizi ile gömlek içeriğinde kullanılan hammaddeler doğrulanmıştır.

Döküm uygulamaları gerçekleştirilen besleyici gömleklerden döküm öncesinde ve sonrasında numuneler çıkarılarak Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında Rigaku D Max 2200 X ışınları kırınım cihazında analiz edilmiştir. Elde edilen kırınım desenleri karşılaştırılarak reaksiyon öncesi ve sonrası faz farklılıkları incelenmiştir.

4.2.2 Döküm Metalinin Yapısal  zelliklerinin Belirlenmesi

Karakterizasyon testlerinden sonra besleyici gömlekler “4.4 Döküm uygulaması çalışmaları”nda belirtilen kalıp tasarımıda kullanılmıştır. Deneme dökümleri tamamlandıktan sonra döküm parçalar ve besleyiciden Şekil 4.2’de belirtilen bölgelerden numuneler çıkarılarak incelenmiştir. Numunelerde Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında OLYMPUS GX51 optik mikroskop ile farklı büyütmelerde metalografik incelemeler gerçekleştirilmiştir. Toplamda 400’e yakın fotoğraf çekilmiş, bölgeleri en iyi temsil eden mikro yapı sonuçları kısmında verilmiştir. Ayrıca belirlenen bölgelerdeki metalik numunelerde besleyici gömlekten kaynaklanabilecek kimyasal etkileşimin izlerini

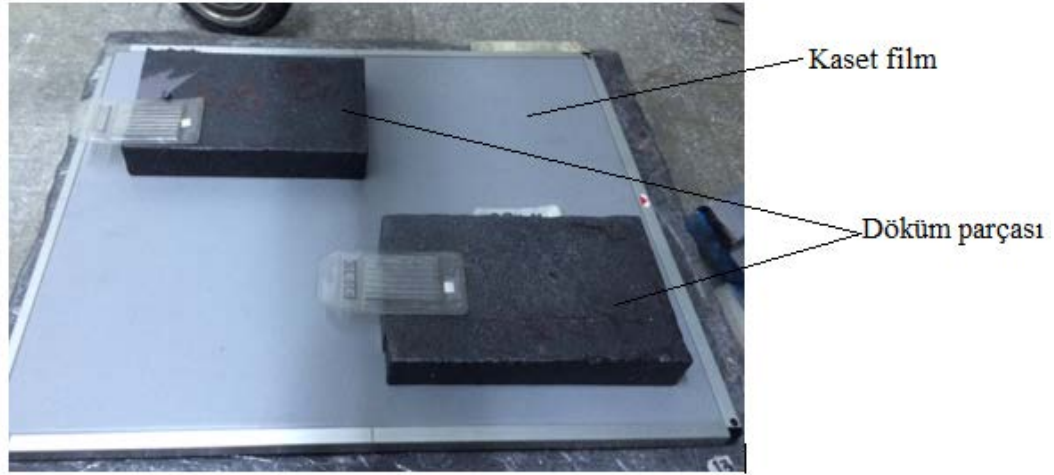
incelemek için Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında JEOL JSM 6500 SEM ve EDS analizleri yapılmıştır.



Şekil 4.5 Döküm parçası ve besleyiciden numune çıkartılan bölgeler

Döküm sonrasında parçada meydana gelen çekintiler tahribatsız muayene yöntemlerinden radyografi analizi ile yapılmıştır. Radyografik muayene Kodak Industrex HPC-1 cihazında X veya gama ışınları kullanılarak malzeme içindeki süreksizliklerin görüntüsünün bir röntgen filmi üzerine aktarılmasıyla gerçekleştirilen bir tahribatsız muayene yöntemidir. Radyasyon kaynağı ile film arasına 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 EN ISO 5579, 2014 standardına göre seviyelendirilmesine ve besleyicilerin besleme mesafelerinin karşılaştırılmasına olanak sağlar. Döküm parçalarının çekinti seviyelerini ve besleme mesafelerini incelemek amacıyla Erma Teknik Şirketi'nde gama ışınları kontrol testleri TS EN ISO 5579 standartına göre 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 cihaza yerleştirilerek bilgisayar ortamında çekinti görüntüleri incelenmiştir. Şekil 4.5'te ışın gönderen düzeneğe ilişkin şematik görüntü verilmektedir.



Şekil 4.6 Gama radyografi deneyinde döküm parçalarının yerleştirilmesi (Kişisel arşiv, 2019)

4.3 Gömleklerin Isıl Karakterizasyonu

Besleyici gömleklerin işlevlerini yerine getirmesi bakımından sıcaklığa bağlı olarak değişen parametreler;

- Yoğunluk
- Verdiği Isı
- Ekzotermik reaksiyon başlama sıcaklığı
- Ekzotermik reaksiyon başlama süresi
- Ekzotermik reaksiyonu süresi
- Isıl iletkenlik

olarak bilinmektedir. Gömleklerin ısı karakterizasyonları sırasında ekzotermik reaksiyon başlama süresi dışındaki veriler belirlenmiştir. Reaksiyonun başlama süresi döküm denemeleri çalışmalarında belirlenmiştir.

Besleyici gömleklerin yanma ile çıkabildiği en yüksek sıcaklık ve soğuma davranışlarını incelemek üzere Çukurova Kimya A.Ş.'nin Ar-Ge laboratuvarlarında yakma testleri yapılmıştır. Sıcaklık ölçümü yapılmadan önce besleyici gömlek 900 °C'de kül fırınında ısıtılarak yanma reaksiyonunun başlatıldı. Testler sırasında sıcaklık ölçümleri lazer pirometre cihazı ile alınmıştır.

Besleyici gömleklerinin ekzotermik reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi, sıcaklığa bağlı ağırlık değişimini belirlemek amacıyla besleyici gömleklerin Şekil 4.2' de gösterilen kısımlarından alınan numunelere DT-TG analizleri yapılmıştır. Analizler Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında Shimadzu DTG 60H cihazında alumina panlar kullanılarak yapılmıştır. Oda sıcaklığı ile 1600 °C arasında dakikada 10 °C artışla tarama yapılmıştır. Ortalama değerlerindeki sapmayı azaltmak için her bir bölgeden her besleyici gömlek için en az 5 DT-TG analizi yapılmıştır.

DT-TGA sonuçlarına göre değerlendirilen numunelerden 4 farklı karışımdan DSC analizleri uygulamak üzere seçilmiştir. DSC analizi ile DTA sonuçlarına ek olarak ekzotermik reaksiyondan elde edilen ısı miktarı belirlenmiştir. DSC analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi laboratuvarlarında NETZSCH DSC 404 F1 Pegasus cihazı ile oda sıcaklığı ile 1600 °C arasında 10 °C/dk tarama ile yapılmıştır.

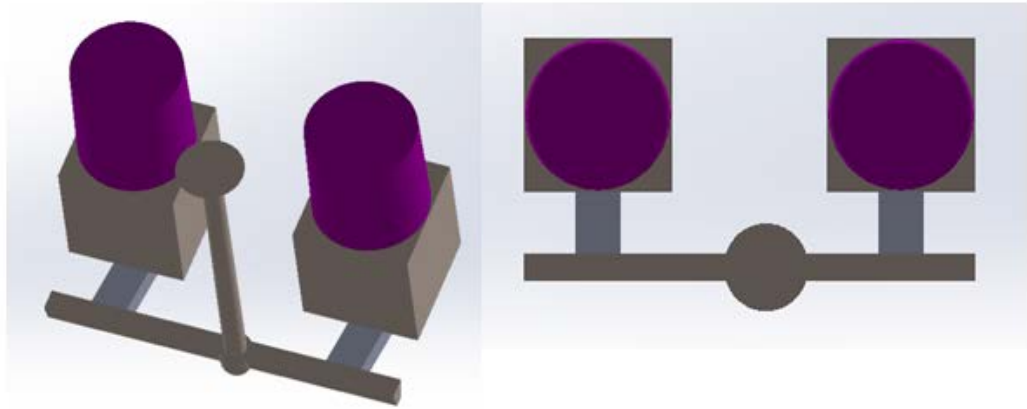
Gömleklerin sıcaklığa bağlı hacimsel değişimlerini belirlemek için dilatometre analizleri yapılmıştır. Dilatometre analizleri Eskişehir Seramik Araştırma Merkezi laboratuvarlarında LINSEIS L600 cihazı ile yapılmıştır.

Isıl geçirgenlik ve ısı iletkenlik özelliklerinin belirlenmesi için LFA cihazı kullanılmıştır. Isıl geçirgenlik analizleri çelik dökümlerde kullanılan orta ve yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerde yapılmıştır. Analizler Netzsch Uygulama Laboratuvar'ında NETZSCH 427 cihazı ile ASTM E-1461 standardına göre yapılmıştır.

4.4 Döküm Uygulamaları

Döküm uygulaması çalışmalarında 2 farklı boyutta kapalı silindirik besleyici gömlek kullanılmıştır. Küresel grafitli dökme demir (KGDD), karbon alaşım çeliği, manganlı çelik ve paslanmaz çelik alaşımları kullanılmıştır. KGDD döküm uygulaması çalışmalarında besleyici gömleklerin hacimsel besleme performansları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmaların sonucundan hareketle çelik alaşımlarından besleyici gömleklerin besleme mesafesi incelenmiştir.

KGDD döküm uygulamalarında kullanılan besleyici gömlek boyut ve modülü Tablo 4.2 besleyici gömlekler literatürde de olduğu gibi besleyebilecekleri en yüksek döküm modülüne sahip küp modeller üzerine yerleştirilmiştir. Kalıp tasarımı Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7 Kalıp tasarımı 3 boyutlu katı modeli

Besleyici boyutu ve modülü seçilirken aşağıdaki eşitliklerden faydalanılmıştır. Şekil 4.8’da döküm metali ve besleyici üstten görünüşünü verilmiştir.

Modül Kriteri;

$$M_d = V_d / A_d$$

$$= 15,8^3 / 6 \times 15,8^2$$

$$= 2,63 \text{ cm}$$

M_d =Döküm parçasının modülü (cm)

V_d =Döküm parçasının hacmi (cm³)

A_d =Döküm parçasının toplam yüzey alanı (cm²)

$$M_b = M_d \times 1,2$$

$$= 2,63 \times 1,2$$

$$= 3,16 \text{ cm}$$

$$3,2 \text{ cm} \geq 3,16 \text{ cm}$$

M_b =Besleyicinin modülü (cm)

V_b =Besleyicinin hacmi (cm³)

A_b =Besleyicinin toplam yüzey alanı (cm²)

Hacim Kriteri;

$$= (\alpha \times V_d) / (\Psi - \alpha)$$

α = %Çekme (KGDD için 5)

V_d = Döküm parçasının hacmi (cm³)

Ψ = Ekzotermik gömlek kullanımındaki

%verim

$$= (5 \times 15,8^3) / (40 - 5)$$

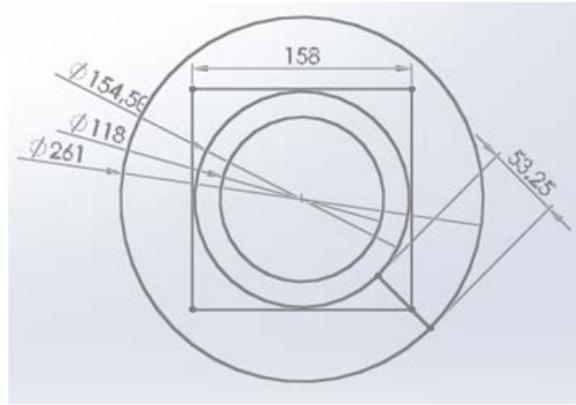
$$= 563 \text{ cm}^3 \text{ (Besleyicinin iç hacmi)}$$

bu değerden daha büyük olmalı)

$$V_{b,iç} = 3,14 \times 5,9^2 \times 13$$

$$= 1420 \text{ cm}^3$$

$$1420 \text{ cm}^3 \geq 563 \text{ cm}^3$$



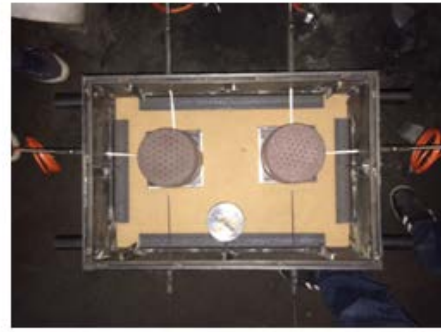
Şekil 4.8 Küp model ve besleyici boyutları

EN-GJS-500 deneme dökümleri Medöksan Metal Döküm Sanayi ve Tic.Ltd.Şti.'de gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon ocağında ergitilen sıvı metalin ocak çıkış sıcaklığı ortalama 1530 °C olarak ölçülmüştür. Kalıplama silis kumu (50-55 AFS), ALFANOL reçine sistemi kullanılarak yapılmıştır. Sıcaklık ölçümü için kullanılacak termal çiftleri

belirlenen noktalarda sabit kalmalarını sağlamak amacıyla 3 adet dereceli kalıp hazırlanmıştır. Besleyici gömleklerin merkezinden, iç yüzeylerinden ve dış yüzeylerinden sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Sıcaklık ölçümlerinde %10 rutenyum katkılı platin tel çiftinden oluşan S tipi seramik kaplı termal çiftler kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümleri veri toplama cihazı (indikatör) aracılığıyla her bir termal çiftten saniyede iki sıcaklık verisi olarak kaydedilmiştir. Ölçümlerini geçerliliğinin sağlamak amacıyla 3 farklı denem dökümü yapılmıştır. Deneme dökümlerini gerçekleştirildiği kalıplar ve kalıplama aşamaları Şekil 4.9’de verilmiştir.



a



b



c

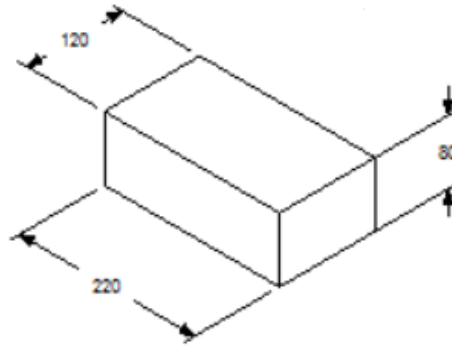
Şekil 4.9 a) Döküm boşluğunun alt ve orta derecenin birleştirilmesiyle oluşturulması b) besleyici gömleklerin küp model üzerine yerleştirilmesi ve termal çiftlerin sabitlenmesi c) tamamlanmış kalıp (Kişisel arşiv, 2019)

Çelik döküm uygulamalarından ilk olarak GS-60 çeliği ile tasarlanan kalıp tasarımında döküm parça içerisindeki çekinti durumu incelenmiştir. Yapılan döküm benzeşim çalışmalarının sonuçları incelendiğinde ilk çekinti oluşumu Tablo 4.5’te belirtilen 3 numaralı parça boyutlarında gerçekleştiği görülmüştür. Şekil 4.11’de 3 numaralı parça boyutlarında yapılan döküm benzeşim çalışmasının çekinti bölgeleri

Figure 1 consists of two parts. Part (a) is a 3D schematic of a rectangular block with dimensions labeled: L (length), W (width), and T (thickness). Part (b) is a schematic of the experimental setup, showing a rectangular block with two circular ports (purple) and a central vertical rod, surrounded by a frame and various sensors.

The screenshot displays the NovaFlow & Solid Control Volume software interface. The main window shows a 3D model of a Y-junction. A red region, representing a specific volume, is highlighted. A dimension of 176 mm is indicated for this region. A color scale for Strain % is visible on the right, ranging from 0.00 to 80.00. The software interface includes a top menu bar, a left sidebar, and a bottom status bar.

108



Şekil 4.12 Döküm numunesinin benzeşim yoluyla belirlenen boyutları

Düşük alaşımlı ve östenitik mangan çeliklerinin deneme dökümlerinin kalıp hazırlama aşamasında alt derece döküm benzeşim programına girilen ölçüler ile aynı olacak şekilde Şekil 4.13'te gösterildiği gibi ters çevrilerek reçine esaslı(furan) silis kumu kullanılarak kalıplanmıştır. Paslanmaz çeliğin döküm uygulamasında reçine esaslı (ALFANOL sistemi) silis kumu kullanılarak kalıplanmıştır. Model ile ekzotermik besleyici gömleklerin dereceye olan uzaklığı tüm kalıplama işlemlerinde aynı ölçüler alınmaya özen gösterilmiştir (Şekil 4.14).

Tablo 4.5 Döküm uygulaması aşamasında parçasının parça boyutlarının belirlenmesi için döküm benzeşim çalışmaları yapılan parça boyutları

Deneme Numarası	Döküm parçasının boyutları (cm)			Hacim (cm ³)	Yüzey alanı (cm ²)	Parça modülü (cm)*1,2	Hacim (cm ³)
	L	W	T				
1	15	12	3	540	522	1,24	83,08
2	18	12	3	648	612	1,27	99,69
3	19	12	3	684	642	1,28	105,23
4	16	14	3	672	628	1,28	103,38
5	17	14	3	714	662	1,29	109,85
6	15	16	3	720	666	1,30	110,77
7	16	16	3	768	704	1,31	118,15
8	16	12	4	768	608	1,52	118,15
9	17	12	4	816	640	1,53	125,54
10	13	16	4	832	648	1,54	128,00
11	15	16	4	960	728	1,58	147,69
12	16	16	4	1024	768	1,60	157,54

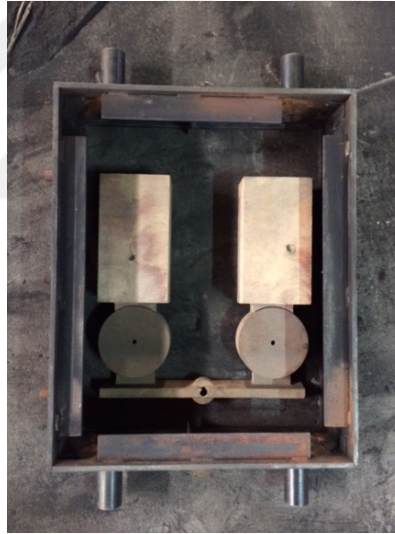
Döküm benzeşim çalışmalarının gerçekte yapılan döküm denemelerine benzerliğini arttırmak amacıyla döküm denemeleri sırasında ocak sıcaklıkları ve döküm süreleri

kayıt altına alınmıştır. Tablo 4.6’de ölçülen sonuçlar verilmektedir. Tablo 4.5’de belirtilen bu sonuçlar döküm benzeşim çalışmalarında veri olarak kullanılmıştır.

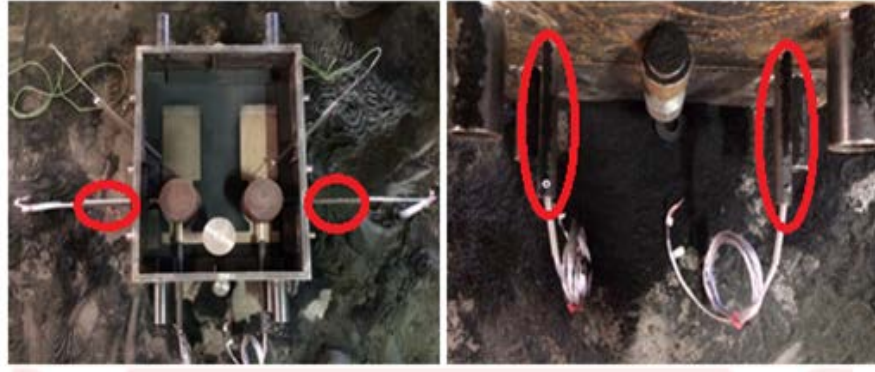
Tablo 4.6 Döküm uygulamalarındaki ocak sıcaklıkları ve döküm süreleri

Döküm Alaşımı	Döküm sıcaklığı (°C)	Döküm süresi (s)
GS-60	1645	15
AISI 4130-1	1655	17
AISI 4130-2	1650	18
A128M-A93-A-1	1574	19
A128M-A93-B-3	1570	38
AISI 316-1	1650	25
AISI 316-2	1640	18

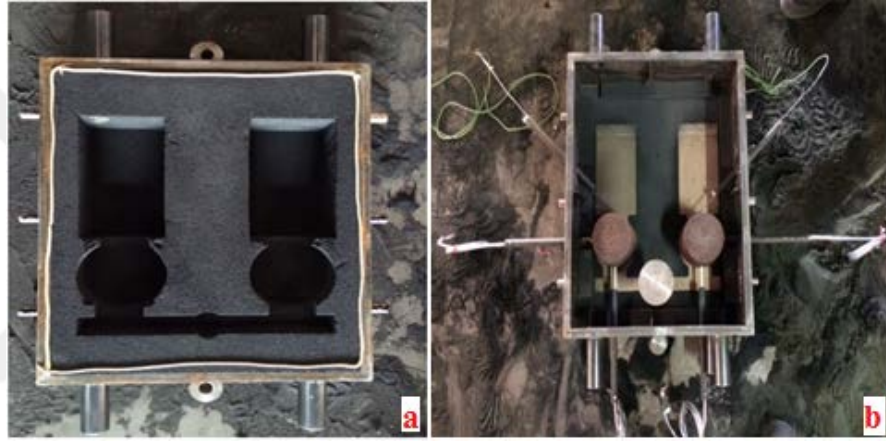
Gerçekleştirilen döküm denemelerinde sıcaklık ölçümü almak için 3 adet farklı türde termal çift kullanılmıştır. GS-60 alaşımlı döküm uygulaması haricinde tüm deneme dökümlerinde sıcaklık ölçümleri alınmıştır.



Şekil 4.13 Kalıp hazırlama aşamasında alt derecenin görünümü (Kişisel arşiv, 2019)



Şekil 4.14 Termal çiftlerin kırılmasını önlemek için üst derecede bulunan metalik boruların gösterimi (Kişisel arşiv, 2019)



Şekil 4.15 a) alt derecenin görünümü, b) üst derecenin görünümü (Kişisel arşiv, 2019)

4.5 Benzeşim Çalışmaları

Döküm benzeşim çalışmaları Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında NovaFlow and Solid programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Döküm parametreleri gerçek şartlara benzer şekilde seçilerek döküm uygulamaları ile aynı noktalardan sıcaklık ölçümleri alınmıştır Tablo 4.7. Sıcaklık ölçüm sonuçları; döküm benzeşim programında termofiziksel özellikleri değiştirilen farklı besleyici gömleklerin kullanılmasıyla gerçekleştirilen döküm benzeşim çalışmalarının sıcaklık ölçüm sonuçları ile gerçek şartlarda ölçümü yapılan sıcaklık değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 4.7 Benzeşim programında uygulanan döküm parametreleri

Döküm alaşımı	Başlangıç sıcaklığı (°C)	Döküm süresi (s)	Metal akış hızı (kg/s)
EN-GJ-500	1450	12	3,4
AISI 4130	1505	17	2,81
A128M-A93-A	1459	19	2,58
AISI 316	1503	18	2,79

Döküm benzeşim programında besleyici gömlek türü dışındaki döküm parametreleri Tablo 4.7’de verilmektedir. Benzeşim için hücre boyutu 4.81 mm olarak belirlenmiş ve tüm benzeşim uygulamalarında sabit tutulmuştur. Başlangıç sıcaklık değerleri farklı alaşım seçilerek yapılan deneme dökümlerinde erişilen en yüksek sıcaklık değeri alınmıştır. Metal akış hızı hesaplanırken toplam ağırlık döküm süresine oranlanmıştır.

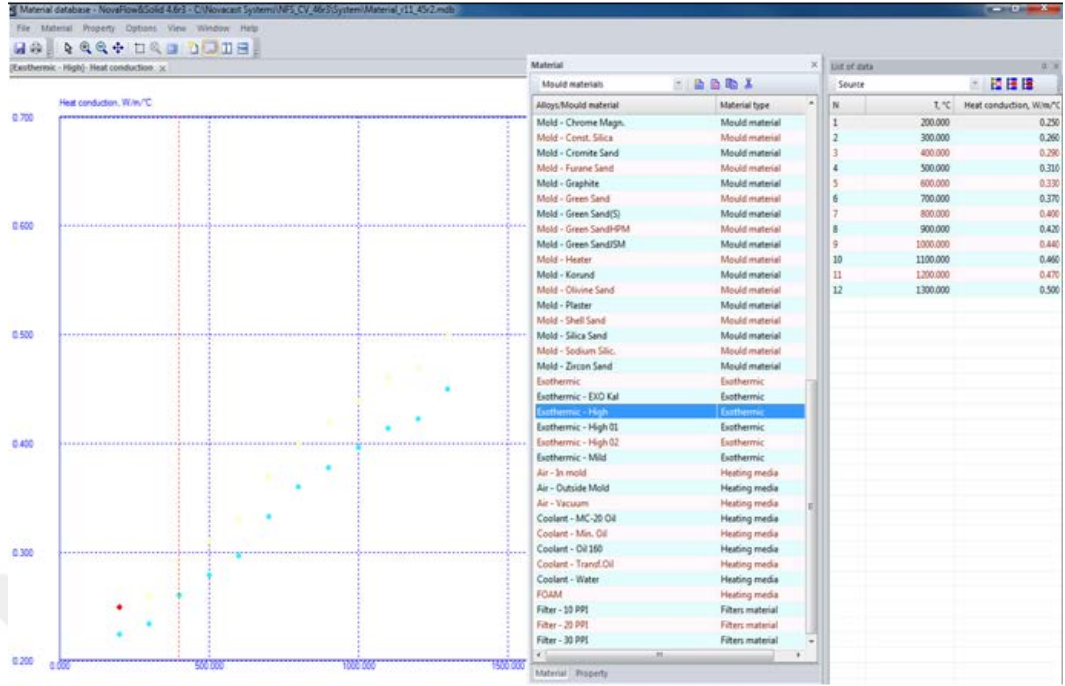
NovaFlowandSolid programında döküm benzeşim çalışmalarının aşağıdaki sıralamaya göre yapılmıştır;

1. Kalıp, parça ve besleyici tasarımının 3 boyutlu modelleri ve “.stl” uzantılı olarak programa tanıtılır.
2. “Simulation Setup” sekmesine tıklanarak 1. adımda 3 boyutlu modellemesi yapılan tasarım seçilir. Dökülecek olan parçanın malzemesi, kalıp malzemesi, besleyici türü ve döküm sıcaklığı gibi döküm parametreleri girilmektedir. Döküm parametrelerin girilmesinin ardından mesh(hücre) oluşturulur ve dosya kaydedilir. Sıcaklık ölçümü yapılacak bölgeler bu aşamada belirlenmiştir.
3. “FlowandSolid Simulation” sekmesine tıklanarak 2. Adımda kaydedilen dosya programda açılır. Bu sekmede döküm süresi, döküm benzeşim programının hangi koşullarda sonlanacağını belirten sekmeler doldurulduktan sonra döküm benzeşim programı başlatılır. Döküm benzeşim çalışmasının sonlanması ile dosya kaydedilir.
4. “Browse The Result” sekmesi tıklanarak yapılan benzeşim çalışmalarının sonuçları incelenir. Sıcaklık ölçümleri, çekinti görünümü, katılaşma süresi gibi sonuçlar incelenerek yorumlanır.

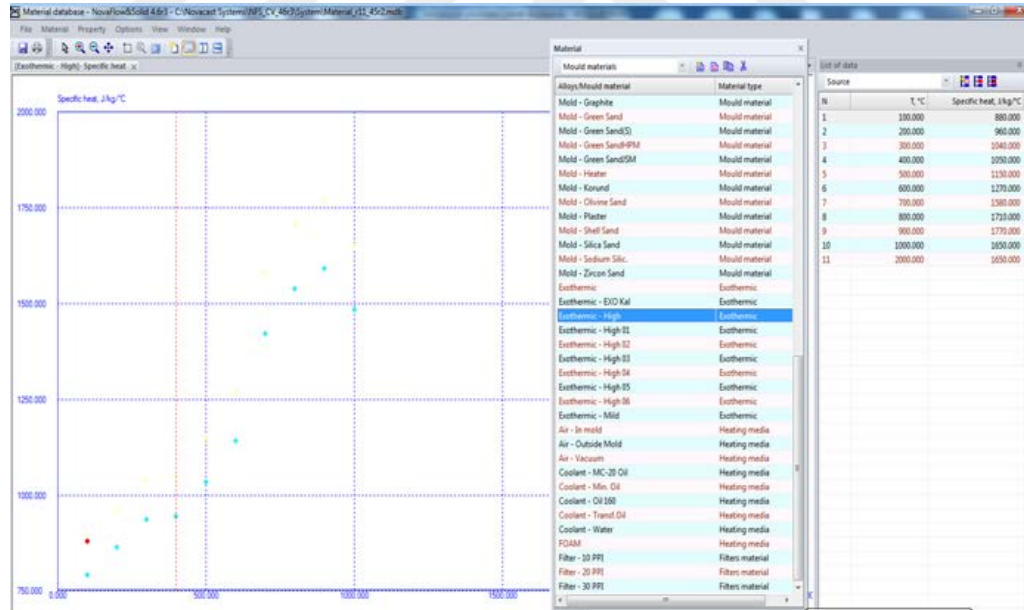
4.5.1 Benzeşim Programında Besleyici G6mlek Parametrelerinin Belirlenmesi

D6k6m benzeşim programında kayıtlı olarak verilen besleyici g6mlek 6zellikleri ile benzeşimler ger6ekleştirildikten sonra benzeşim ve d6k6m uygulamaları soğuma eğrileri arasında farklar olduğu g6r6lm6řt6r. Eğriler arasındaki farkları en aza indirmek amacıyla programda kayıtlı y6ksek ekzotermik (YE), orta ekzotermik (OE) ve Exokal (EK) besleyici g6mlek termokimyasal 6zellikleri g6mlek karakterizasyon testleri ve d6k6m uygulamaları ışığında değiştirilmiştir. Veriler 6zerindeki yenilemeler besleyici g6mleklerin reaksiyon durumuna bağlı “verdiği ısı, reaksiyona başlama s6resi, reaksiyon s6resi” 6zelliklerinde yapılmıştır. B6l6m 4.3’te 6l66len değerlerin programda kayıtlı değerler ile aynı olduğu tespit edildiğinden bu değerler 6zerinde değişiklik yapılmamıştır.

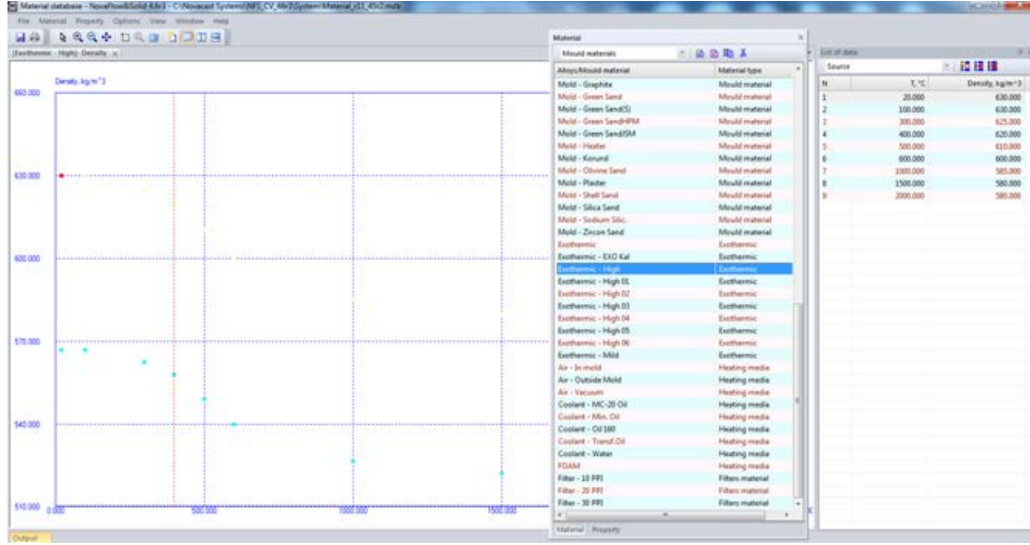
“Database” sekmesi tıklanarak programda kayıtlı bulunan kalıp malzemelerinin ve d6k6lecek olan metalin termofiziksel ve termokimyasal 6zellikleri sayısal veriler doğrultusunda grafiksel olarak g6r6nt6lenmektedir. D6k6m benzeşim programında iyileştirmeler yapmak amacıyla deneme d6k6mlerinde olduğu gibi y6ksek ve orta ekzotermik karakterli besleyici g6mlekler se6ilir. Program veri tabanında kayıtlı olan sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı, 6zg6l ısı ve yoğunluk gibi temel termal 6zellikleri değiştirilerek ger6ek değerlere yaklaşılmaya 6alışılır. şekil 4.16, şekil 4.17 ve şekil 4.18’de sırasıyla ısı iletim katsayısı, 6zg6l ısı, yoğunluk değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi g6sterilmektedir.



Şekil 4.16 Döküm benzeşim programında seçilen besleyici gömleğin ısı iletim katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi (NovaCast, 2013)

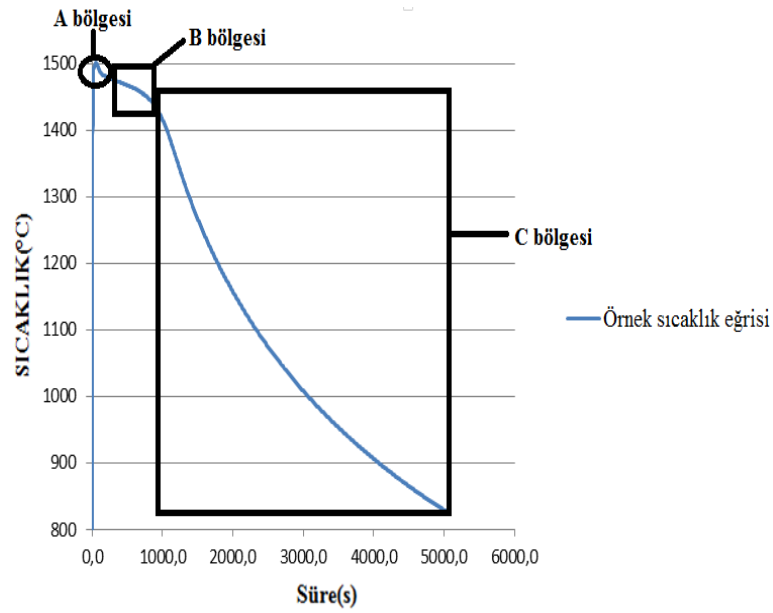


Şekil 4.17 Döküm benzeşim programında seçilen besleyici gömleğin özgül ısısının sıcaklığa bağlı değişimi (NovaCast, 2013)



Şekil 4.18 Döküm benzeşim programında seçilen besleyici gömleğin yoğunluğun sıcaklığa bağlı değişimi (NovaCast, 2013)

Yüksek ve orta ekzotermik karakterli besleyici gömleklerin özelliklerini irdelemek amacıyla ölçülen en yüksek sıcaklık değeri ve sıvı metalin soğuma hızı Şekil 4.19'deki A bölgesi ölçümlerinden, metalin sıvı-katı davranış sergilendiği B bölgesi ölçümlerinden, katı metalin soğuma hızı C bölgesi ölçümlerinden yararlanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.19 Soğuma hızı grafiği üzerinde eğimi hesaplanan bölgeler

Öncelikle KGDD alaşımlarının benzeşim çalışmaları yapılmıştır. Ardından çelik alaşımlarının benzeşimlerine devam edilmiştir. Gömleklerin yalıtım özellikleri sabit tutularak ısı verme özellikleri değiştirilmiştir. Çelik döküm denemeleri için yapılan benzeşim çalışmalarında yüksek ekzotermik (YE), orta ekzotermik (OE) ve Exokal (EK) tipi besleyici gömlekler kullanılmıştır. Tablo 4.8’de döküm benzeşim programının veri tabanında bulunan kayıtlı gömleklerde yapılan değişiklikler gösterilmiştir. Veri tabanına kayıtlı ve üzerinde değişiklik yapılmamış veriler “OE-0”, “YE-0” ve “EK-0” olarak adlandırılmış olup (Tablo 4.8), veri tabanının değiştirilmemiş olduğu durumda orta ve yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömleklerin özelliklerini yansıtmaktadır.

Tablo 4.8 Döküm benzeşim çalışmalarında kullanılacak besleyici gömleklerin özelliklerinde yapılan değişiklikler

Besleyici gömlek türü	Yanma Sıcaklığı (°C)	Yanma Isısı (kJ/kg)	Yanma süresi (s)
YE-0	400	1230	100
YE-1	700	1300	90
YE-2	750	1300	90
YE-3	400	1230	100
YE-4	400	1230	100
YE-5	400	1230	100
YE-6	400	1230	100
YE-7	500	1230	100
YE-8	700	1230	100
YE-9	800	1230	100
YE-10	400	1500	120
YE-11	500	1230	120
YE-12	500	1400	120
YE-13	500	1500	120
OE-0	400	707	200
OE-11	400	800	250
OE-12	800	707	250
OE-13	800	800	250
OE-14	800	750	250
EK-0	400	1230	100
EK-1	400	1230	100
EK-2	700	1300	90
EK-3	750	1300	90
EK-4	400	1230	100
EK-5	400	1230	100
EK-6	400	1230	100

BÖLÜM BEŞ

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tez çalışmaları kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda besleyici gömleklerin bileşim ve geometrik tasarım çalışmaları, karakterizasyon çalışmaları, döküm uygulamaları ve benzeşim çalışmaları tamamlanmıştır.

Besleyici gömleklerde bileşim ve geometrik olarak iki farklı tasarım yapılmıştır. Bileşim tasarımında gömlek bileşiminde mineral yün ve baryum esaslı ateşleyici içeren yüksek ve orta ekzotermik özellikli karışımlar ile seramik fiber ve flor esaslı ateşleyici içeren yüksek ve orta ekzotermik özellikli karışımlar karşılaştırılmıştır. Geometrik tasarımda, yüksek basınçlı otomatik yaş kum kalıplama sistemlerinde kullanılan besleyici gömleklere yük sönümleyen yardımcı bileşenler üzerinde çalışılmıştır. Ayrıca besleyici gömlek ve sıvı metal etkileşimini en aza indirmek için koruyucu refrakter kaplamaların uygulamaları yapılmıştır.

Karakterizasyon çalışmaları ile besleyici gömleklerin yapısal, ısı ve geometrik tasarımlar için mekanik özellikleri analiz edilmiştir. Yapısal incelemelerde gömlek içeriklerindeki farklılıklar ve kullanım sonrası değişimler ortaya konmuştur. Ekzotermik ve yalıtım esaslı gömleklerin işlevselliğini belirleyen ekzotermik reaksiyon başlama sıcaklığı, reaksiyon süresi, verdiği ısı, ısı iletkenlik, erişilen en yüksek sıcaklık ve soğuma rejimi davranışı gibi özellikleri belirlenmiştir.

Döküm uygulamasında KGDD, karbon çeliği, yüksek manganlı çelik ve paslanmaz çelik alaşımları kullanılarak besleyici gömlekler analiz edilmiştir. Besleyici gömleğin sıvı metal soğumasını etkisini belirleyecek bölgelerden sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Bahsedilen döküm alaşımları için gömleklerin reaksiyona başlama süreleri belirlenmiş ve ısı karakterizasyon işlemleri ile elde edilen verilerin doğrulanması amaçlanmıştır.

Benzeşim çalışmalarında karakterizasyon işlemlerinden ve döküm uygulamalarından toplanan veriler işlenerek sanal ve gerçek ortamda gömleklerin çalışmaları karşılaştırılmıştır. Sanal ortamda yapılan çalışmaların gerçek döküm

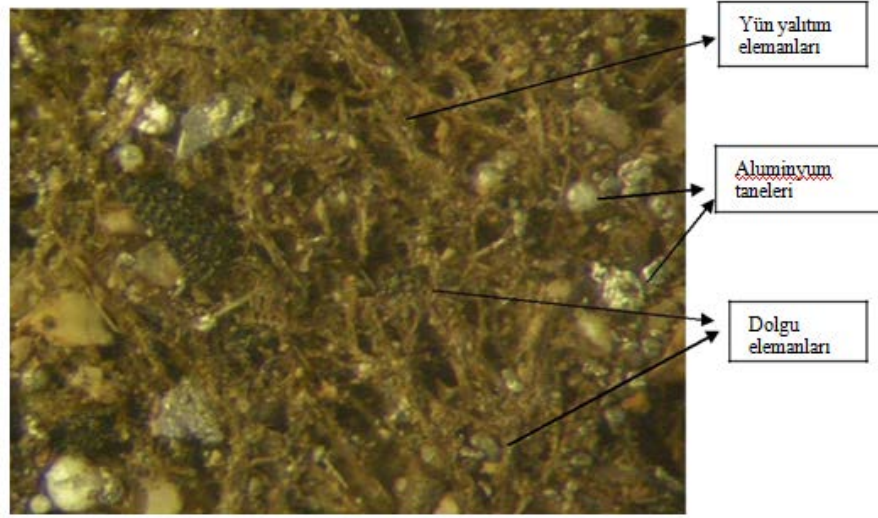
şartlarına benzetilebilmesi amacıyla benzeşim programındaki besleyici gömlek özellikleri yeniden değerlendirilmiştir. Gömlek verileri üzerinde değiştirmeler yapılarak döküm uygulamalarındaki soğuma eğrilerine benzetilmeye çalışılmıştır.

5.1 Yapısal İnceleme Sonuçları

Yapısal incelemelerde besleyici gömleklerin yapıları ve döküm metalinin yapısı ayrı ayrı incelenmiştir. Besleyici gömlek yapı incelemesinde yapı bileşenlerinin dağılımı ve şekli incelenmiştir. Döküm metali incelemesinde besleyici gömlek ile temas halindeki metaldeki ve döküm parça üzerindeki farklı bölgelerdeki metalin yapı değişimi incelenmiştir.

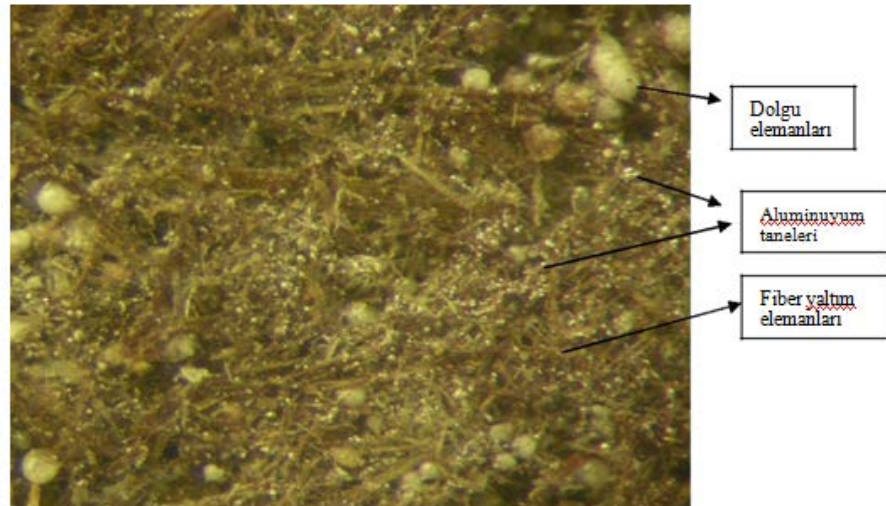
5.1.1 Besleyici Gömleklerin Yapısal Özellikleri

Mikroyapı görüntüleme çalışmaları ile besleyici gömlek bileşenlerinin yapı içerisindeki dağılımı incelenmiştir. Gömlek bileşimini önemli bir kısmını oluşturan ekzotermik elemanlardan alüminyum partikülleri, yalıtım elemanları ve dolgu elemanlarının dağılımına bakılmıştır. İncelenen numunelerden yün ve fiber yalıtım elemanı içeren karışımlar ile yüksek ve orta ekzotermik karışımlar arasında farkların olduğu görülmüştür. Yün yalıtım elemanı içeren orta ekzotermik özellikli Karışım 2 mikroyapı görüntüleri Şekil 5.1’de verilmiştir. Yapıda nispeten kalın alüminyum partikülleri ve daha ince liflerden oluşan yalıtım elemanı görülmektedir. Bölgesel birikmelerin dışında belirtilen bileşenler için homojene yakın bir dağılım olduğu görülmektedir.



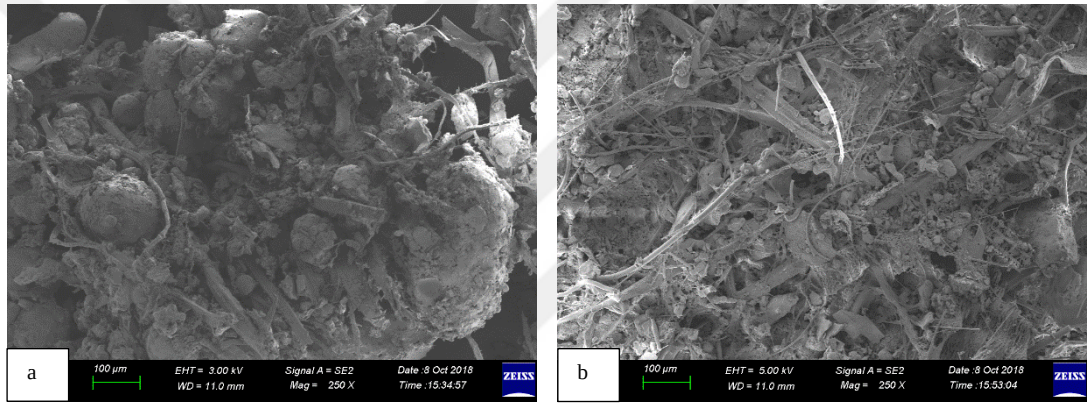
Şekil 5.1 Karışım 2 mikro yapı görüntüsü (40x)

Yüksek ekzotermik özellikli ve fiber yalıtım elemanı içeren Karışım 3'e ait mikroyapı görüntüleri Şekil 5.2'de verilmiştir. Yapıda nispeten daha ince alüminyum partikülleri ile daha kısa ve kalın yalıtım elemanları görülmektedir. Yapıda orta ekzotermik karışımlardan daha fazla alüminyum partikülü görülmektedir. Ayrıca yanmanın daha homojen olması ve daha hızlı ateşlemeyi sağlamak amacıyla alüminyum partiküller ince seçilmiştir (Hussain ve Khandwawala, 2013)



Şekil 5.2 Karışım 3 mikroyapı görüntüsü (40x)

Yün ve fiber yalıtım malzemesi içeriğinde sahip iki besleyici gömleğin karşılaştırmalı SEM analizleri yapılmıştır (Şekil 5.3). Yün içeriğine sahip gömlekte kalın ve uzun lifli yapıların bulunduğu görülürken (Şekil 5.3 a), fiber içeriğine sahip gömlekte ince kırılğan lif yapıların varlığı gözde çarpmaktadır (Şekil 5.3 b). Yün lif yapısının hem kimyasal bileşimi hem de yapısında dolayı fiber yapılara göre insan sağlığına zararlı olduğu bilinmektedir (Sola, 2014). Fakat içeriğindeki yüksek CaO gibi seramiklerde ergime kolaylaştıran bileşenlerden dolayı yüksek sıcaklıklarda yapının bölgesel ergimeye ve daha fazla sinterlenmesine yol açacağı bilinmektedir (Şekil 5.3) (Sandell, 2008).



Şekil 5.3 Yün (a) ve fiber (b) içeren karışımların SEM görüntüleri

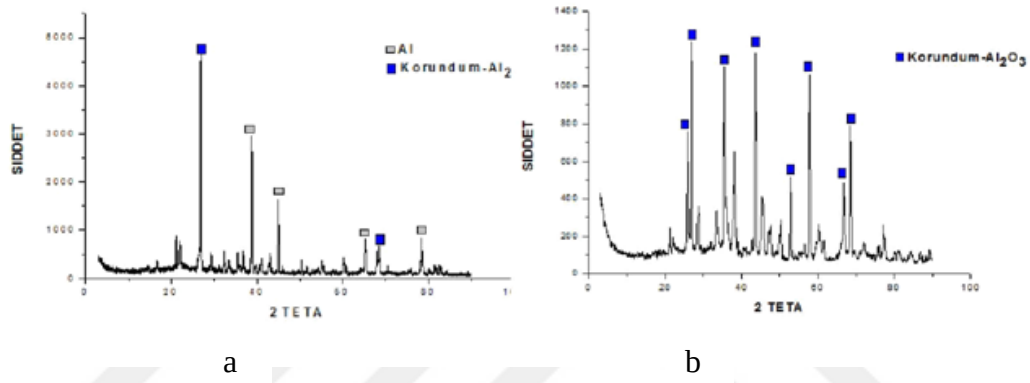
Tablo 5.1 Yün ve fiber üzerinden alınan EDS analizleri

	Fiber		Yün	
Element	Ağırlıkça %	Atomik %	Ağırlıkça %	Atomik %
C	7,43	13,13	7,08	13,02
O	28,48	37,77	38,45	53,07
Al	30,31	23,83	5,77	4,72
Si	33,36	24,26	14,73	10,49
Ca	-	-	33,97	18,75

Orta ve yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklere yanma öncesi ve sonrası meydana gelen faz dönüşümlerinin incelenebilmesi için X-ışınları kırınım analizleri yapılmıştır. Genel olarak benzer özellikli karışımlar için birbirine yakın X-ışınları

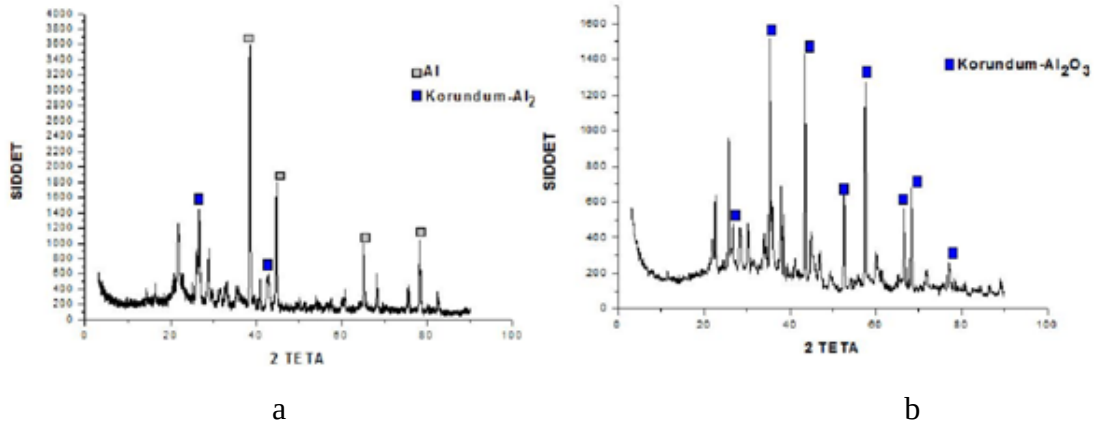
kırınım desenleri elde edilmiştir.

Karışım 1'e ait yanma öncesi ve sonrası faz analizleri Şekil 5.3'te verilmiştir. Kırınım deseni incelendiğinde yanma öncesinde mevcut olan metalik alüminyum piklerinin, yanma sonrası kaybolduğu görülmüştür. Ayrıca yanma öncesi ağırlıklı olarak yalıtım elemanlarından gelen korundum (Al_2O_3) pikleri, yanma sonrasında hem ekzotermik reaksiyon ürünlerinden hem de yalıtım elemanlarından geldiği bilinmektedir.



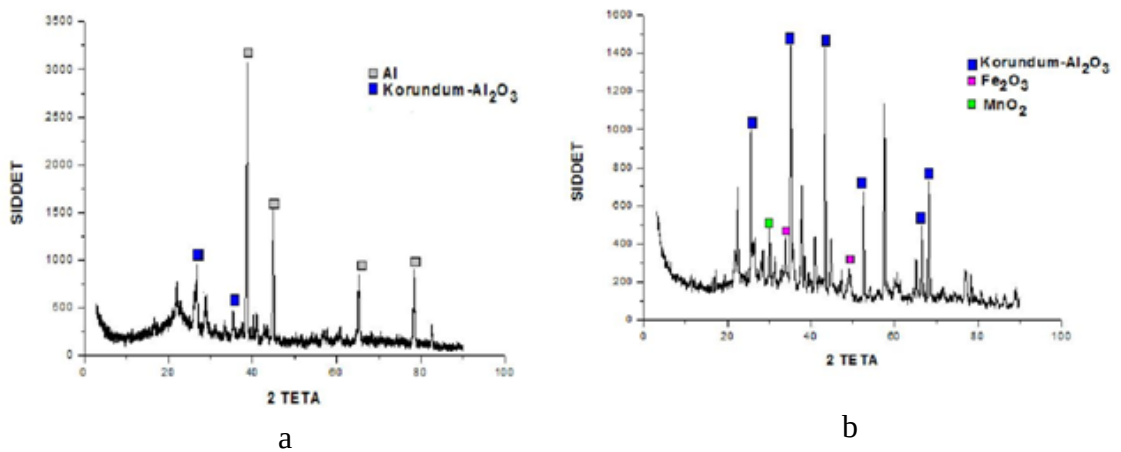
Şekil 5.4 Karışım 1 yanmadan önceki (a), yandıktan sonraki (b) X ışınları kırınım deseni

Karışım 2'e ait yanma öncesi ve sonrası faz analizleri Şekil 5.4'te verilmiştir. Analiz sonuçları Karışım 1 ile benzerlik göstermekle birlikte yanmadan önceki metalik alüminyum piklerinin şiddetinde azalma olduğu görülmektedir. Bunun sebebi analiz yapılan numune içerisindeki alüminyum dağılımı ve oranına bağlı olabileceği düşünülmektedir. Literatürden de benzer biçimde stokiyometrik oranlara yakın demir oksit ve metalik alüminyum reaksiyonları sonucunda korundum (Al_2O_3) fazının çıktığı görülmüştür. Fazla oranda metalik alüminyumun demir oksit ile reaksiyonu sonucunda ise FeAl_2O_4 bileşiği oluşmaktadır (Dures ve ve diğer., 2007, Emily ve Michelle, 2005). Aynı zamanda yanma sonrasındaki korundum pik şiddetleri de ekzotermik reaksiyon sonuçları ve yalıtım elemanların yanma öncesi durumlarını korumaları nedeniyle Karışım1'e göre daha yüksektir.



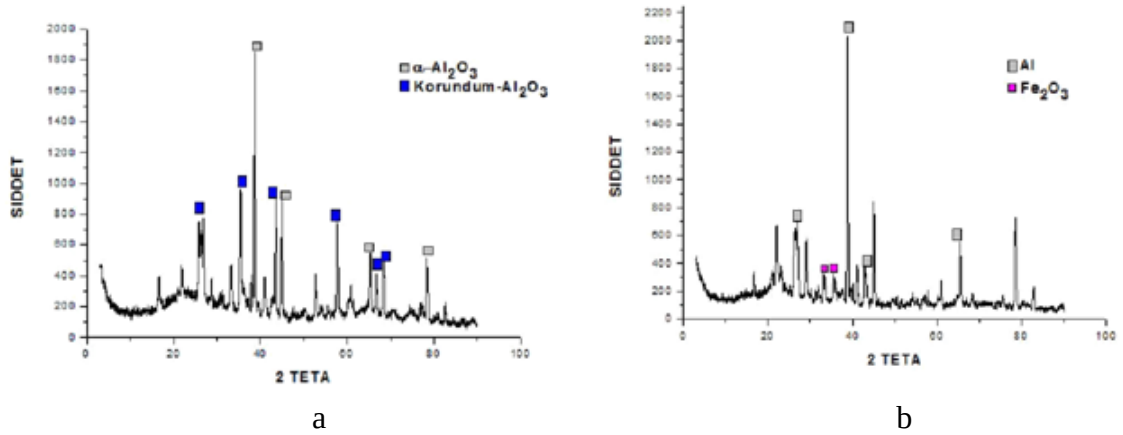
Şekil 5.5 Karışım 2 yanmadan önceki (a), yandıktan sonraki (b) X ışınları kırınım deseni

Karışım 3'e ait yanma öncesi ve sonrası faz analizleri Şekil 5.5'te verilmiştir. Karışım 3 ekzotermik özelliği yüksek olan bir karışımdır. Yalıtım elemanlarının oranı ise orta ekzotermik karışımlara göre çok daha düşüktür. Yanma öncesi analizleri incelendiğinde yalıtım kaynaklı olan korundum piklerinin şiddetinin azaldığı görülmektedir. Buna karşılık metalik alüminyuma ait piklerin şiddeti korunmuştur. Yanma sonrası analizleri incelendiğinde ise daha yüksek ekzotermik reaksiyon sonucunda alüminyum oksidin farklı fazlarının da oluştuğu görülmüştür. Bunun sebebinin de literatürdeki çalışmalar göz önüne alındığında ortaya çıkan enerjinin bölgesel farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.6 Karışım 3 yanmadan önceki (a), yandıktan sonraki (b) X ışınları kırınım deseni

Karışım 4'e ait yanma öncesi ve sonrası faz analizleri Şekil 2.6'da verilmiştir. Karışım 4, Karışım 3 ile benzer özelliklere sahiptir. Bu nedenle yanma öncesi ve yanma sonrası analizlerde benzerlikler olduğu görülmektedir. Yüksek ekzotermik özelliğe sahip olmaları nedeniyle orta ekzotermik besleyicilere göre daha fazla metalik alüminyum ve oksitler içermektedir. Yanma sonucunda çıkılan sıcaklıkların yüksek olması ve reaksiyona giren bileşenlerinin oranının yüksekliği nedeniyle korundum fazı oluşumu görülmüştür. Yanma yetersiz olsaydı özellikle alüminyum partikülleri etrafında Fe_3Al gibi intermetalik fazların oluşma ihtimali görülmektedir (Escot ve diğ., , 2007). Ayrıca, bu karışımda ekzotermik reaksiyon elemanı olarak kullanılan demir oksit ve mangan oksidin de varlığı görülmektedir. Yapıda görülen söz konusu fazların karışım homojenliği ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.



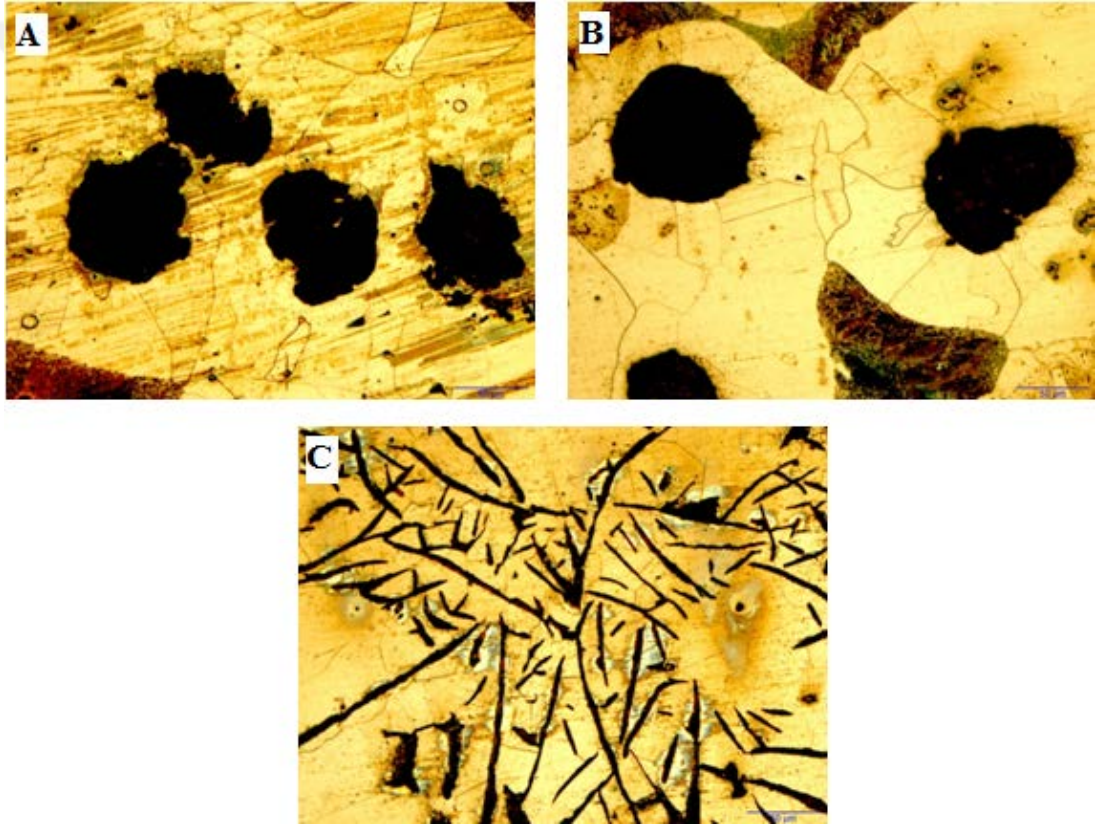
Şekil 5.7 Karışım 4 yanmadan önceki (a), yandıktan sonraki (b) X ışınları kırınım deseni

5.1.2 Döküm Metalinin Yapısal Özellikleri

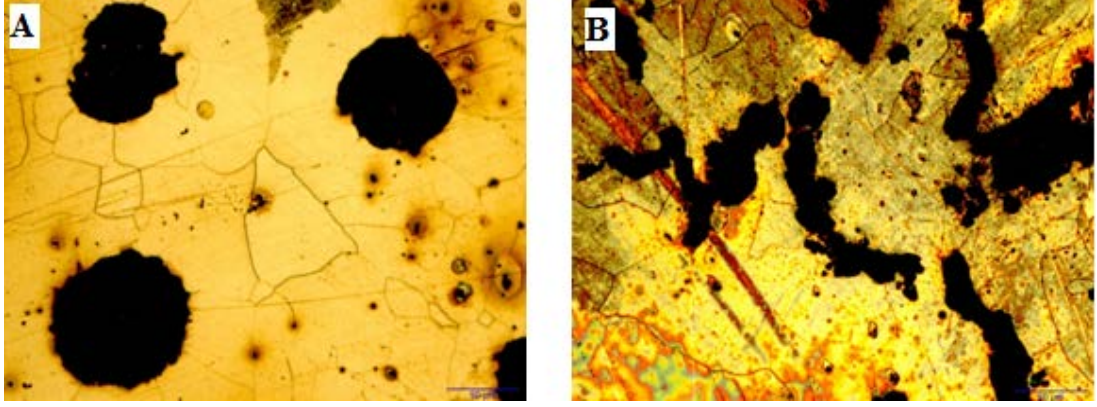
5.1.2.1 Küresel Grafitli Dökme Demirler

Döküm sonrası mikroyapıda meydana gelen değişimler optik ve elektron mikroskopları ile ortaya konmuştur. KGDD döküm uygulamalarında küp döküm parçasının Şekil 4.2'de kodlanan bölgelerinden çıkartılan numunelerin optik inceleme sonuçları Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 verilmiştir. Metalografi görüntüleri incelendiğinde parça içerisinde genel olarak siyah olarak görünen küresel grafitli

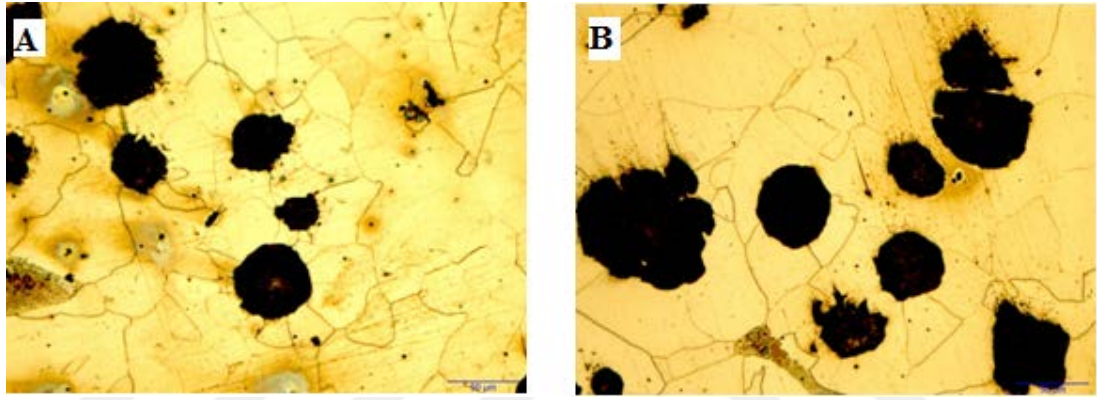
yapının olduğu gör÷lmektedir. Açık renkte görün÷n ve tane sınırlarının göze çarptığı ana yapı ise ferritik yapı olduğu bilinmektedir. Karışım 4 bileşimine sahip besleyici gömleğin kullanıldığı dökümlerde gömleğin tam altından alınan 2 nolu bölge olarak adlandırılan kısımdaki içyapılarda bozulmalar olduğu gör÷lmektedir (Şekil 5.10). Bozulmaların nedeninin, gömleğin yüksek ekzotermik özelliğine bağılı olarak metalin aşırı ısınması ve grafitlerin küreselleşemeyecekleri bir hızda katılaştığı düşün÷lebilir. Aynı zamanda besleyici altı olarak bilinen 4 nolu bölgede, Karışım 4 bileşimine sahip besleyici gömleğin kullanıldığı döküm parçasında, besleyici içerisindeki çekinti bölgelerinin bir parçaya yansıdığı gör÷lmektedir.



Şekil 5.8 Besleyici gömlek karışımının döküm metal yapısına etkisi; A) Karışım 3, B) Karışım 4, C) Karışım 4 için 1 nolu bölge görüntüleri (200x)

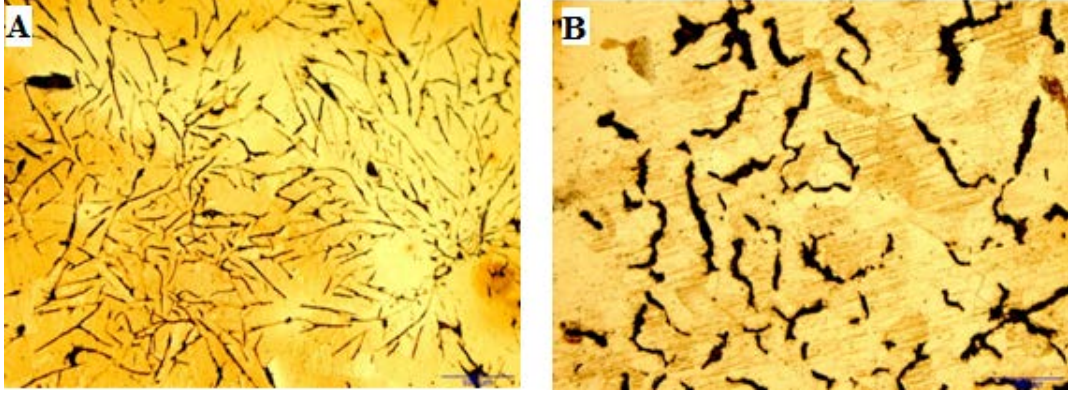


Şekil 5.9 2 Nolu bölge 200x büyütme.(A; Karışım 3, B; Karışım 4)

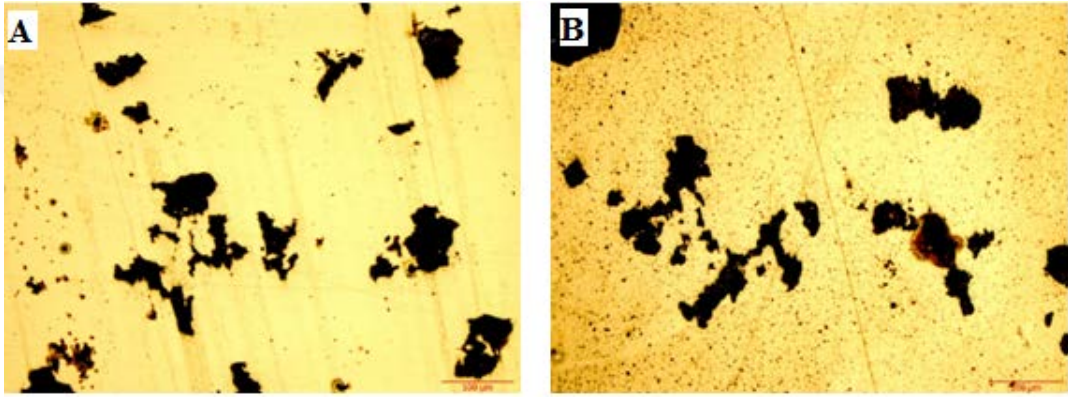


Şekil 5.10 3 nolu bölge 200x büyütme.(A; Karışım 3, B; Karışım 4)

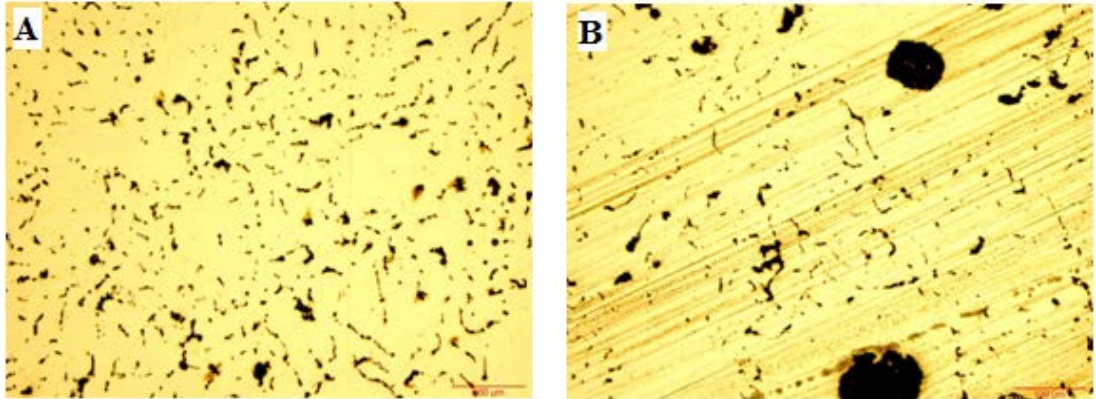
Döküm tamamlandıktan sonra besleyici gömlek içerisinde kalan metalden de numuneler alınmıştır. Besleyicinin orta kısımlarından alınan Şekil 4.2 'de alt, üst ve orta olarak adlandırılan numunelerin optik mikroskop incelemeleri Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te verilmiştir. Besleyici içerisinde metalin grafit yapısının küresel grafitli yapıdan bozulmuş lamel grafitli, yapıya döndüğü görülmüştür. Özellikle besleyicini üst kısmında alınan görüntülerde siyah olarak görünen grafit yapısının tamamının lamelli yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir (Şekil 5.11). Besleyicilerin orta kısımlarında ise siyah olarak görülen yapılar sadece grafit yapısı değil aynı zamanda çekinti bölgeleri de görülmektedir (Şekil 5.12). Besleyici alt kısımlarında yapılan incelemelerde ise grafit yapısının tamamen bozulduğu ve azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 5.13).



Şekil 5.11 Besleyicilerin üst bölgeleri 100x büyütme.(A; Karışım 3, B; Karışım 4)



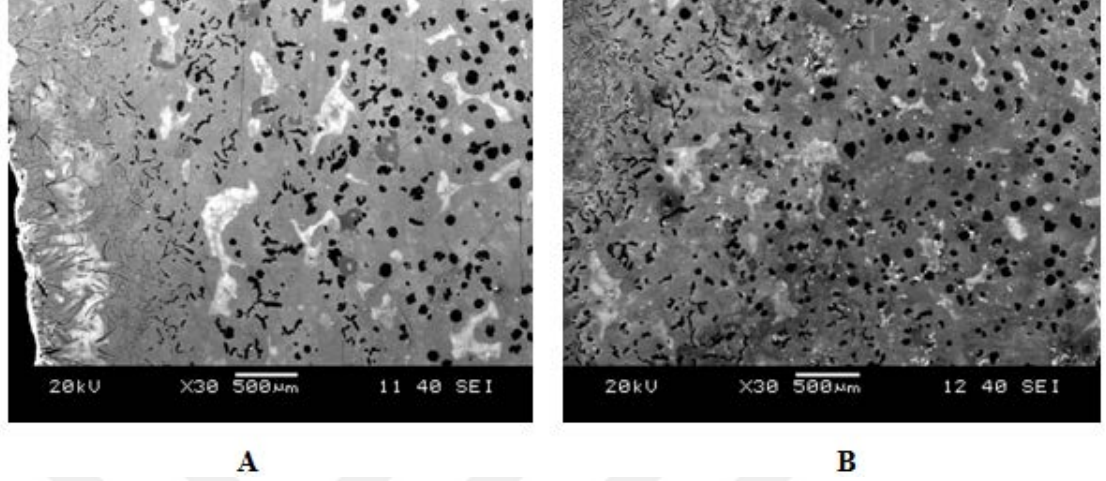
Şekil 5.12 Besleyicilerin orta bölgeleri 100x büyütme.(A; Karışım 3, B; Karışım 4)



Şekil 5.13 Besleyicilerin alt bölgeleri 100x büyütme.(A; Karışım 3, B; Karışım 4)

Dökülen parçalar üzerinde besleyici bağlantılarının olduğu 4 numara ile kodlanan kısımlarda elektron mikroskobu incelemeleri de yapılmıştır. Yapılan incelemelerde parçayla temasın olduğu besleyici altı kısımlarda küresel grafit yapısında bozulmaların

olduğu görülmektedir. Grafit bozulmasının yüzeyden yaklaşık 1 mm aşağılara kadar indiği görülmektedir (Şekil 5.14).



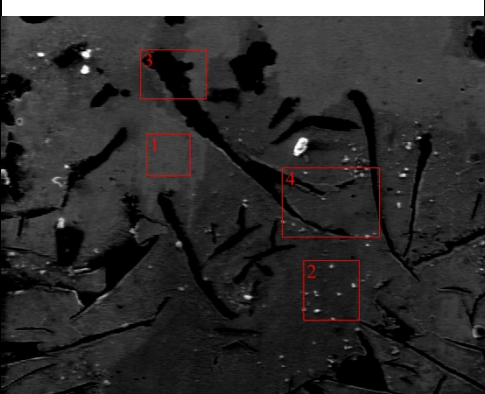
Şekil 5.14 4 nolu bölge SEM görüntüleri. (A; Karışım 3, B; Karışım 4)

KGDD’lerde ekzotermik besleyicilere bağlı mikroyapı bozulmasının nedeni olarak birkaç neden öne sürülmektedir (Sandell, 2008; Beeley, 2001). Bunlardan bazıları;

- Modülü yüksek besleyici gömlek kullanımı
- Gömlektен gelen flor elementinin etkisi
- Ergitmede kullanılan hurdadaki kükürt fazlalığı
- Gömlektен ve hurdadan gelen alüminyum

olarak sayılabilir. Bu nedenle göz önünde bulundurarak metal üzerinde meydana gelen kimyasal etkileşimler EDS analizleri ile tespit edilmiştir. 300x büyütmede 4 noktadan alınan analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bozulmadan etkin olduğu bilinen kükürt, flor ve alüminyumun elementleri ile küreselleşme sağladığı bilinen magnezium ve seryum elementlerinin oranları incelenmiştir. Fakat flor EDS deseni demir elementi ile çakışmaktadır. Bu nedenle flor değerlerinde beklenmedik sapmalar olmuştur (Tablo 5.2). Döküm metali analizi ile karşılaştırıldığında alüminyum oranının yaklaşık 3 kat arttığı görülmüştür. Özellikle grafit uç bölgelerinde alüminyum miktarı artış göstermektedir. Küreselleştirici elementlerinin oranının yeterli olduğu, fakat belirtilen bölgelerde küreselleştirmeyi sağlayamadıkları görülmüştür. Bunun nedeni küresel yapıyı bozan elementlerin diğer elementlerle bağlanması ile açıklanabilir.

Tablo 5.2 EDS alınan bölgeler ve bazı elementlerin oranları

	Element	1. Bölge (ağ.%)	2. Bölge (ağ.%)	3. Bölge (ağ.%)	4. Bölge (ağ.%)	Ort.
	S	0,00	0,27	0,25	0,18	0,175
	F	2,0	1,18	2,5	1,4	1,77
	Al	0,04	0,02	0,04	0,03	0,03
	Mg	0,11	0,03	0,02	0,07	0,05
	Ce	0,05	0,08	0,13	0,11	0,09

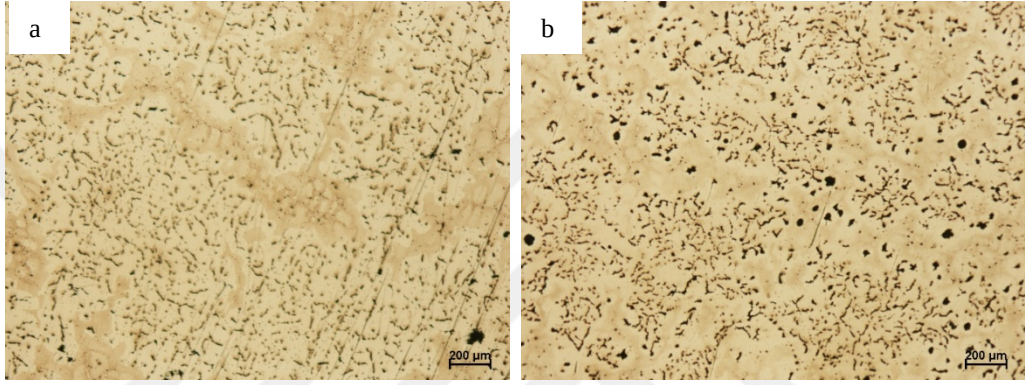
Metalik parçanın özellikleri mikro yapıya bağlı olarak değişmektedir. Mikro yapı kontrolü metal katılaşması sırasında oluşur. Katılaşma kontrolü için kalıp tasarımlarında yardımcı elemanlar kullanılmaktadır. Besleyici gömlekler en çok kullanılan kalıp yardımcı elemanlarından birisidir. KGDD döküm uygulamalarında kullanılan ekzotermik besleyici gömleklerin döküm alaşımı ile etkileşime girmesi sonucunda besleyici gömleğin alt bölgesi ile döküm parçasının kesiştiği bölgede flake(bozulmuş) grafit olarak adlandırılan grafit yapısı görülmektedir. Ekzotermik besleyici gömlek ile küresel grafitli dökme demir alaşımının etkileşimi sonucunda küresel yapının bozulduğu bu durumlarda mekanik özelliklerde kötü yönde etkilemektedir. Bu verilen örnekteki gibi ekzotermik besleyici gömleklerin başka metal alaşımları ile etkileşime girip girmediği merak konusudur. Kalıp tasarımında yardımcı eleman olarak kullanılan ekzotermik besleyici gömleklerin çelik döküm uygulamalarında kimyasal yapıyı nasıl etkilediğini belirlemek amacıyla besleyiciden ve dökümü yapılan parçaların farklı bölgelerinden mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Mikroyapı görüntüleri Şekil 5.18- Şekil 5.27 arasında görüntüler verilmiştir.

5.1.2.2 Etkileşim Tasarımı Yapılan Besleyicilerde Gömleklerin Döküm Metaline Etkisi

Mikro yapı görüntüleri incelendiğinde genel olarak dış kısma yakın bölgelerde grafit yapısı oldukça fazla bozulmuştur. İç kısımlarda ise nispeten yüksek grafitleşme ve küreselleşme görülmektedir. Daha önce döküm uygulamalarında incelenen

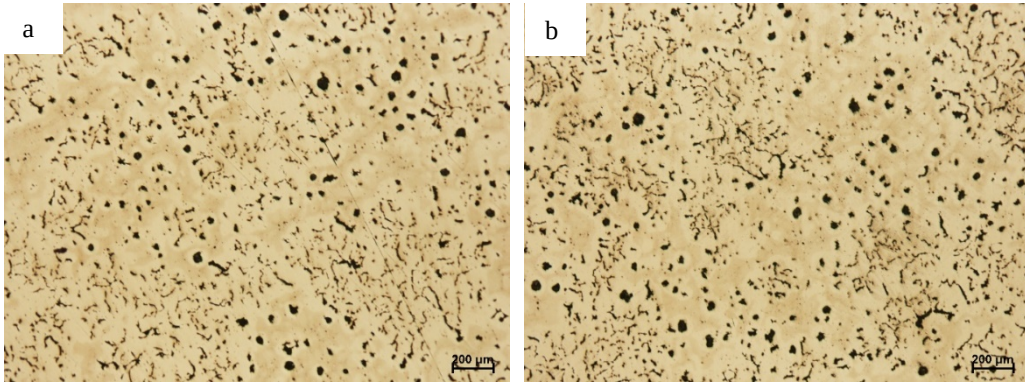
metallere benzer biçimde kaplamasız besleyici gömleğin içindeki metalin mikro yapıları incelendiğinde grafitleşmenin yapılarının oluştuğu, fakat yapının birçoğunun küreselliğinin bozulduğu görülmüştür (Şekil 5.15).

Zirkon bazlı kaplama uygulanan besleyici gömleğin içindeki metalin mikro yapıları incelendiğinde ise hem grafitleşmenin daha iyi olduğu hem de küresel yapının kaplamasız besleyici gömleğe daha iyi korunabildiği görülmüştür (Şekil 5.16).

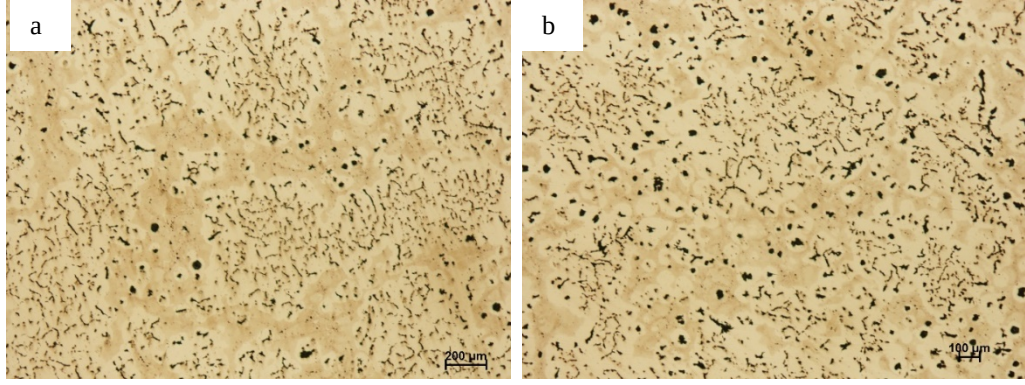


Şekil 5.15 Kaplama uygulanmamış besleyici gömleklerin kullanıldığı metal numunelerinin mikro yapıları a: iç kısım, b: dış kısım

Grafit bazlı kaplama uygulanan besleyici gömleğin içindeki metalin mikro yapıları incelendiğinde de zirkon bazlı yapıya benzer biçimde hem grafitleşmenin daha iyi olduğu hem de küresel yapının kaplamasız besleyici gömleğe daha iyi koyabildiği görülmüştür (Şekil 5.17)



Şekil 5.16 Zirkon bazlı kaplama uygulanmış besleyici gömleklerin kullanıldığı metal numunelerinin mikro yapıları a: iç kısım, b: dış kısım

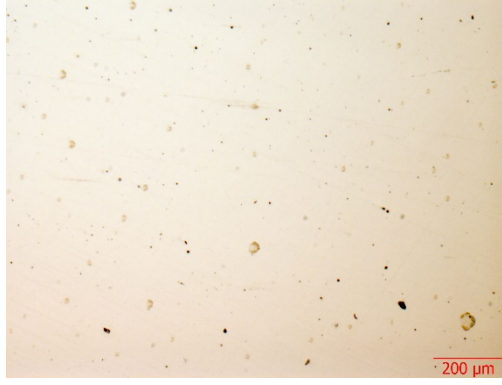


Şekil 5.17 Grafit bazlı kaplama uygulanmış besleyici gömleklerin kullanıldığı metal numunelerinin mikro yapıları a: iç kısım, b: dış kısım

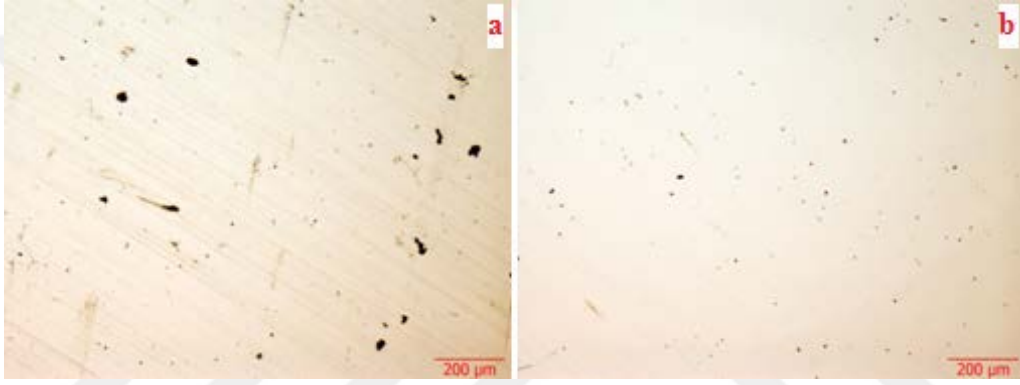
5.1.2.3 Çelik Alaşımları

Çelik dökümlerinin tamamında mikroyapı analizi çalışması yapılamamıştır. Yüksek manganlı ve paslanmaz çeliklerde belirlenen bölgelerden numune çıkartılamamıştır. Mikro yapı incelemeleri karbon çeliği döküm uygulamalarından çıkan numuneler üzerinde yapılabilmektedir.

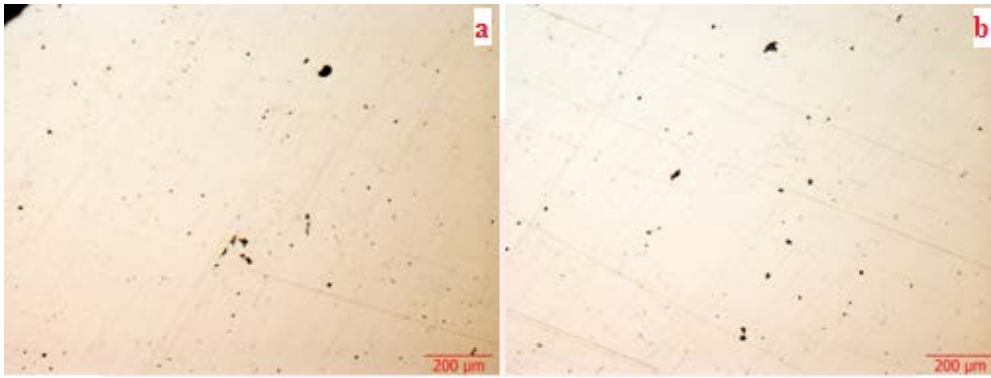
Karbon çeliği döküm uygulamasında orta ekzotermik karakterli besleyici gömlek kullanılan çalışmada döküm parçasının mikroyapı görüntüsü incelendiğinde Şekil 5.18’de Şekil 4.2 1 nolu bölgenin Şekil 5.19’deki besleyici altı (2 nolu üst bölge) ve Şekil 5.20’deki besleyici bağlantı bölgesinden(2 nolu alt bölge) daha küçük ve daha az boşluk içerdiği görülmektedir. Şekil 2.8 incelendiğinde besleyici altı mikroyapı (Şekil 5.19a) görüntüsünün besleyici bağlantı bölgesi (2 nolu alt bölge) olarak adlandırılan bölgeye (Şekil 5.19b) oranla daha fazla boşluk içerdiği görülmektedir. Bunun nedeninin döküm sırasında besleyicide çekinti oluşumuna bağlı olduğu düşünülmektedir. 3 nolu bölgenin farklı yerlerinden alınan mikroyapı görüntüleri incelendiğinde birbirine benzer olduğu görülmektedir (Şekil 5.20).



Şekil 5.18 4130-1 döküm uygulamasında orta ekzotermik karakterli besleyici gömlek kullanılarak üretilen döküm parçasının 1 nolu bölge görüntüsü

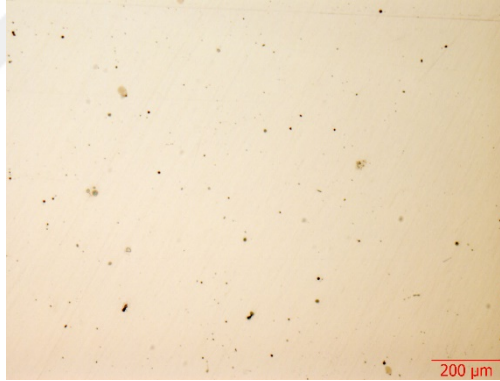


Şekil 5.19 4130-1 döküm uygulamasında orta ekzotermik karakterli besleyici gömlek metalinin 2 nolu bölge görüntüsü; a) üst bölge, b) alt bölge.

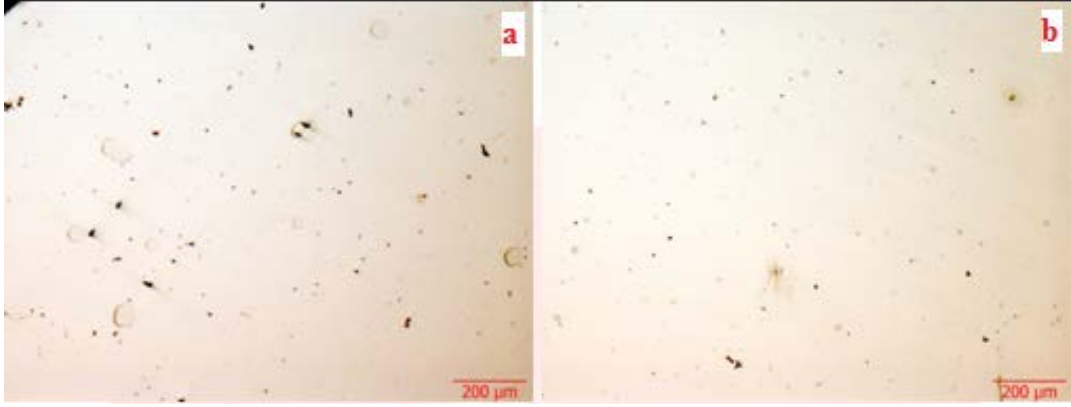


Şekil 5.20 4130-1 döküm uygulamasında orta ekzotermik karakterli besleyici gömlek metalinin 3 nolu bölge görüntüsü; a) Besleyici gömleğe temas eden yüzey, b) iç kısım

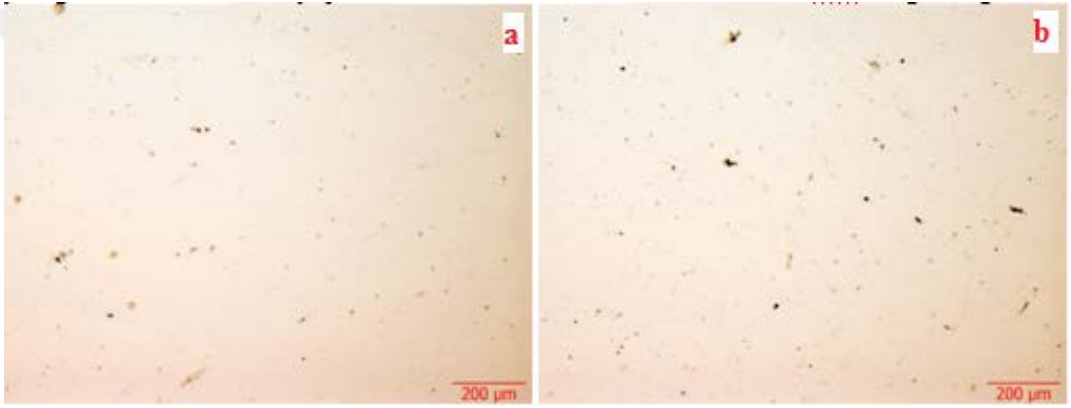
Karbon çeliği yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlek kullanılan çalışmada döküm parçasının mikro yapı görüntüsü incelendiğinde Şekil 5.21'daki Şekil 4.2 1 nolu bölgenin Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'daki görüntülere kıyasla daha küçük ve daha az boşluk içerdiği görülmektedir. Şekil 5.22 incelendiğinde besleyici altı (2 nolu üst bölge) mikro yapı görüntüsünün besleyici bağlantı bölgesine (2 nolu alt bölge) oranla daha fazla ve daha büyük yapı boşluk içerdiği görülmektedir. Orta ekzotermik karakterli besleyici gömlek çalışmaları sonucunda yorumlanan mikro yapı görüntülerine benzer olarak yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlekler ile yapılan çalışmalarda mikro yapı görüntülerinin (Şekil 5.23) döküm sırasında besleyicide çekinti boşluğu oluşumuna bağlı olduğu düşünülmektedir. 3 nolu bölgenin farklı yerlerinden alınan mikro yapı görüntüleri incelendiğinde besleyici gömleğe temas eden görüntü ile iç kısım olarak adlandırılan görüntü karşılaştırıldığında benzer görüntüler olduğu görülmektedir. Şekil 5.23b incelendiğinde Şekil 5.23a'ya kıyasla besleyicinin iç kısım bölgesinin daha fazla boşluk içerdiği görülmektedir.



Şekil 5.21 4130-1 döküm uygulamasında yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlek kullanılarak üretilen döküm parçasının (1 nolu bölge) görüntüsü

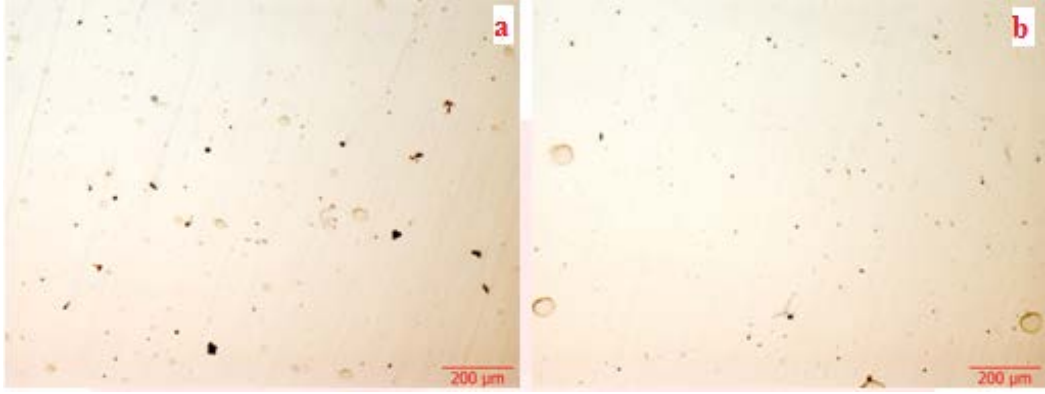


Şekil 5.22 4130-1 döküm uygulamasında yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlek metalinin 2 nolu bölge görüntüsü; a) üst bölge, b) alt bölge



Şekil 5.23 4130-1 döküm uygulamasında yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlek metalinin 3 nolu bölge görüntüsü; a) besleyici gömleğe temas eden yüzey, b) iç kısım

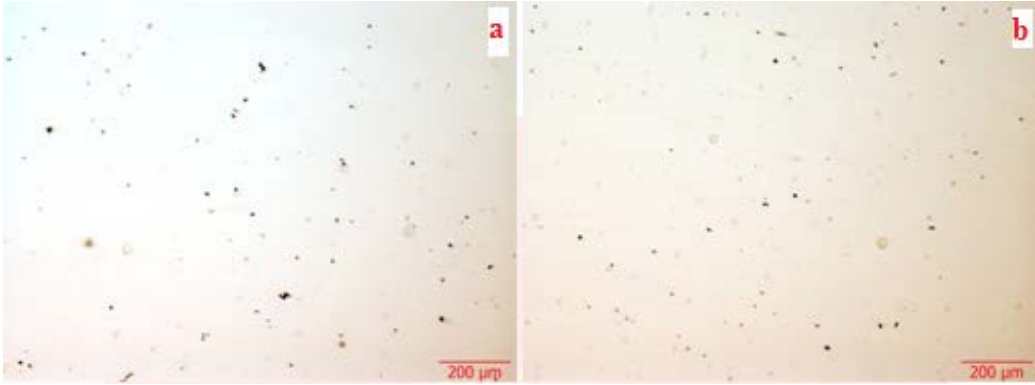
Karbon çeliği döküm uygulamasında orta ekzotermik karakterli besleyici gömlek kullanılan çalışmada 2 nolu bölgenin farklı bölgeleri incelendiğinde besleyici altı mikro yapı (2 nolu üst bölge) görüntüsünün, besleyici bağlantı bölgesine (2 nolu alt bölge) oranla daha fazla boşluk içerdiği görülmektedir (Şekil 5.24). 3 nolu bölge olarak adlandırılan besleyici gömleğe temas eden mikro yapı görüntüsü incelendiğinde 4130-1 döküm uygulamasının 3 nolu bölgesinin mikro yapı görüntülerine benzer şekilde olduğu görülmektedir (Şekil 5.25).



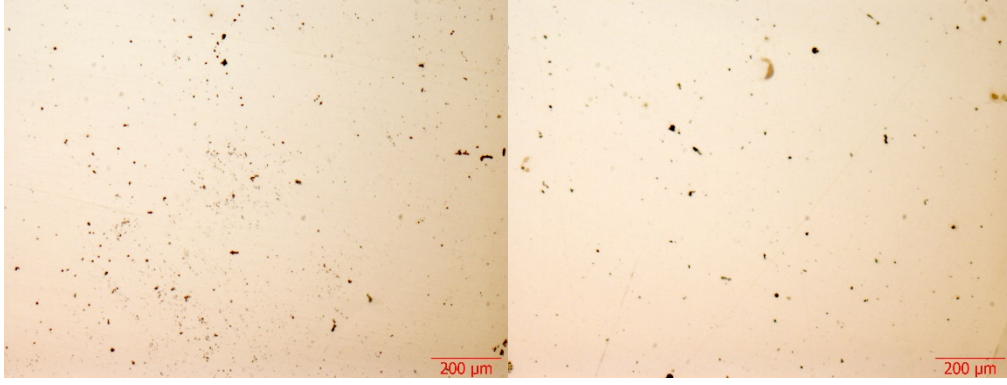
Şekil 5.24 4130-2 döküm uygulamasında orta ekzotermik karakterli besleyici gömlek metalinin 2 nolu bölge görüntüsü; a) üst bölge, b) alt bölge



Şekil 5.25 4130-2 döküm uygulamasında orta ekzotermik karakterli besleyici gömlek metalinin 3 nolu bölge görüntüsü.(besleyici gömleğe temas eden yüzey)



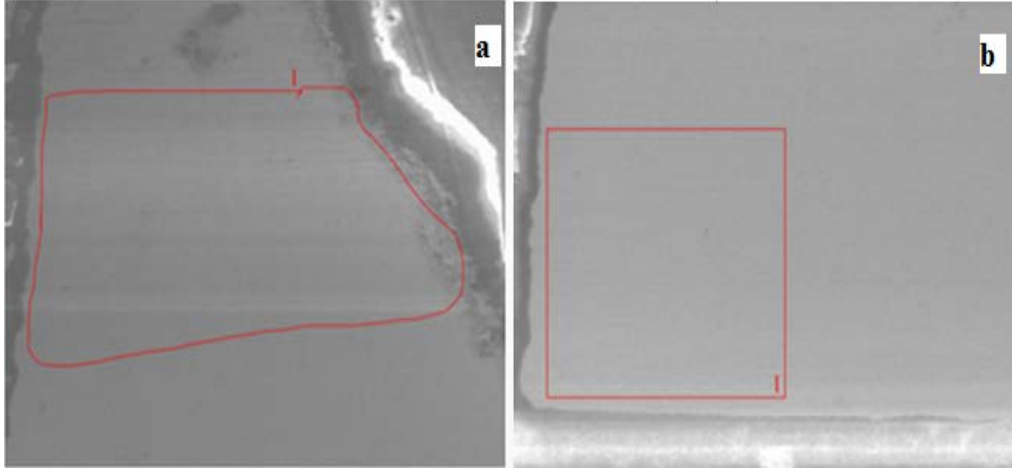
Şekil 5.26 4130-2 döküm uygulamasında yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlek metalinin 2 nolu bölge görüntüsü; a) üst bölge, b) alt bölge



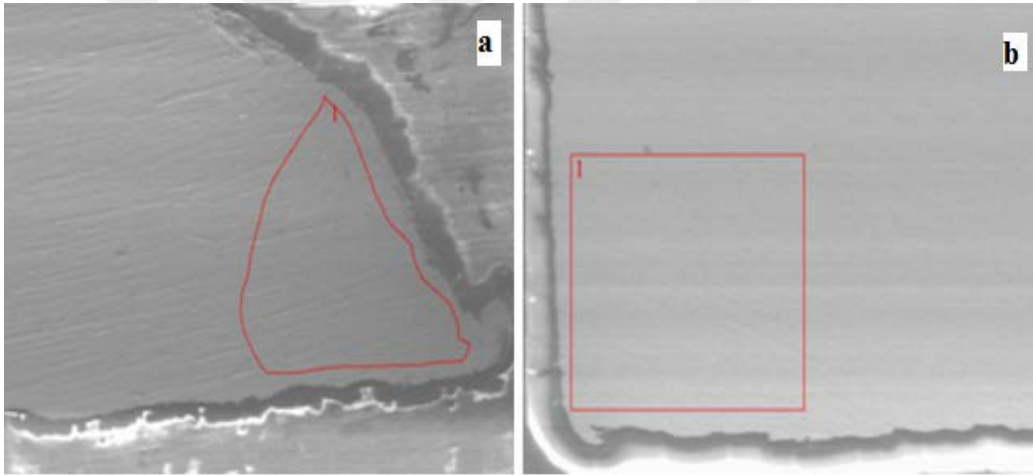
Şekil 5.27 4130-2 döküm uygulamasında yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlek metalinin 3 nolu bölge görüntüsü; a) besleyici gömleğe temas eden yüzey, b) iç kısım

Karbon çeliği döküm uygulamasında yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlek kullanılan çalışmada 2 nolu bölgede besleyici altı (2 nolu üst bölge) ve bağlantı kısmı (2 nolu alt bölge) olarak adlandırılan bölgeler incelendiğinde boşluk boyutlarının benzer olduğu ancak besleyici altı olarak adlandırılan bölgede boşluk miktarının fazla olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.26). 3 nolu bölgede gömleğe temas eden mikro yapı görüntüsü incelendiğinde 4130-1 döküm uygulamasına benzer şekilde mikro yapının bozulmadığı ancak boşluk miktarının daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 5.27).

Döküm uygulamalarından kullanılan yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin metali ile etkileşimini incelemek amacıyla EDS analizi yapılmıştır (Şekil 4.3 3 nolu bölge). EDS analizinde yararlanılan görüntüler Şekil 5.28 ve Şekil 5.29’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 5.4).



Şekil 5.28 AISI 4130-1 döküm uygulaması 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 5.29 AISI 4130-1 döküm uygulaması 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 5.3 AISI 4130 alaşımlı besleyici metallerinin EDS sonuçları

Besleyici Gömlek	3 numaralı bölge	
	Besleyici gömleğe temas eden bölge	İç kısım
AISI 4130-1-OE-1	Fe 96.145 wt.% Ni 0.697 wt.% Al 0.208 wt.% S 0.000 wt.% P 0.450 wt.% Mo 2.500 wt.% 100.000 wt.%	Fe 97.192 wt.% Ni 0.966 wt.% Al 0.149 wt.% S 0.000 wt.% P 0.190 wt.% Mo 1.503 wt.% 100.000 wt.%
AISI 4130-1-YE-1	Fe 95.493 wt.% Ni 0.607 wt.% S 0.000 wt.% P 0.375 wt.% Mo 3.204 wt.% Al 0.321 wt.% 100.000 wt.%	Fe 98.169 wt.% Ni 0.534 wt.% S 0.000 wt.% P 0.072 wt.% Mo 1.173 wt.% Al 0.052 wt.% 100.000 wt.%

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 Gömleklerin Termofiziksel Özellikleri

Kalıp tasarımında etkin kullanılabilmesi açısından besleyici gömleklerin ısı özellikleri büyük önem taşımaktadır. Besleyici gömleklere uygulanan ısı karakterizasyon testleri ile gömleklerin tüm ısı özellikleri belirlenmiştir.

5.2.1 Açık Atmosfer Yanma Özellikleri

Yakma testleri ile hava ortamında karşılaştırmalı olarak besleyici gömleklerin yanma davranışları karşılaştırılmıştır. Elde edilen en yüksek sıcaklık değeri, soğuma rejimi ve reaksiyonun süresi gibi parametreler göz önünde bulundurularak gömlekler incelenmiştir. Tablo 5.4’de verilen karşılaştırmalı değerler incelendiğinde orta

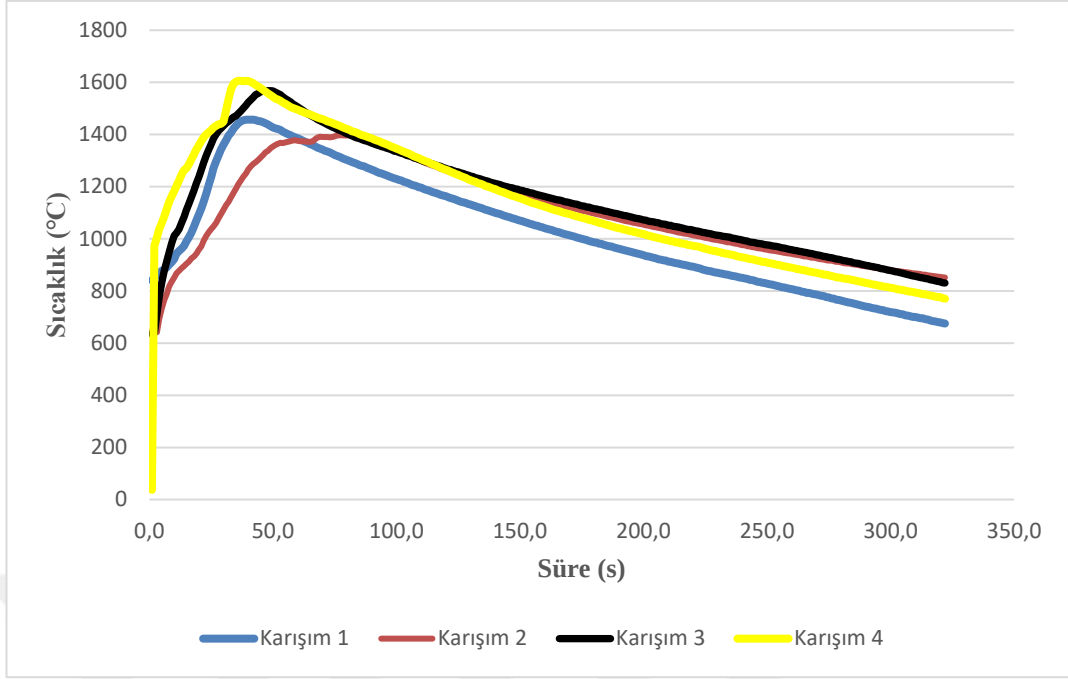
ekzotermik besleyici gömleklerde Karışım 2, Karışım 1'e göre daha önce en yüksek sıcaklık değerine ulaşmıştır. Fakat Karışım 2 göreceli olarak daha yüksek sıcaklığa çıkmıştır. Soğuma rejimleri incelendiğinde ise yine Karışım 2 daha yavaş soğumuştur. Böylece tuttuğu ısıyı daha yavaş etrafına yaymıştır (Şekil 5.27).

Tablo 5.4 Yakma testleri karşılaştırmalı sonuçları

Besleyici Gömlek	Görülen En Yüksek Sıcaklık (°C)	En Yüksek Sıcaklığın Görüldüğü Süre (s)	Soğuma Rejimi (°C/s)
Karışım 1	1580	115	4,76
Karışım 2	1500	74	5,76
Karışım 3	1620	66	2,67
Karışım 4	1680	42	6

Yüksek ekzotermik özellikli karışımlar, orta ekzotermik karışımlara göre daha yüksek sıcaklıklara çıkmaktadır. İçerdikleri ekzotermik eleman miktarı çıkılan sıcaklıkta önemli rol oynamaktadır. En yüksek sıcaklığın görüldüğü sürelerin belirlenmesinde ise kullanılan ateşleyici tipi öne çıkmaktadır. Yüksek ekzotermik karışımlardan Karışım 4, Karışım 3 göre daha kısa sürede, daha yüksek sıcaklığa çıkabilmiştir. Bu da ekzotermik reaksiyonun daha önce geliştiğinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Fakat çalışmalar açık atmosferde gerçekleştirildiği için, oksitleyicilerden gelen oksijenden çok daha fazla oksijen havadan sağlanabilir (Şekil 5.30) (Hua ve ve diğer., 2006)

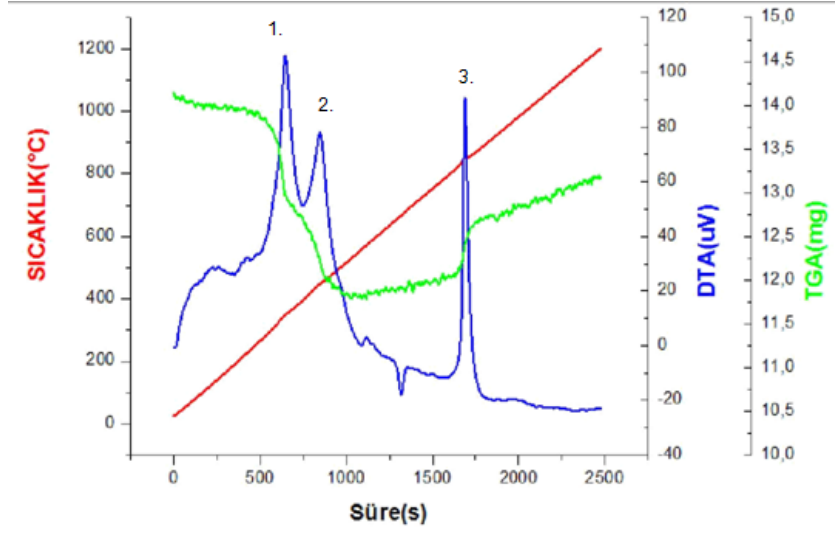
Döküm ortamında kalıp içerisinde bulunan besleyici daha fakir bir oksijen ortamında reaksiyona girdiği düşünülürse, yakma testleri göreceli fikir elde edilmesi açısından öne çıkmaktadır.



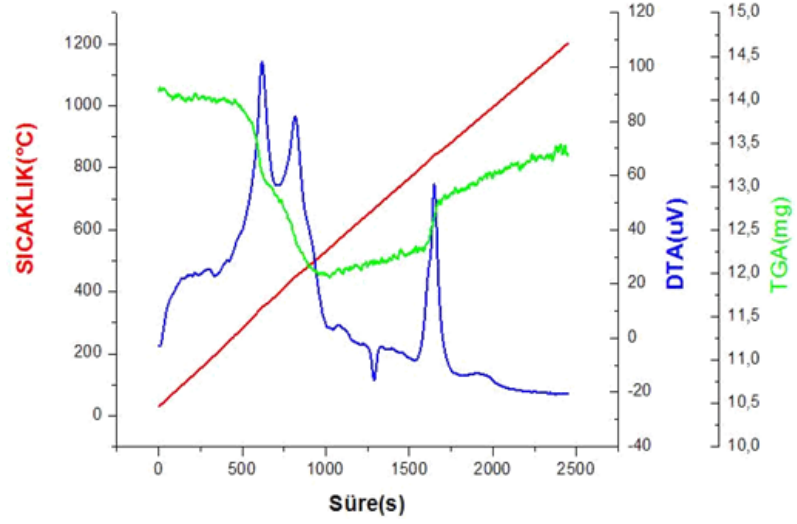
Şekil 5.30 Besleyici gömlek karışımlarının açık atmosfer yanma davranışına etkisi

5.2.2 Besleyici Gömlek Reaksiyon Süreçleri

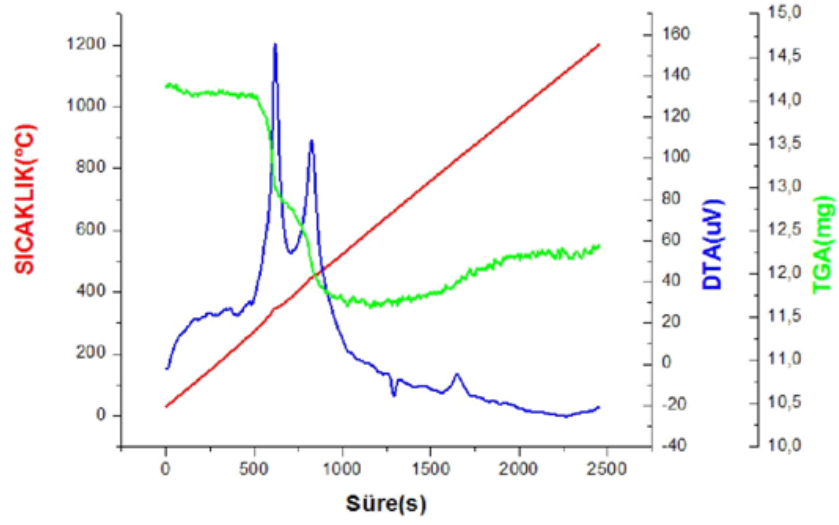
Analizler en son ekzotermik reaksiyon pikinin tamamlandığı 1200 °C'ye kadar yapılmıştır. Döküm şartlarında besleyici gömleklerin çok hızlı ısındıkları bilinmektedir. Benzer şartları karşılayabilmek için ısıtma rejimi 30 °C/dk olarak seçilmiştir. DT-TG analizleri ile birim ağırlık başına verilen enerji, reaksiyon sıcaklıkları ve süreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca DTA değerleri ile reaksiyonların kinetikleri hakkında ön görüde bulunulabilmesi düşünülmüştür. Tüm karışımlar için verilen DT-TG analizi sonuçları yapılan tüm ölçümlerden alınan temsili grafiklerdir. DT(mavi eğri) - TG(yeşil eğri) analiz sonuçları sıcaklık değişimleri(kırmızı eğri) ile birlikte zaman bağlı olarak Şekil 5.31-Şekil 5.42'de verilmiştir. Literatürde belirtildiği gibi gömleklerin ekzotermik karakterli olmasını sağlayan metalotermik reaksiyon (3. pik) 800 °C civarında ortaya çıkmaktadır. Daha önceki ekzotermik reaksiyonlar ise polimerik bağlayıcının yanması (1. pik) ve ateşleyicinin ayrışması (2. pik) sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir. Bölgesel farklılıkların oluşması ise gömleklerin üretim yöntemine ve karışımın hazırlanma biçiminden dolayı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.31 Karışım 1, A bölgesi DTA-TGA grafiği

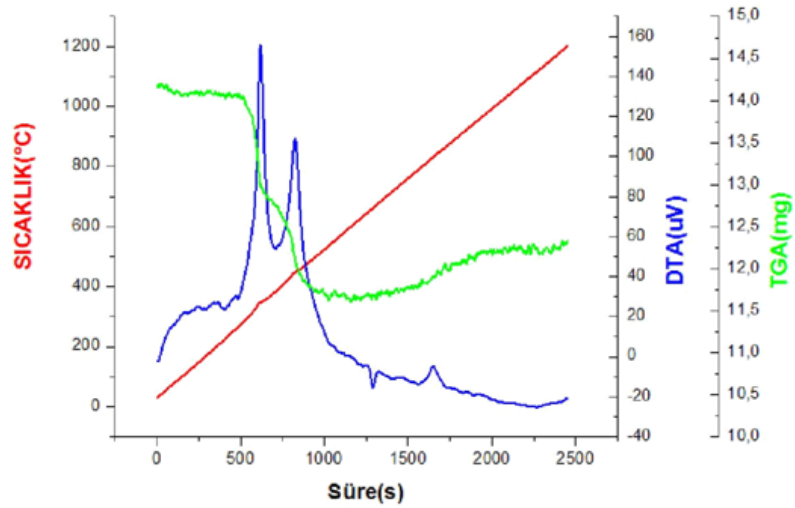


Şekil 5.32 Karışım 1, B bölgesi DTA-TGA grafiği

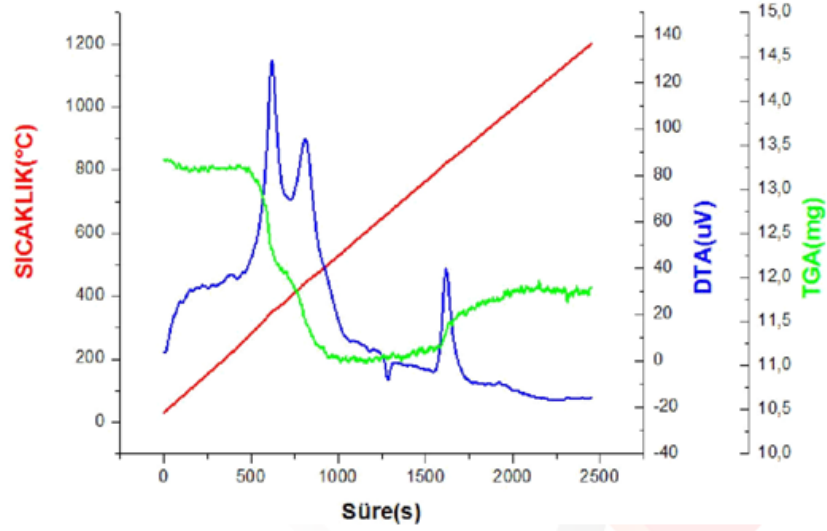


Şekil 5.33 Karışım 1, C bölgesi DTA-TGA grafiği

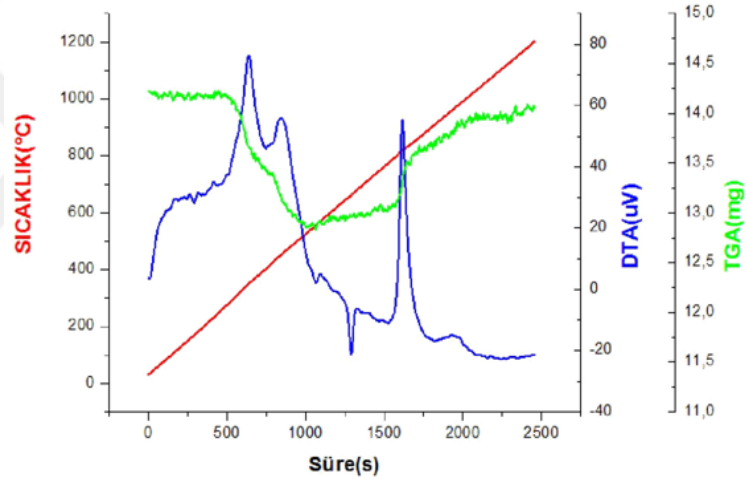
Karışım 2'ye ait DT-TG analizleri sonucunda elde edilen grafikler Şekil 5.34, Şekil 5.35 ve Şekil 5.36'da verilmiştir. Karakteristik olarak Karışım 1'e benzer sonuçlar elde edilmiştir. Fakat gömleklerin verdiği enerjinin önemli bir kısmını oluşturan esas ekzotermik reaksiyon olan sıcaklıklarının ve sürelerinin farklı olduğu görülmektedir. Karışım 2'de kullanılan ateşleyiciye bağlı olarak Karışım 1'e göre metalotermik reaksiyondan önce gerçekleşen ekzotermik reaksiyon sonucu elde edilen ve verdiği enerji daha yüksek olmakla birlikte oluşma süresi daha kısadır.



Şekil 5.34 Karışım 2, A bölgesi DTA-TGA grafiği



Şekil 5.35 Karışım 2, B bölgesi DTA-TGA grafiği

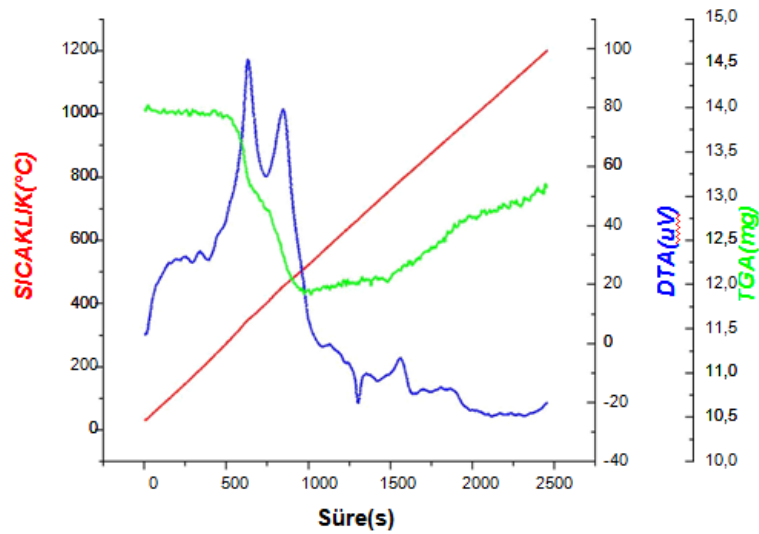


Şekil 5.36 Karışım 2, C bölgesi DTA-TGA grafiği

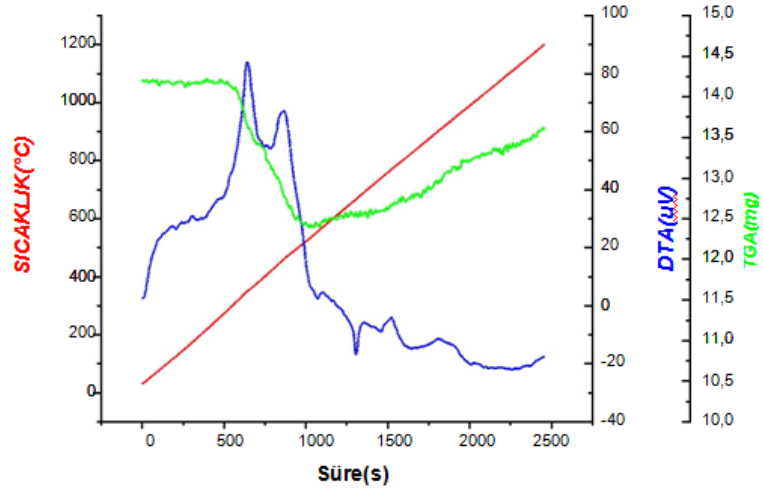
Elde edilen DTA eğrileri üzerinden ekzotermik reaksiyonların süreleri ve açığa çıkan enerjiler incelenmiştir. Tablo 5.5’de görüldüğü gibi Karışım 2 içerisindeki ateşleyici daha hızlı parçalanarak soldan sağa DTA eğrisi üzerinde birinci ve ikinci ekzotermik pikin Karışım 1’e göre daha önce ortaya çıkmasını sağlamıştır (Hua ve diğ., , 2006). Tablodaki değerler çoklu ölçümler sonucunda elde edilen ortalama değerlerdir. Döküm şartları düşünüldüğünde, sıvı metal besleyici gömleğe temasından hemen sonra gerçekleşen bir ekzotermik reaksiyon ile soğuk yüzey etkisi azaltılabilecektir. Böylece sıvı metalin nispeten daha sıcak bir yüzeye teması sağlanarak soğuma süresinde gecikmelerin önü açılabilir. Yine döküm

şartlarında bahsedilen süreler saniye mertebesinde gerçekleşmektedir. Fakat katılaşma mekanizmaları dikkate alındığında özellikle dar bir katılaşma aralığında katılaşan metallerde beslenebilme açısında oluşan soğuk yüzeyler önem kazanmaktadır. Katılaşmanın sıvı metal içerisine doğru ilerlemesinde önce ekzotermik reaksiyon ile kısmi ısınma ardından yalıtım özelliği ile mevcut ısının geç salınması önem kazanmaktadır. Özellikle yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömleklerde ani olarak metalin yüksek bir enerji ile ısıtılması önem kazanmaktadır. Bu nedenle orta ekzotermik özellikli gömlekler daha çok büyük hacimli besleyici sistemlerinde tercih edilirken, yüksek ekzotermik özellikli gömlekler küçük ve kapalı besleme sistemlerinde tercih edilmektedir.

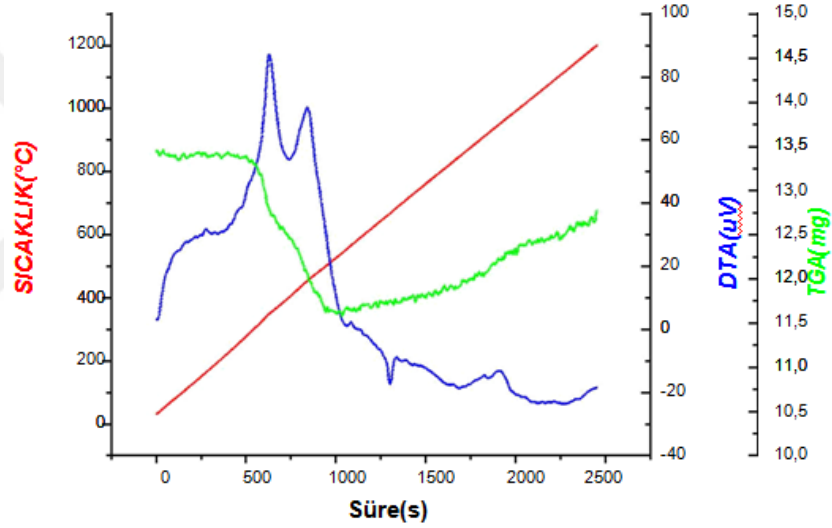
Karışım 3'ün kullanıldığı kapalı besleyici gömleğin farklı bölgelerinden çıkartılan numunelerin DTA-TGA sonuçları Şekil 5.37, Şekil 5.38 ve Şekil 5.39'da verilmiştir. DTA ve TGA grafikleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde önce ağırlık düşüşünün olduğu bölgelerde, daha sonra ağırlık artışının olduğu bölgelerde ekzotermik pikler görülmektedir. Piklerin daha yüksek DTA değerlerine çıkması ve altında kalan alanların daha geniş olması gömleklerin verdikleri enerjilerin orta ekzotermik gömleklere göre daha yüksek olduğunun göstergesidir. Söz konusu veriler ve reaksiyon gözlemlenen süreler Tablo 5.5'de görülmektedir.



Şekil 5.37 Karışım 3, A bölgesi DTA-TGA grafiği

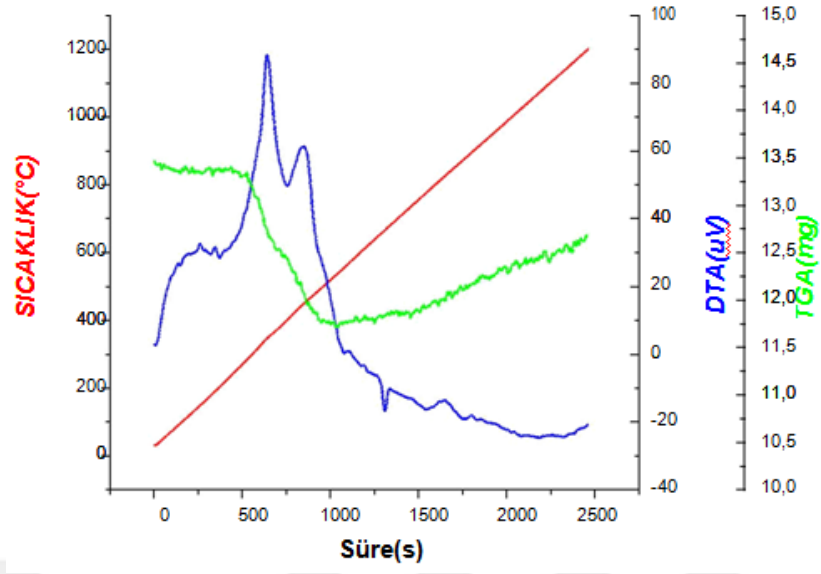


Şekil 5.38 Karışım 3, B bölgesi DTA-TGA grafiği

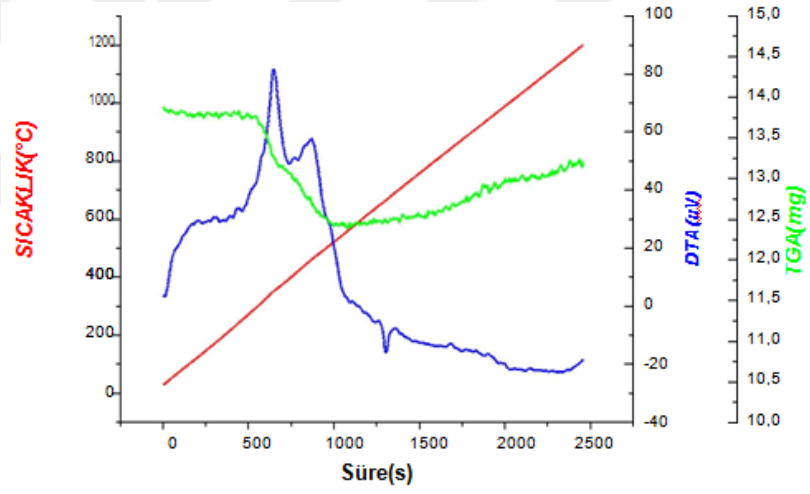


Şekil 5.39 Karışım 3, B bölgesi DTA-TGA grafiği

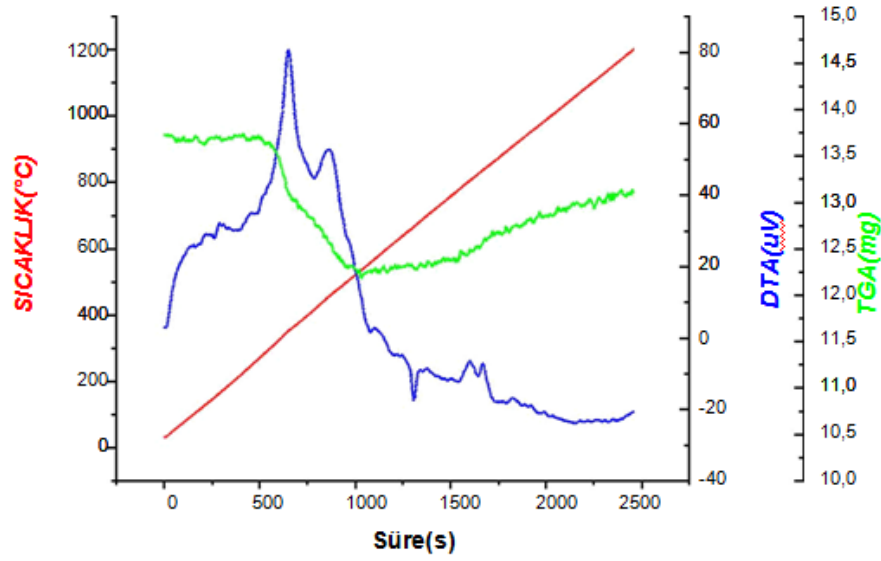
Karışım 4'e ait DT-TG analiz sonuçları Şekil 5.40, Şekil 5.41 ve Şekil 5.42'da verilmiştir. Sonuç grafiklerinin Karışım 3'e ait grafiklerle benzerlik gösterdiği görülmektedir. Farklı olarak ateşleyicinin parçalanması sonucu ortaya çıkan ısının yüksekliği ve ve diğer., ateşleyiciye göre daha hızlı parçalanma gösterdiği için ilk piklerin durumları farklılık göstermektedir. Pikler hem daha önce oluşmakta hem de nispeten daha yüksek değerlere çıkarak altlarında daha geniş bir alan bırakarak sonlanmaktadır. Böylece ortaya çıkan enerjinin biraz daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.40 Karışım 4, A bölgesi DTA-TGA grafiği



Şekil 5.41 Karışım 4, B bölgesi DTA-TGA grafiği



Şekil 5.42 Karışım 4, C bölgesi DTA-TGA grafiği

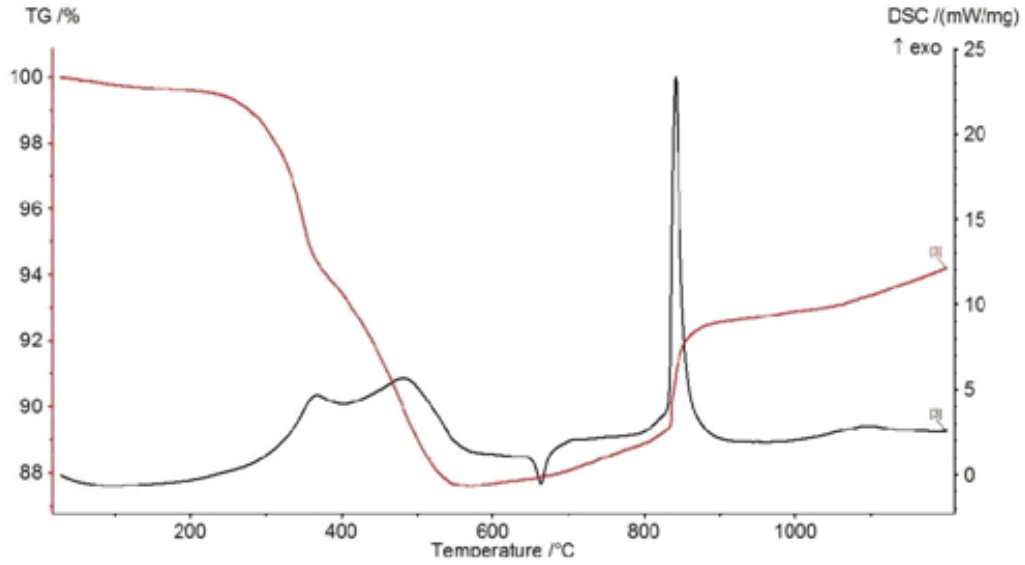
Tablo 5.5 DT-TG analizleri sonuçlarının karşılaştırması

Karışımlar	Ortalama Verdiği Enerji (kJ/kg)	Reaksiyon gerçekleşme süresi (s)	Reaksiyon gerçekleşme sıcaklığı (C)
Karışım 1	3800	26	810
Karışım 2	3700	25	805
Karışım 3	5200	25	755
Karışım 4	5400	24	760

Metalik alüminyum ve metal oksitler (demir oksit ve mangan oksit) arasında gerçekleşen esas ekzotermik reaksiyonda (3. pik) ısı verimi reaksiyona giren elemanlara bağlıdır. Reaksiyon elemanlarının boyutları ve miktarı reaksiyon kinetiğini değiştirmekte ve elde edilen enerjiyi etkilemektedir (Tablo 5.5). Alüminyum tozlarının oksit kalınlıkları ve oksit tabakasının kırılarak metalotermik reaksiyonun ilerlemesi için kullanılan ateşleyiciler ekzotermik reaksiyonun oluşumunu etkilemekte ve çıkan enerji miktarını elde edilen ürünlere göre X-ışınları kırınım analizinde değinildiği gibi değiştirmektedir (Mei, 1999; Dures ve ve diğer., 2007).

DSC analizleri ile DT-TG analizlerinin karşılaştırılması yapılarak verilen ısı değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Karışım 1 için elde edilen DSC eğrileri TGA eğrileri ile birlikte Şekil 5.43’da verilmiştir. DTA eğrileriyle uyumlu olarak yukarı doğru olan ekzotermik pik 800 °C civarında oluşmuştur. Fakat

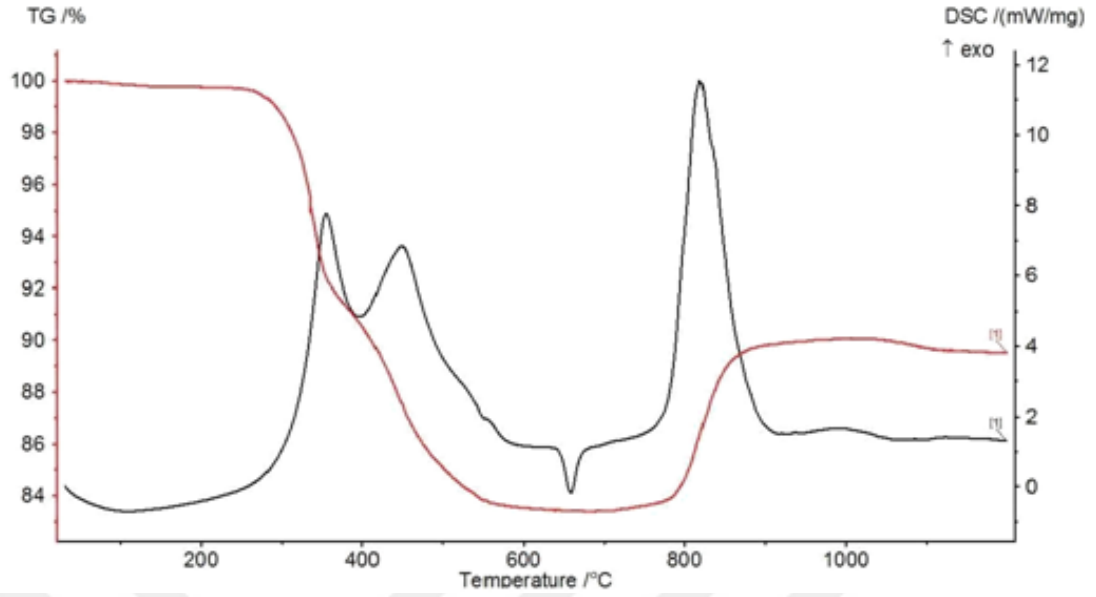
ilk ekzotermik piklerin şiddeti nispeten daha azdır. Bu da söz konusu piklerden daha az enerji elde edildiğinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir.



Şekil 5.43 Karışım 2 DSC grafiği

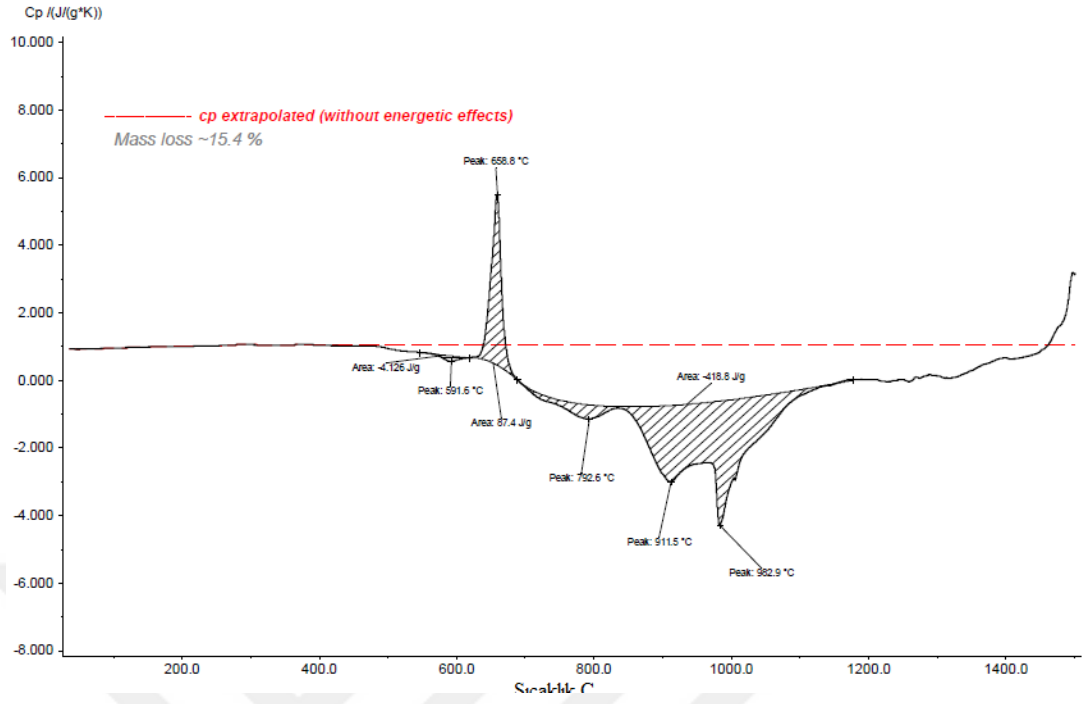
Karışım 2'ye ait DSC eğrileri Şekil 5.44'de verilmiştir. Karışım 1'e göre ilk ekzotermik piklerden belirgin bir artış vardır. Ayrıca 800 °C civarlarındaki esas ekzotermik pikin altında daha geniş bir alan kalmaktadır. Bununla birlikte esas ekzotermik reaksiyonun DSC değeri daha düşük değerlerde kalmaktadır. Bu durumda DTA sonuçlarının doğrulaması reaksiyon sonucu verilen ısı miktarı birbirine çok yakındır.

DSC pik değerlerindeki farklılık kullanılan ateşleyicinin etkinliğinden ve reaksiyon kinetiğinden kaynaklanmaktadır. Karışım içerisinde ateşleyici ve demir oksit, mangan oksit ile metalik alüminyumdan oluşan ekzotermik elemanların dağılımı ile partikül boyutları ve topaklanma davranışları reaksiyon kinetiğini değiştirmektedir. Dolayısıyla aynı miktardaki alüminyum farklı ateşleyiciler sayesinde daha önce reaksiyona girerek, daha fazla enerji vermesi sağlanabilir.

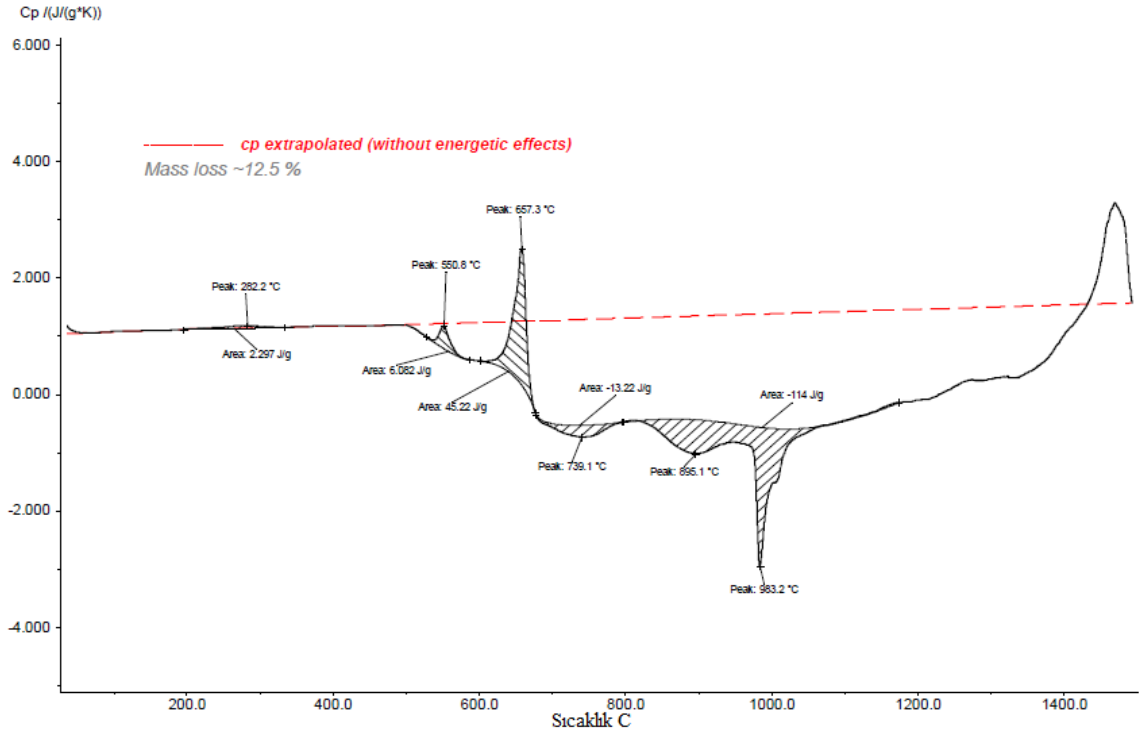


Şekil 5.44 Karışım 4 DSC grafiği

DSC analizleri ile numunelerin özgül ısı (C_p) değerleri de elde edilebilmektedir. Şekil 5.45 ve Şekil 5.46’da orta ekzotermik özelliklere ait bu sonuçlar verilmektedir. Özgül ısı ölçümlerinde esas olan numunede herhangi bir reaksiyonun gerçekleşmemesidir. Sonuçta kompozit bir yapıya sahip olan gömlek numunesinin tamamının özgül ısı değeri ölçülebilmiştir. Genel olarak yalıtım özellikli malzemelere yakın değerler elde edilmiştir (Jeffrey ve ve diğer., , 2012). Ayrıca literatürdeki benzer çalışmalarda gömlek özgül ısı değerleri ile aynı değerlerin elde edildiği söylenebilir. Böylece daha önce karakterize edilen ekzotermik özelliklere ek olarak yalıtım özellikleri de ortaya konmuştur. Özgül ısı değerleri ısı iletkenlik testleri ile birlikte verilmiştir.



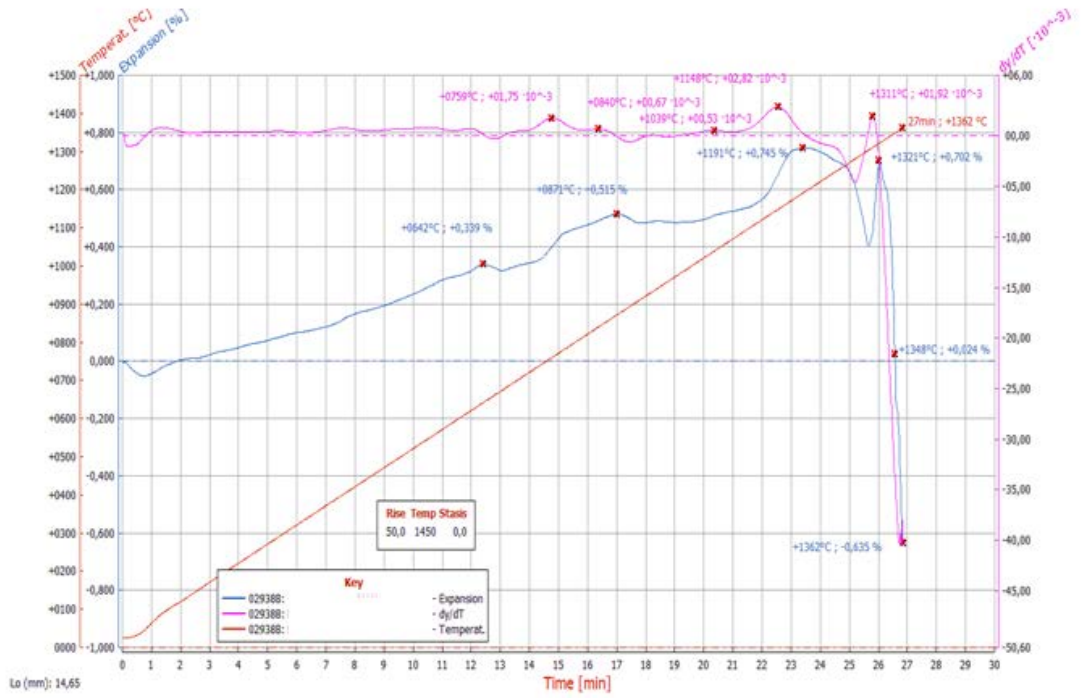
Şekil 5.45 Karışım 2 için özgül ısının sıcaklıkla değişimi



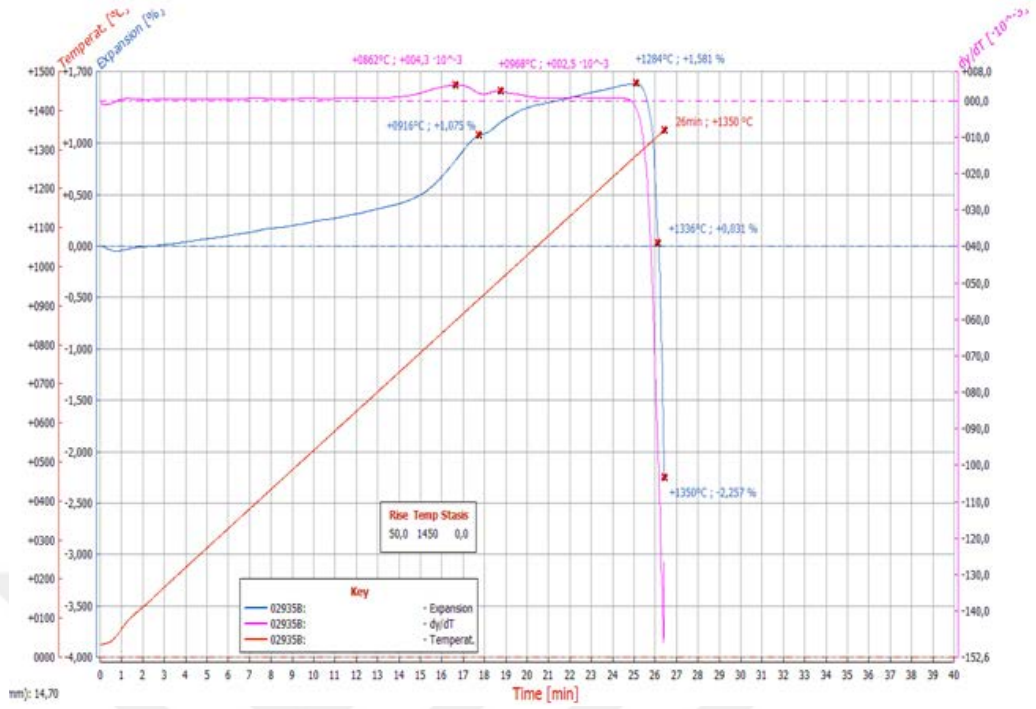
Şekil 5.46 Karışım 4 için özgül ısının sıcaklıkla değişimi

5.2.3 Isıl Genleşme Özellikleri

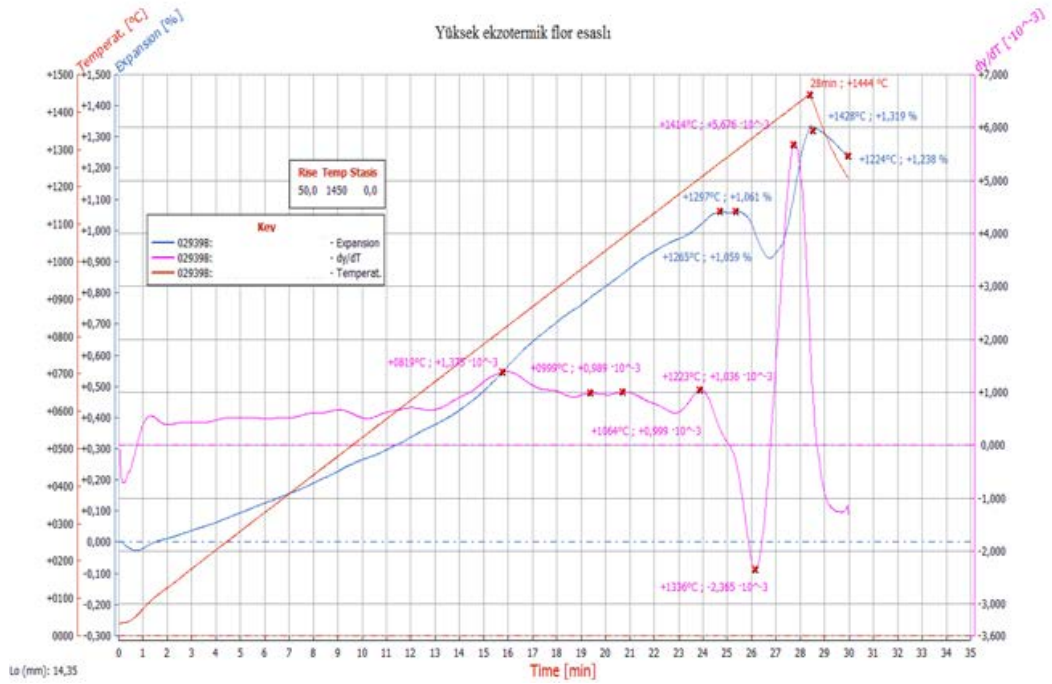
Dilatometre analizi besleyici gömlek boyutlarının sıcaklıkla nasıl değiştiği belirlemek amacıyla yapılmıştır. Karışım 1 ve Karışım 4'ün yalıtım elemanı bileşenini yün olduğu bilinmektedir. Boyut değişimleri incelendiğinde mineral yünün ergime sıcaklığına yakın sıcaklıklarda büzülmelerin ve sinterlenmelerin meydana geldiği görülmektedir (Şekil 5.47, Şekil 5.50). Fakat fiber yalıtım elemanı içeren besleyici gömlek numunelerinde yüksek sıcaklık dayanımının daha iyi olduğu görülmektedir. Fiber içeriğindeki yüksek alümina silikat yapı sinterlenmeyi öteleyerek gömlek yapısının büzülmesinin önüne geçmektedir (Şekil 5.49, Şekil 5.50) (Perez ve diğ., 2012; Sola, 2014). Besleyici gömleklerin DTA sonuçları ve dilatometre eğrileri incelendiğinde sıcaklığın artması ile besleyici gömlek yoğunlukların azaldığı belirlenmiştir.



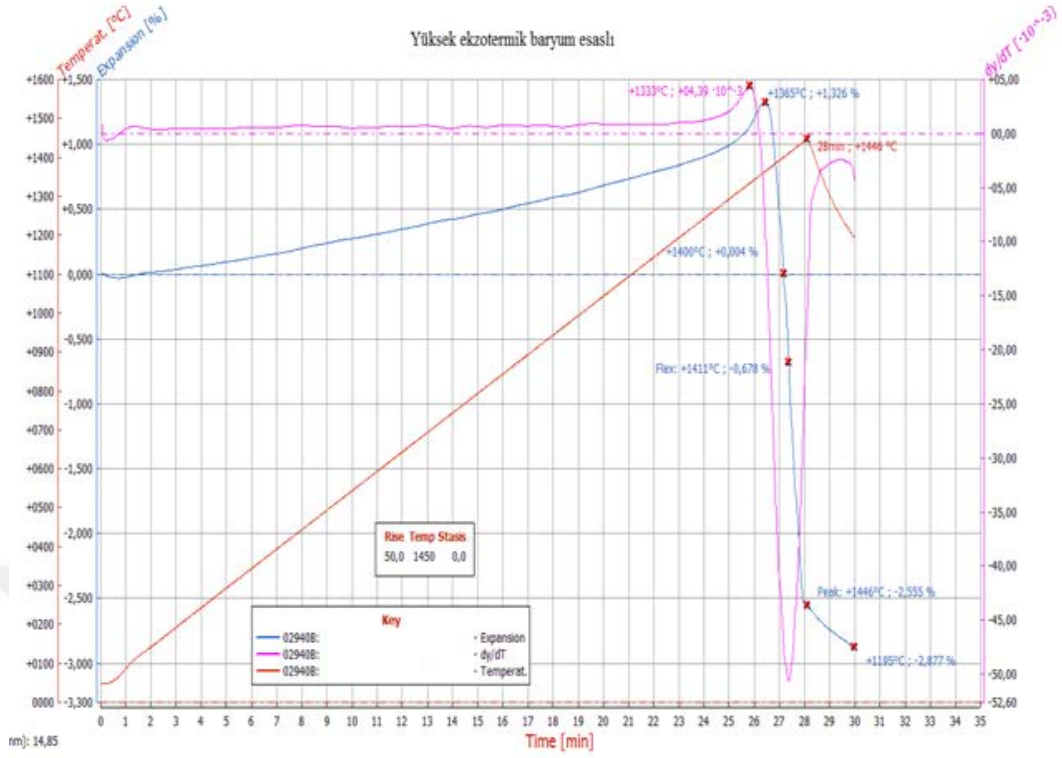
Şekil 5.47 Karışım 1 için besleyici gömlekte genleşme oranının sıcaklıkla değişimi



Şekil 5.48 Karışım 2 için besleyici gömlekte genleşme oranının sıcaklıkla değişimi



Şekil 5.49 Karışım 3 için besleyici gömlekte genleşme oranının sıcaklıkla değişimi

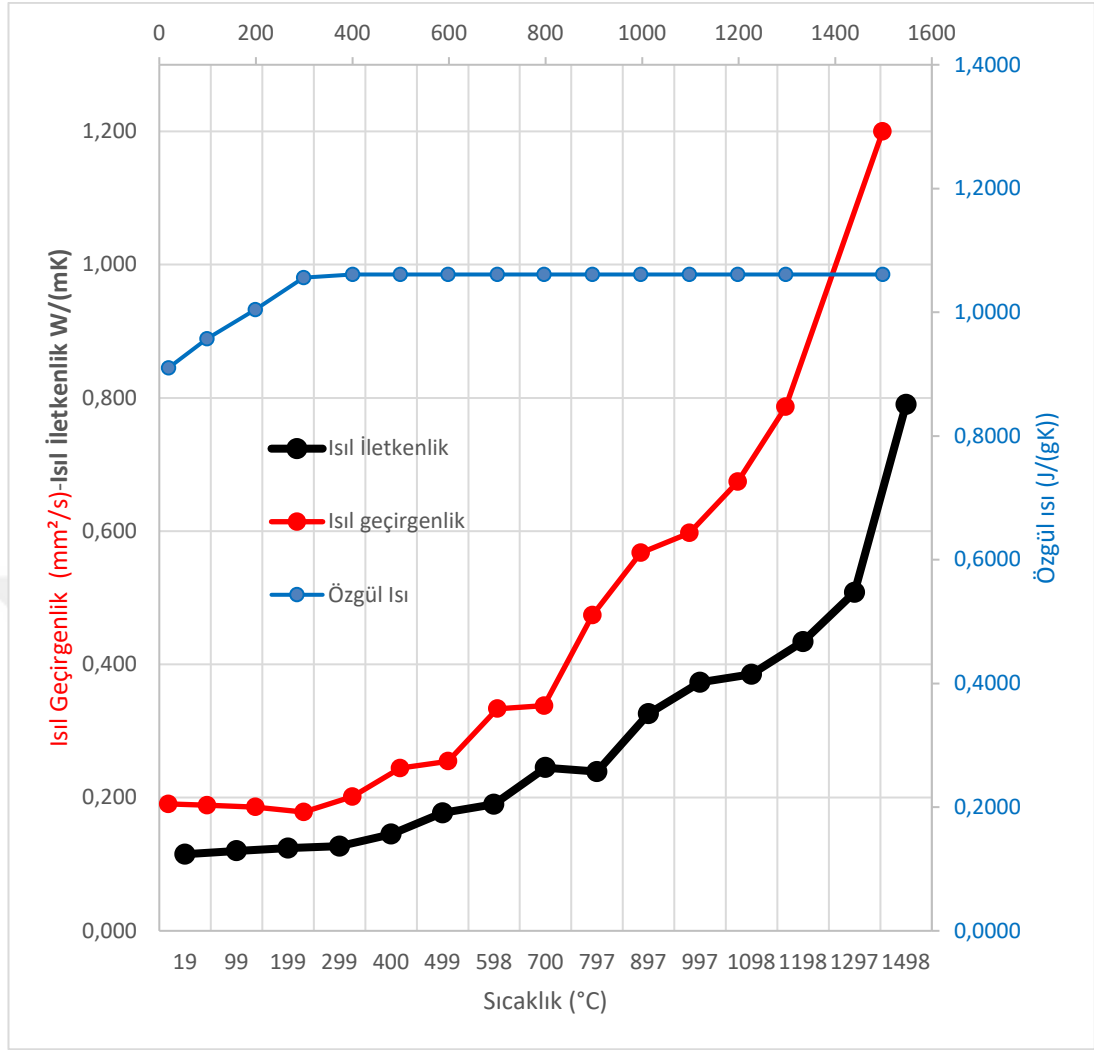


Şekil 5.50 Karışım 4 için besleyici gömlekte genleşme oranının sıcaklıkla değişimi

5.2.4 Isıl İletkenlik ve Geçirgenlik Özellikleri

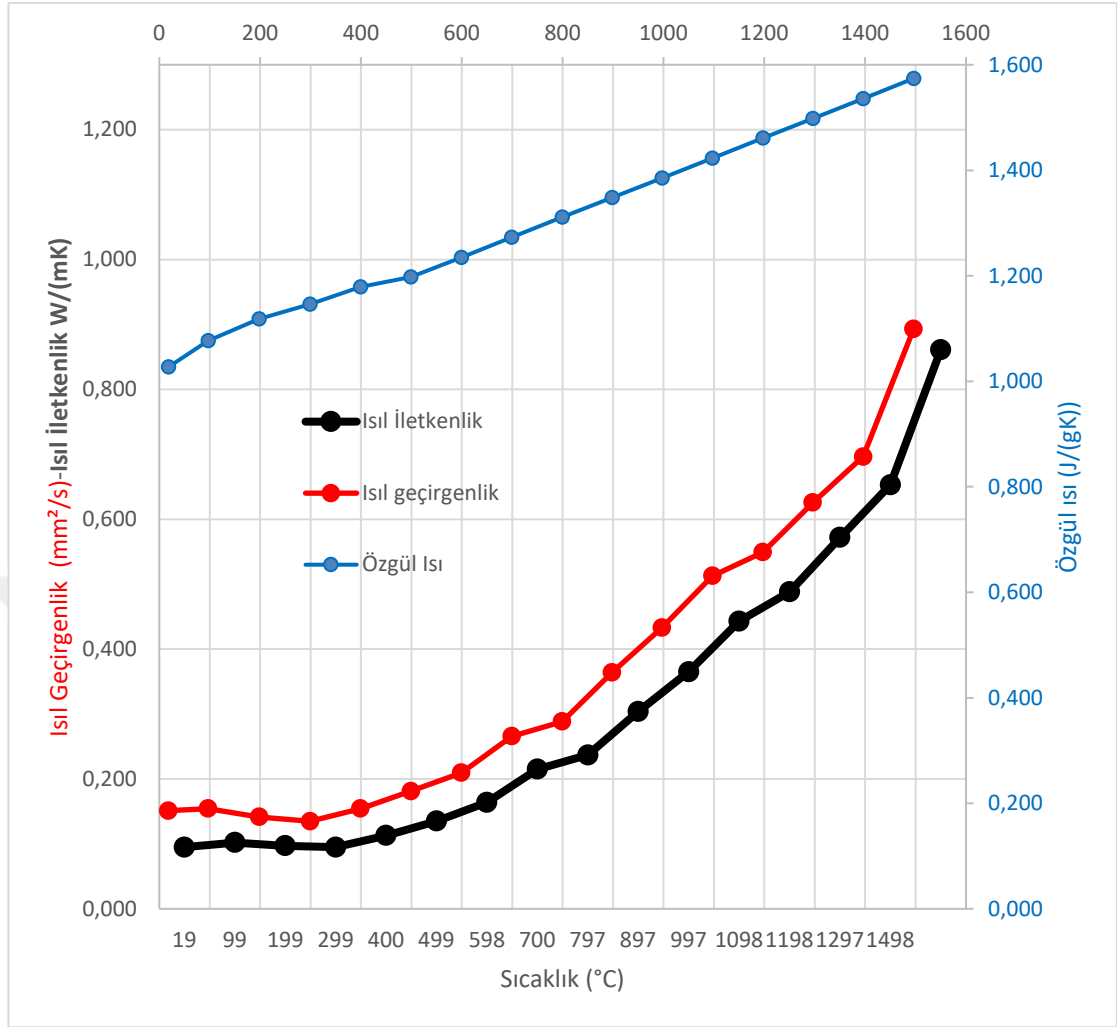
Gömlek içerisindeki sıvı metalin soğuması en etkin parametrelerden biri de ısı iletkenlik ve geçirgenliktir. Gömlek malzemeleri hem ekzotermik hem de yalıtım esaslı malzemeler olduğundan ekzotermik tepkime öncesi ve sonrasında bahsedilen ısı özellikler değişiklik göstermektedir. Gömlekteki asıl ekzotermik tepkime olan metalotermik tepkime sonrasında oluşan ürünler de ısı iletkenlik ve geçirgenlik üzerine doğrudan etkilidir.

Yüksek ekzotermik özellikli gömleklere tepkime hızlı gerçekleşmekte ve sona ermektedir. Böylece reaksiyon elemanları daha hızlı oluştuğundan, ısı geçirgenlik bir süre sonra sabit kalmaktadır. Gömlek bileşiminde bulunan diğer yalıtım elemanlarının da etkisi ile ısı iletkenlik, özgül ısı değişimi ile aynı davranışı göstermektedir (Şekil 5.51).



Şekil 5.51 Karışım 4-besleyici gömleğinde ısı geçirgenlik, ısı iletkenlik ve özgül ısının sıcaklıkla değişimi

Orta ekzotermik besleyici gömlelerde, yüksek ekzotermik gömlelerin aksine tepkime daha yavaş ve uzun süre de gerçekleşmektedir. Bu durumda ısı geçirgenlik tepkimeye bağlı olarak sürekli bir artış göstermektedir (Şekil 5.52).



Şekil 5.52 Karışım 2-besleyici gömleğinde ısı geçirgenlik, ısı iletkenlik ve özgül ısının sıcaklıkla değişimi

5.3 Geometrik Tasarımı Yapılan Gömlekler

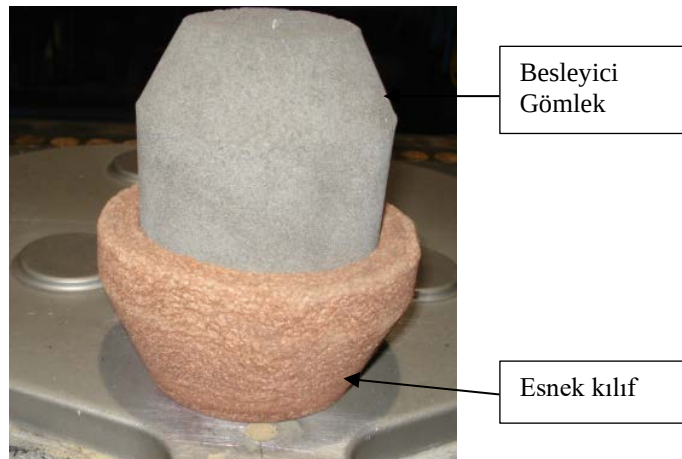
Geometrik tasarım çalışmaları otomatik yüksek basınçlı kalıplama hatlarında kullanılan yüksek ekzotermik özellikli ve partikül bazlı kırılğan yapıdaki besleyici gömleklerin kalıplama basınçları altında hasara uğramalarını engellemek üzere gerçekleştirilmiştir. Yeni geliştirilen tasarım besleyici gömlek ve yalıtım özellikli yardımcı elemandan oluşan bir sistemdir (Şekil 5.53).

Yardımcı elemanın asıl amacı kırıcı maçadan farklı olarak besleyici metalin parçadan kolay ayrılmasını sağlamak değil sünek yapısı sayesinde kırılğan yapıdaki gömlek üzerine kalıplama sırasında düşen yükü sönümlemektir. Bu nedenle yardımcı

elemanın yapısı yüksek gözenekli ve esnemeye uygun olarak çoğunluklu olarak yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik liflerlerden oluşturulmuştur. Hem bileşiminde kullanılan malzeme hem de döküm kalıbındaki işlevi gereği kırıcı maça sisteminden tamamen ayrılmaktadır (Birleşik Krallık Patent No. GB2260285A, 1992).

Geliştirilen yardımcı eleman, çakışma olduğu diğer farklı olarak besleyici gömlek üzerine düşen yükü hem esnek yapısı hem de gömlek yan duvarlarına dıştan oluşturduğu sürtünme kuvveti ile sönümlemektedir. Yardımcı elemanın amacı, yüksek basınçlı kalıplarda kullanılan küçük hacme sahip olduğundan içeriğinin tamamının partikül malzemelerden imal edilen ve dolayısıyla kırılabilir yapıya sahip olan besleyici gömleklerin üzerine düşen yükü sönümleyerek gömleğin hasar görmesini engellemektir. Böylece diğer farklı olarak hem yatay hem de dikey esneme ve sürtünme prensibi ile çalışmaktadır. Bahsedilen patentteki yardımcı kademeli kapak çelikten pres sac şekillendirme metodu ile üretilmektedir. Yardımcı eleman ise ağırlıklı olarak seramik lif malzemedan vakum emdirme metodu ile üretilmektedir. Bu durumda da EP 1879710A1 nolu patentten tamamen farklı bir mekanizmaya sahiptir. (Avrupa Patent No. EP 1879710A1, 2008)

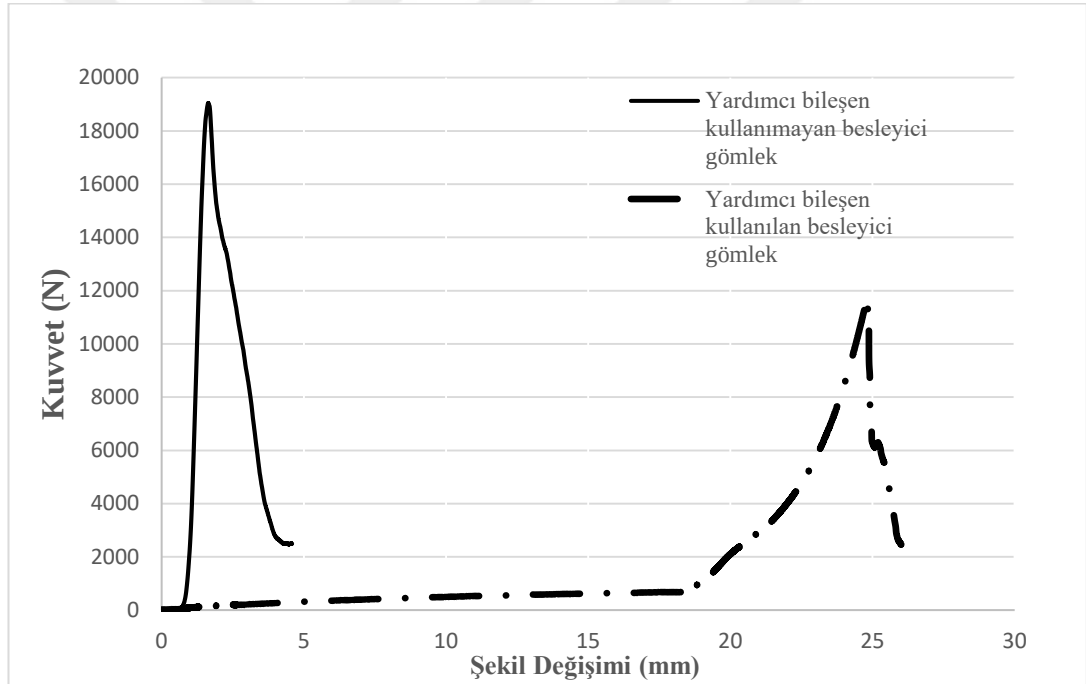
Geometrik tasarım çalışması ile geliştirilen besleyici gömlek koruma sistemi için Ekim 2018 tarihinde PCT/TR2018/050526 nolu patent başvurusu yapılmıştır.



Şekil 5.53 Esnek kılıf uygulaması yapılan besleyici gömlek (Kişisel arşiv, 2019)

Yüksek basınç yaş kum otomatik kalıplama hatlarına uygun olarak geliştirilen besleyici gömleklerin kalıplamada yüklere karşı davranışları basma testi ile belirlenmiştir.

Şekil 5.54’de yardımcı eleman kullanılan ve kullanılmayan gömleklerin basma testi karşılaştırılması verilmiştir. Yardımcı eleman kullanılmayan gömlekte şekil değişimi neredeyse hiç meydana gelmeyecek gömlek hasara uğramaktadır. Fakat yardımcı elemanlı gömlekte yükün büyük bir kısmı esnek koruma elemanı tarafından sönmüldüğünden deformasyon miktarı fazladır. Bu durumda gömleğin hasar alması engellenerek aşırı yüklenme durumunda koruyucu eleman ilk aşamada yan yüzeylerden sürtme, daha sonrasında alt kısımda esneme yaparak yükü sönmülemektedir



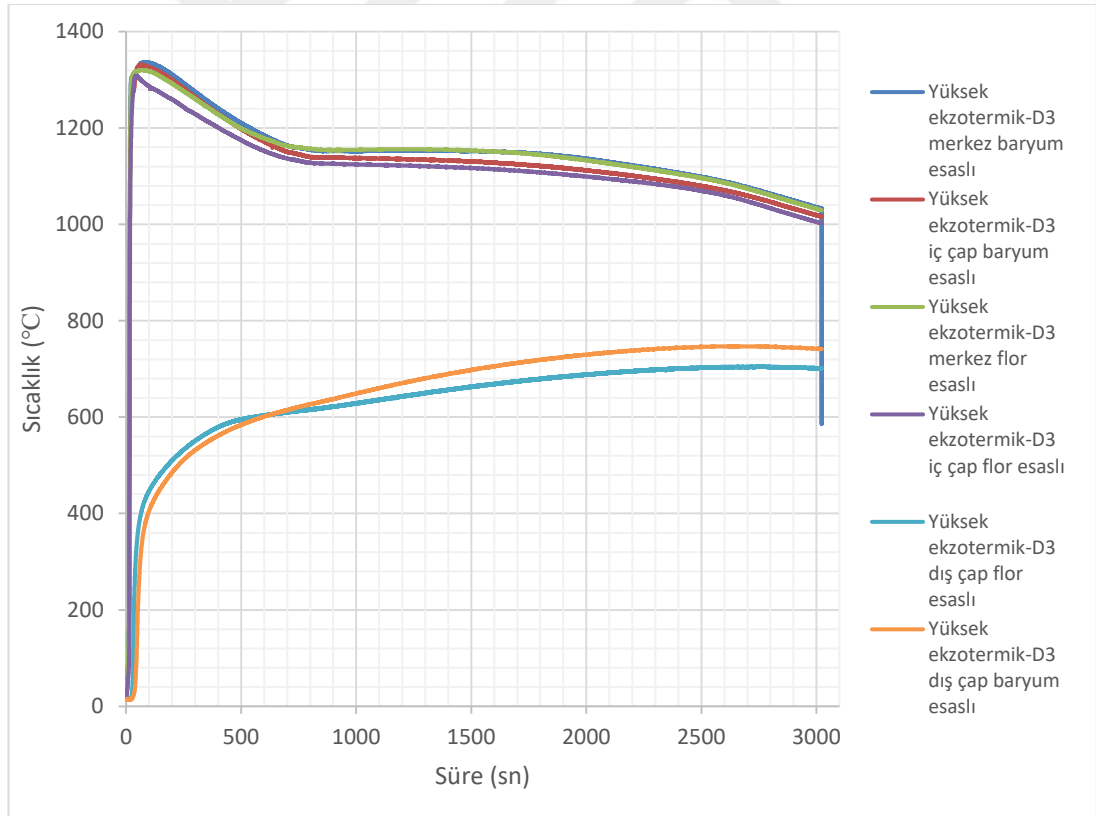
Şekil 5.54 Geleneksel ve yeni tasarımı yapılan mini besleyicilerde kuvvete bağlı şekil değişimi

5.4 Döküm Uygulamalarının Karşılaştırmalı Sıcaklık Ölçümü Sonuçları

Deneme döküm sırasında 4 farklı alaşım için soğuma grafiği verileri toplanmıştır. Besleyici gömleklerin farklı kısımlarından alınan veriler grafikler ve tablolar halinde sunulmuştur.

İlk denemeler KGDD alaşımları ile yapılmıştır. Öncelikle farklı özelliklerdeki yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömleklerin karşılaştırmalı döküm denemeleri gerçekleştirilmiştir. 3 dökümde flor esaslı yüksek ekzotermik besleyici gömlek, daha sonraki 3 dökümde orta ekzotermik besleyici gömlek test edilmiştir.

Yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömleklerin özellikleri değiştirilerek pek çok benzeşim çalışması gerçekleştirilmiştir. Ancak, eğriler incelendiğinde yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlekler için yapılan benzeşim çalışmalarında ölçülen sıcaklık değerlerinde süreksizlikler söz konusudur. Grafiklerdeki bu süreksizlikler ve sıcaklık artışıındaki gecikmeler giderilerek döküm benzeşim çalışmaları tekrarlanmıştır. Deneme dökümlerine nispeten yakın değerlerin elde edildiği 7 adet döküm benzeşim çalışması irdelenmiştir. Yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömleklerin özellikleri detaylı olarak görseller ile yansıtılmıştır.

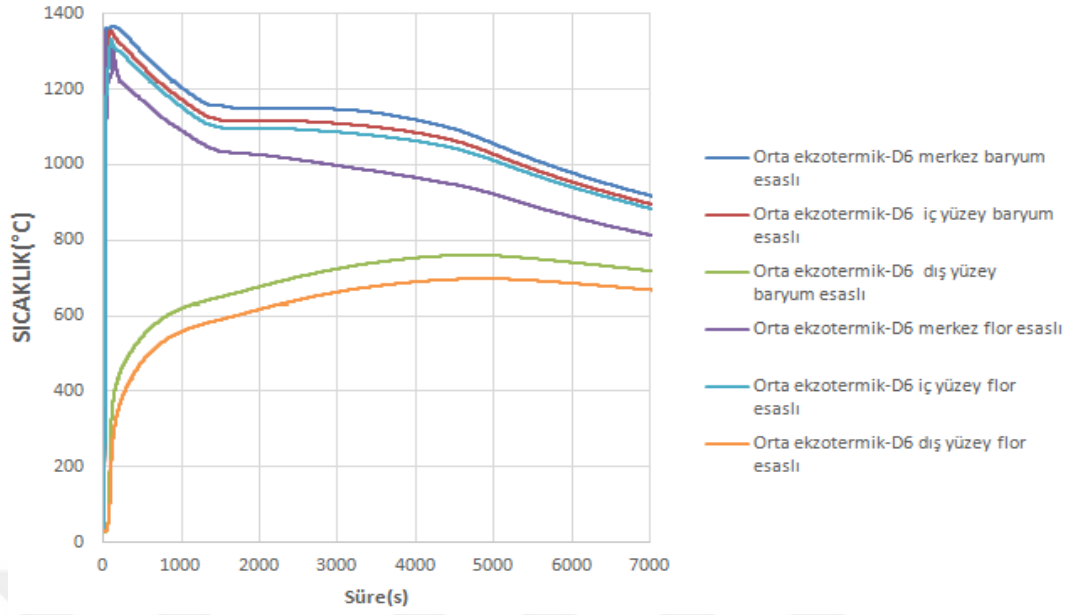


Şekil 5.55 EN-GJS-500 alaşımında Karışım 3 ve Karışım 4 besleyici gömleklerinin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması (D3 nolu döküm)

Tablo 5.6 KGDD döküm uygulamalarında yüksek ekzotermik besleyici gömleklerin soğuma üzerine etkisi

Döküm uygulaması	Besleyici	Erişilen en Yüksek Sıcaklık (°C)	Sıvı Metalin Soğuma Hızı (°C/s)	Sıvı katı aralığındaki soğuma hızı(°C/s)	Katı Metalin Soğuma Hızı (°C/s)
D3 nolu döküm	Karışım 3(merkez)	1320	0,313	0,00	0,072
	Karışım 3(iç yüzey)	1308	0,283	0,016	0,060
	Karışım 4(merkez)	1336	0,337	0,00	0,076
	Karışım 4 (iç yüzey)	1330	0,337	0,014	0,064
D4 nolu döküm	Karışım 3(merkez)	-	-	-	-
	Karışım 3(iç yüzey)	1364	0,237	0	0,044
	Karışım 4(merkez)	1342	0,220	0	0,280
	Karışım 4 (iç yüzey)	1372	0,230	0	0,036
D5 nolu döküm	Karışım 3(merkez)	1373	0,247	0	0,040
	Karışım 3(iç yüzey)	-	-	-	-
	Karışım 4(merkez)	1376	0,257	0	0,020
	Karışım 4 (iç yüzey)	1373	0,257	0	0,030

Yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin eş zamanlı olarak belirlenen bölgelerden yapılan sıcaklık ölçüm sonuçları karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklere benzer şekilde orta ekzotermik besleyici gömleklerin ölçüm sonuçları Şekil 5.56, Ek 4, Ek 5'te D6-D7-D8 olacak şekilde verilmiştir. Orta ekzotermik karakterli besleyici gömleklerin yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömleklerden farklı olarak en yüksek sıcaklık değeri nispeten düşüktür. Ayrıca sıvı fazdaki soğuma hızının yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömleklere göre daha düşük olduğu söylenebilir. Orta ekzotermik karakterli iki farklı türdeki besleyici gömleklerin döküm sonrası en yüksek sıcaklık değerleri incelendiğinde, yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömleklerde olduğu gibi baryum esaslı gömleklerin sıcaklık değerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 3.2'de flor esaslı orta ekzotermik karakterli besleyici gömleğin merkez sıcaklık ölçümü baryum esaslı besleyici gömleğin merkez ölçümünden daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak, Şekil 3.2'de gösterilen D7 döküm uygulamasında termal çiftlerde oluşan sorunlardan dolayı başlangıç (ilk 100 saniye) sıcaklık ölçümleri etkin ve doğrusal bir şekilde alınamamıştır.



Şekil 5.56 EN-GJS-500 alaşımında Karışım 1 ve Karışım 2 besleyici gömleklerinin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması (D6 nolu döküm)

Tablo 5.7 KGDD döküm uygulamalarında orta ekzotermik besleyici gömleklerin soğuma üzerine etkisi

Döküm uygulaması	Besleyici	Erişilen en Yüksek Sıcaklık (°C)	Sıvı Metalin Soğuma Hızı (°C/s)	Sıvı katı aralığındaki soğuma hızı (°C/s)	Katı Metalin Soğuma Hızı (°C/s)
D6 nolu döküm	Karışım 1(merkez)	1360	0,290	0	
	Karışım 1(iç yüzey)	1267	0,280	0	
	Karışım 2(merkez)	-	-	-	-
	Karışım 2 (iç yüzey)	1246	0,274	0	
D7 nolu döküm	Karışım 1(merkez)	-	-	-	-
	Karışım 1(iç yüzey)	1239	0,243	0	0,063
	Karışım 2(merkez)	1329	0,306	0	0,086
	Karışım 2 (iç yüzey)	1246	0,283	0	0,073
D8 nolu döküm	Karışım 1(merkez)	1348	0,210	0	0,065
	Karışım 1(iç yüzey)	1323	0,200	0	0,060
	Karışım 2(merkez)	1356	0,230	0	0,010
	Karışım 2 (iç yüzey)	1192	0,130	0	0,057

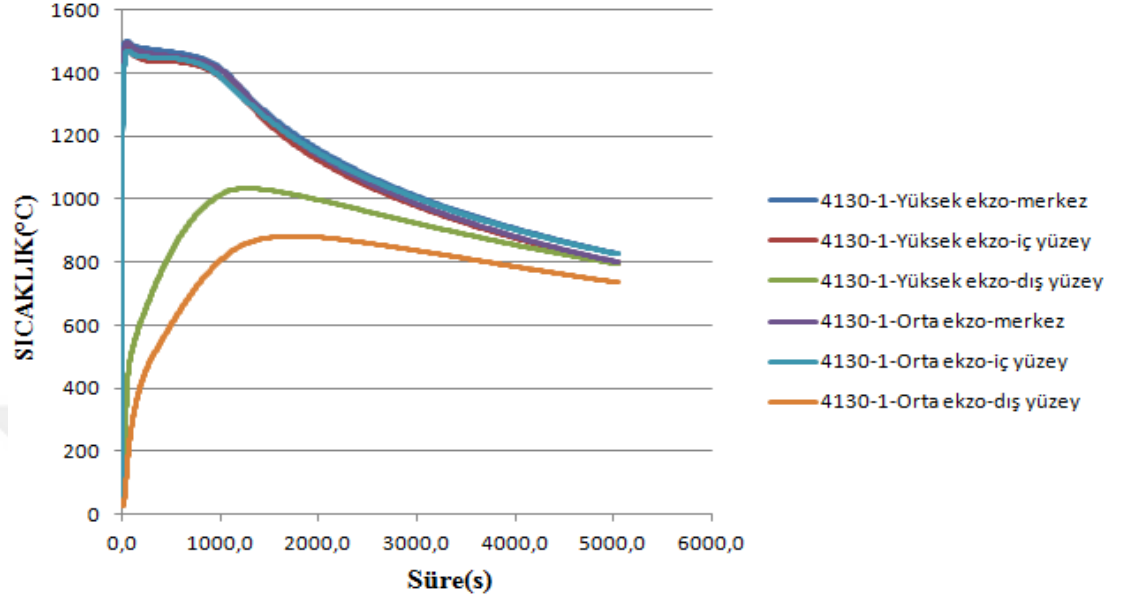
2013 yılında Hardin ve çalışma ekibi besleyici gömleğin etkinliğini incelemek amacıyla besleyici gömleğin farklı bölgelerinden sıcaklık ölçümü almışlardır. Ölçülen sıcaklık değerlerine bakarak farklı karışıma sahip besleyici gömlekler üzerinde yorumlar yapmışlardır (Hardin ve ve diğer., 2013). Yapılan bu çalışma paralelinde döküm benzeşim programında kullanılan besleyici gömlekler ile döküm uygulamasında kullanılan besleyici gömleklerin uyumluluğunu irdelemek amacıyla

materyal ve yöntem bölümünde belirtilen bölgelerden sıcaklık ölçümleri alınmıştır. 3 farklı alışımda kullanılan besleyici gömleklerin farklı bölgelerinden ölçülen sıcaklık değerlerinin süreye bağlı değişimi Şekil 2.25-Şekil 2.39'deki grafiklerde gösterilmektedir. Deneme dökümlerinde kullanılan yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin sıcaklık ölçümleri aynı alışımda kullanılarak karşılaştırılmıştır. Ek olarak farklı alışımlarda kullanılan aynı tür besleyici gömleklerin sıcaklık ölçümleri karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Şekil 5.57'te 4130 alışıının ilk döküm uygulamasından ölçülen sıcaklık değerlerinin süreye bağlı değişimi gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleğin orta ekzotermik özellikli besleyiciye göre her üç bölgeden ölçülen sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin merkez ve iç yüzey ölçümleri arasındaki sıcaklık farkının dış yüzey ölçümleri arasındaki sıcaklık farkından daha düşük olduğu görülmüştür. Yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin her üç bölgedeki sıcaklık değerlerinin orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğe göre daha yüksek değerlerde olması yüksek ekzotermik karakter göstermesini kanıtlar niteliktedir.

4130-2 döküm uygulamasının sıcaklık değerleri incelendiğinde merkez ve dış yüzey değerlerinin 4130-1 döküm uygulamasına benzer olduğu görülmüştür. 3 farklı bölgeden ölçülen sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında en yüksek sıcaklık değerleri merkez ölçümlerde elde edilmiştir. Orta ekzotermik karakterli besleyici gömleğin iç yüzey sıcaklık ölçümleri incelendiğinde yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömleğin iç yüzeyine göre daha düşük değerlerde kaldığı görülmektedir. Ek olarak, 4130-1 ve 4130-2 döküm uygulamasında kullanılan orta ekzotermik karakterli besleyici gömleklerin iç yüzey sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında 4130-2 döküm uygulamasında ölçülen sıcaklık değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Deneme dökümleri sırasında termal çiftlerin hareketini önlemek amacıyla alınan önlemlere rağmen orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğin iç yüzey ölçümü için kullanılan termal çiftin bir miktar geriye kayarak besleyici gömleğin merkezinden

uzaklaştığı ve bunun sonucunda ölçülen sıcaklık değerlerinin düştüğü düşünülmektedir (Ek-6).



Şekil 5.57 AISI 4130-1 döküm uygulamasında ölçülen sıcaklık değerlerinin süreye bağlı değişimi

Tablo 5.8'te ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri incelendiğinde 4130-1 döküm uygulamasında 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 4130-2 döküm uygulamasında kullanılan yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleğin eriştiği en yüksek sıcaklık değerinin orta ekzotermik özellikli besleyiciye göre 7°C daha fazla olduğu görülmektedir.

4130-2 döküm uygulamasında sıvı metalin soğuma hızı orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerde daha yavaş olacaktır. Hesaplanan soğuma hızları 4130-1 döküm uygulaması ile benzerlik göstermektedir. 4130-1 ve 4130-2 deneme dökümlerinin sıvı-katı aralığındaki sıcaklık davranışları karşılaştırıldığında her iki besleyici gömlek türünün sıcaklık-süre grafiğinden hesaplanan eğim değerlerinin 0'a yakın olduğu görülmektedir. Hesaplanan eğim değerlerinin 0 değerine yakın olması sıcaklık değerlerinin B bölgesinde sabit olduğu anlamına gelmektedir.

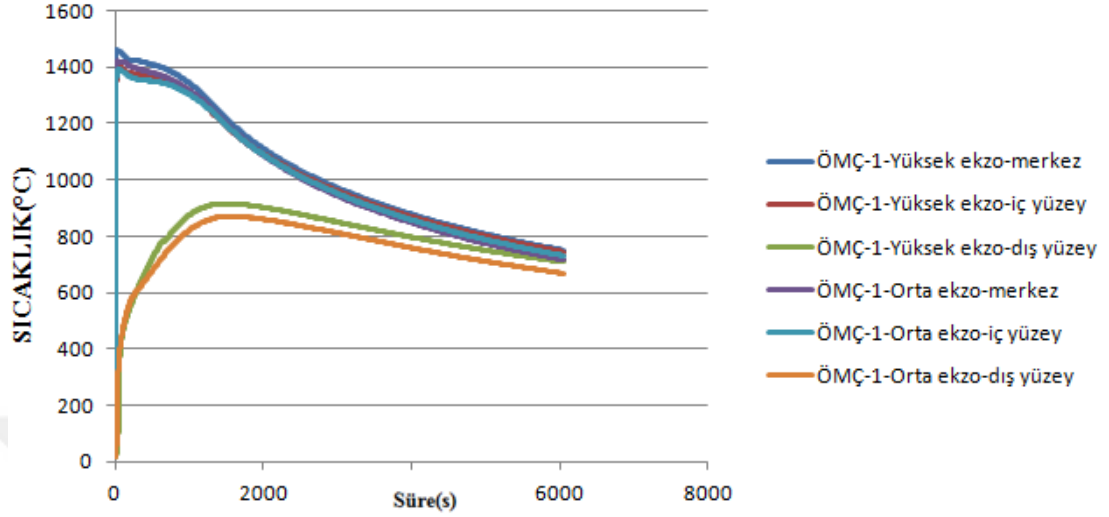
4130-1 döküm uygulamasında sıvı metalin soğuma hızları karşılaştırıldığında orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğin merkez ve iç yüzey sıcaklık ölçümleri esas alınarak hesaplanan soğuma hızlarının yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğin daha yavaş soğuma davranışı gösterdiği ortaya konulmuştur.

Tablo 5.8 4130 alaşımı seçilerek yapılan deneme dökümlerinde ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri ve hesaplanan soğuma hızları

Döküm uygulaması	Sıcaklık Ölçülen Bölge	Ölçülen en Yüksek Sıcaklık (°C)	Sıvı Metalin Soğuma Hızı (°C/s)	Sıvı katı aralığındaki soğuma hızı (°C/s)	Katı Metalin Soğuma Hızı (°C/s)
4130-1	YE(merkez)	1501	0,242	0,050	0,243
4130-1	YE(iç yüzey)		0,267	0,012	0,250
4130-1	OE(merkez)	1497	0,231	0,042	0,248
4130-1	OE(iç yüzey)		0,190	0,019	0,232
4130-2	YE(merkez)	1480	0,220	0,028	0,247
4130-2	YE(iç yüzey)		0,156	0,009	0,253
4130-2	OE(merkez)	1473	-	0,044	0,252
4130-2	OE(iç yüzey)		-	0,019	0,200

Östenitik mangan çeliği alaşımı (A128M-A93) seçilerek yapılan deneme dökümlerinden ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.58 ve Ek-7 .A128M-A93-1 ve A128M-A93-2 sıcaklık-süre grafikleri) gösterilmektedir. Grafikler incelendiğinde deneme dökümlerinde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. A128M-A93-1 ve A128M-A93-2 merkez sıcaklık ölçümlerinin birbirleri ile tutarlı olduğu ve A128M-A93-2 döküm uygulamasında ölçülen iç yüzey sıcaklık değerlerinin A128M-A93-1 döküm uygulamasında ölçülen sıcaklık değerlerine kıyasla daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. A128M-A93-2 döküm uygulamasında ölçülen iç yüzey sıcaklık değerlerinin A128M-A93-1'e göre daha düşük olmasının sebebi 4130-2 döküm uygulamasında orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğin iç yüzey ölçümüne benzer şekilde termal çiftlerin merkezden uzaklaşarak belirlenen iç yüzey ölçüm bölgesinin dışına çıkmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. A128M-A93-2 döküm

uygulamasının dış yüzey sıcaklık ölçümleri arasındaki farkın A128M-A93-1'e göre daha fazla olduğu görülmektedir.



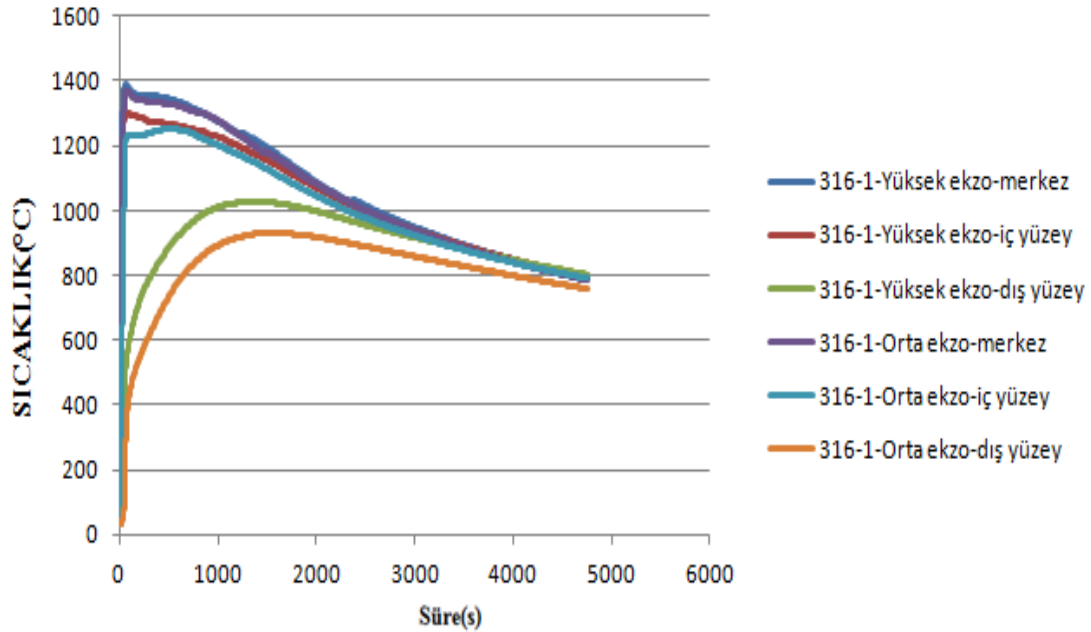
Şekil 5.58 A128M-A93-1 döküm uygulamasında ölçülen sıcaklık değerlerinin süreye bağlı değişimi

Tablo 5.9'da östenitik mangan çelik alaşımının döküm uygulamasında kullanılan besleyici gömleklerin farklı bölgeleri için ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri ve soğuma hızı değerleri gösterilmektedir. Erişilen en yüksek sıcaklık değerleri incelendiğinde A128M-A93-1 döküm uygulamasındaki yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleğin orta ekzotermiğe göre 34°C daha yüksek sıcaklığa ulaştığı, A128M-A93-2 döküm uygulamasında ise A128M-A93-1 dökümüne benzer şekilde yüksek ekzotermik 18°C daha yüksek sıcaklıklara ulaştığı görülmektedir. Ancak, A128M-A93-1 ve A128M-A93-2 deneme dökümlerinde kullanılan yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin en yüksek ulaştığı sıcaklık verileri karşılaştırıldığında aradaki farkın 60 °C ile 70°C olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin dökümhane şartlarında sıvı metalin potaya alıp döküm işlemine başlamasına kadar geçen süreden kaynaklandığı söylenebilir. Sıvı metali potaya alınmasının ardından sürekli olarak sıcaklık kaybetmesi ve döküm işleminin geç yapılması sonucunda A128M-A93-2 deneme dökümlerinden ölçülen merkez ve iç yüzey sıcaklık değerlerinin düşük kaldığı düşünülmektedir.

Tablo 5.9 Östenitik mangan çeliği alaşımı seçilerek yapılan deneme dökümlerinde ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri ve hesaplanan soğuma hızları

.Döküm uygulaması	Sıcaklık Ölçülen Bölge	Erişilen en Yüksek Sıcaklık (°C)	Sıvı Metalin Soğuma Hızı (°C/s)	Sıvı katı aralığındaki soğuma hızı(°C/s)	Katı Metalin Soğuma Hızı (°C/s)
A128M-A93-1	YE(merkez)	1459	0,254	0,059	0,214
A128M-A93-1	YE(iç yüzey)		0,210	0,029	0,215
A128M-A93-1	OE(merkez)	1425	0,197	0,096	0,204
A128M-A93-1	OE(iç yüzey)		0,167	0,036	0,196
A128M-A93-2	YE(merkez)	1387	0,241	0,060	0,172
A128M-A93-2	YE(iç yüzey)		0,183	0,069	0,155
A128M-A93-2	OE(merkez)	1369	0,230	0,053	0,186
A128M-A93-2	OE(iç yüzey)		-	0,081	0,137

Östenitik paslanmaz çelik alaşımı seçilerek yapılan deneme dökümlerinden ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.59 ve Ek-8 (316-1 ve 316-2 sıcaklık-süre grafikleri) gösterilmektedir. Sıcaklık ölçümleri 4130 ve östenitik mangan çeliği alaşımından alınan değerler ile benzer şekilde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Her iki döküm uygulamasında iç çap ölçümlerinde termal çiftlerin merkezden uzaklaştığı düşünülmektedir. Bunun sonucunda ölçülen sıcaklık değerlerinde düşmeler görülmüştür.



Şekil 5.59 AISI 316-1 döküm uygulamasında ölçülen sıcaklık değerlerinin süreye bağlı değişimi

Şekil 4.19’da her alaşım için yapılan soğuma hızı hesaplamalarının hangi bölgelerden yararlanılarak yapıldığı temsili olarak gösterilmektedir. Her üç alaşımda ölçülen sıcaklık değerleri incelendiğinde ilk olarak sıcaklık artışının görüldüğü ardından sıcaklığın azaldığı ve belli bir süre sabit olarak ilerledikten sonra tekrar azalma davranışı gösterdiği yukarıdaki grafiklerle ortaya konulmuştur.

Döküm işlemlerinde döküm parçasının sıvı büzülmesini ve sıvı-katı büzülmesini karşılamak amacıyla besleyicinin kullanılabileceği, katı büzülmesinin karşılanması için model payının dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir(Campell, 2003). Bu literatür bilgisi doğrultusunda Şekil 2.40’ta temsili olarak gösterilen A bölgesinin sonu ve B bölgesinin başlangıcı besleyici gömleklerin etkin olduğu bölgelerdir. Şekil 2.42’de C bölgesi olarak belirtilen ve Campell’in 2003 yılında yazdığı makalede katı büzülmesi olarak belirttiği bölgedeki soğuma hızlarının verilmesindeki amaç yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin belirtilen bölgede sıcaklık davranışlarının nasıl olduğunun ortaya konulmasıdır.

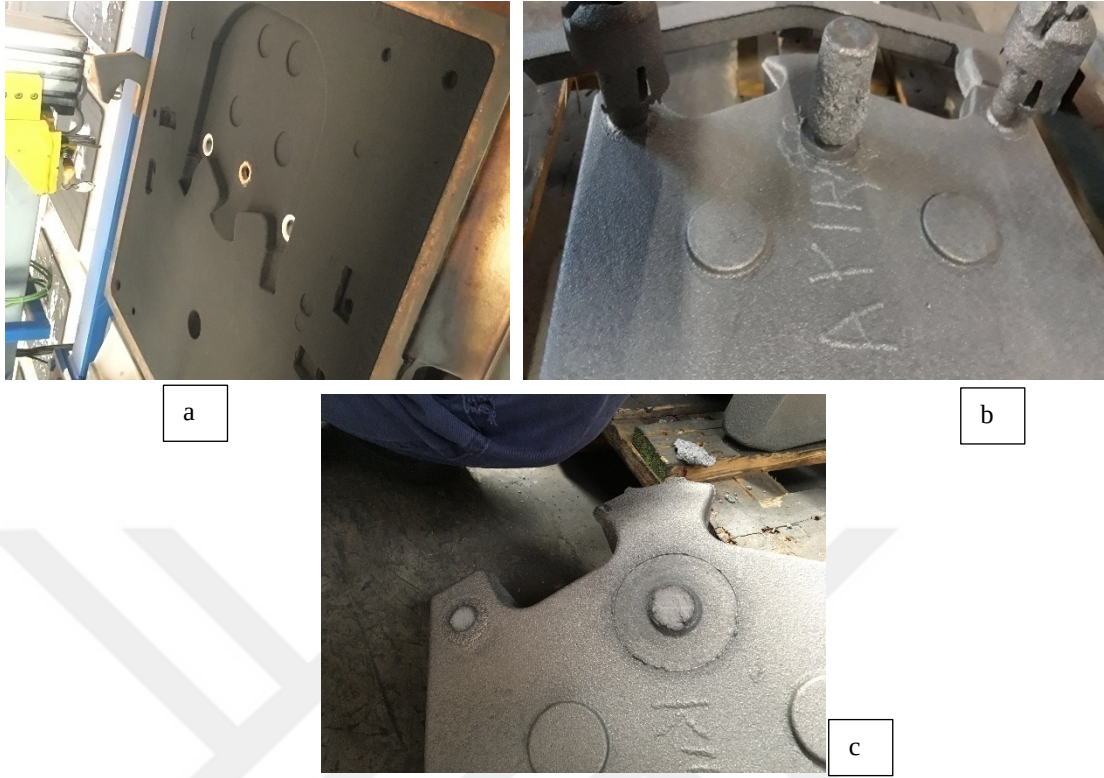
Tablo 5.10’de östenitik paslanmaz çelik alaşımının döküm uygulamasında kullanılan besleyici gömleklerin farklı bölgeleri için ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri ve soğuma hızı değerleri gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde önceki alaşımlarda yapılan yorumlara benzer şekilde bu çalışmada da yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömleklerin eriştikleri en yüksek sıcaklık değerlerinin daha fazla olduğu görülmektedir. Sıvı metalin soğuma hızları incelendiğinde 316-1 ve 316-2 deneme dökümlerinde yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömleklerin daha hızlı soğuma davranışı gösterdiği belirlenmiştir. 4130 alaşımı için yapılan yorumlara benzer şekilde katı-sıvı aralığında her iki besleyici türünün eğimlerinin 0 değerine yakın olduğu görülmektedir. 316-1 döküm uygulamasında yüksek ekzotermik besleyici gömlek ile orta ekzotermik besleyici gömlek arasındaki sıcaklık farkının 8°C, 316-2 için ise 17°C olduğu görülmektedir. Sıvı metali soğuma hızları incelendiğinde orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin daha yavaş soğuma davranışı sergiledikleri hesaplamalar ile ortaya konulmuştur. Böylece orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin ısı yalıtımının yüksek ekzotermik besleyici gömleklerden daha iyi olduğu söylenebilir.

Tablo 5.10 AISI 316 çelik alaşımı seçilerek yapılan deneme dökümlerinde ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri ve hesaplanan soğuma hızları

Döküm uygulaması	Besleyici	Erişilen en Yüksek Sıcaklık (°C)	Sıvı Metalin Soğuma Hızı (°C/s)	Sıvı katı aralığındaki soğuma hızı(°C/s)	Katı Metalin Soğuma Hızı (°C/s)
316-1	YE(merkez)	1387	0,251	0,064	0,160
316-1	YE(iç yüzey)		0,220	0,021	0,132
316-1	OE(merkez)	1369	0,191	0,043	0,179
316-1	OE(iç yüzey)		-	0,062	0,141
316-2	YE(merkez)	1503	0,421	0,068	0,266
316-2	YE(iç yüzey)		0,535	0,015	0,263
316-2	OE(merkez)	1486	0,391	0,062	0,297
316-2	OE(iç yüzey)		-	0,090	0,224

5.4.1 Geometrik Tasarımı Yapılan Besleyici Gömleklerin Döküm Uygulaması

Yüksek basınç yaş kum otomatik kalıplama hatları için geliştirilen tasarımın döküm kalıplama görüntüleri Şekil 5.59’da verilmiştir. Kalıplama sırasında seramik liflerden imal edilen yardımcı malzemenin partikül bazlı besleyici gömlek üzerine düşen yükü sönümleyerek gömleğin kırılmasını engellediği görülmüştür. Fakat bazı uygulamalarda yardımcı bileşen içerisindeki seramik liflerin geri esnemesi sonrasında kalıpta kısmi kırışmalar görüldüğünden, lif oranı %50’si oranında azaltılmıştır. Daha sonraki döküm uygulamalarında kalıplama sırasında herhangi bir olumsuzluk görülmemiştir. Ayrıca döküm sonrasındaki gömlek içerisinde kalan sıvı metalin diğer gömleklere benzer biçimde çekme yaptığı görülmüştür. Döküm sonrası kırılan besleyici metali boğaz kısmında ve parça içerisinde herhangi bir çekintiye rastlanmamıştır. Bu durumda besleyici gömleğin sorunsuz çalıştığının göstergesidir.

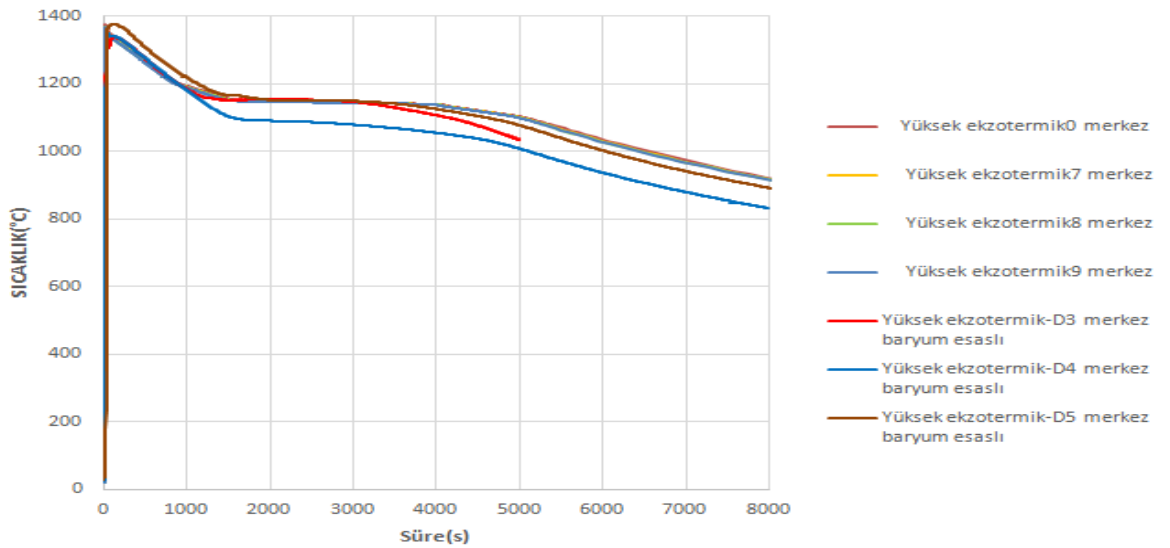


Şekil 5.60 Yeni tasarlanan mini besleyici ile yapılan (a) kalıp, (b) ve (c) döküm sonrası görüntüleri (Kişisel arşiv, 2019)

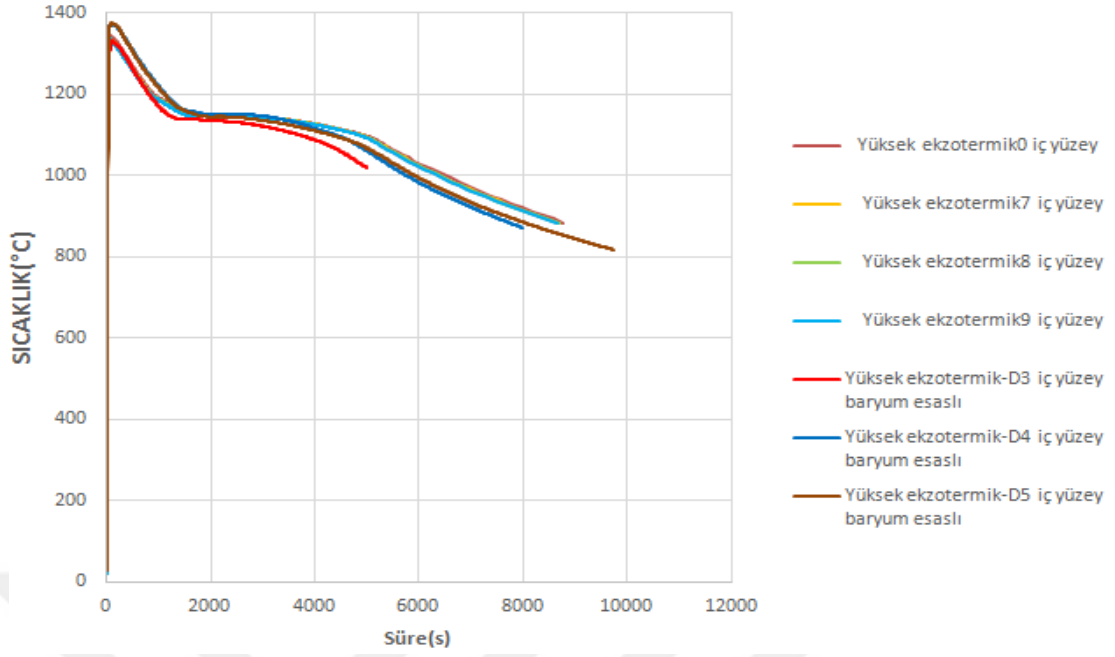
5.5 Benzeşim Çalışmalarının Sonuçları

Nova FlowCast döküm benzeşim programında bulunan yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin ve Exokal olarak isimlendirilen besleyici gömleğin özelliklerinde değişimler yapılmıştır. Döküm benzeşim programlarında kullanılan besleyici gömleklerin deneme dökümlerinde kullanılan besleyici gömlekler ile benzer şekilde işlevini yerine getirip getirmediği irdelenmiştir. Besleyici gömlek karakterizasyonundan elde edilen bilgiler ışığında benzeşim programındaki gömlek özellikleri değiştirilmiştir. Döküm benzeşim çalışmalarında deneme döküm çalışmalarına benzer bölgelerden sıcaklık ölçümleri alınarak grafikler çizilmiştir ve deneme dökümleri ile uyumlu olup olmadığı incelenmiştir.. Döküm benzeşim çalışmaları sonucunda çekinti görüntüleri incelenmiştir. Döküm benzeşim çalışmaları sonucunda döküm parçaların çekinti görünüşleri ile deneme dökümlerinde üretilen parçaların çekinti oluşumları karşılaştırılarak uyumluluğu incelenmiştir.

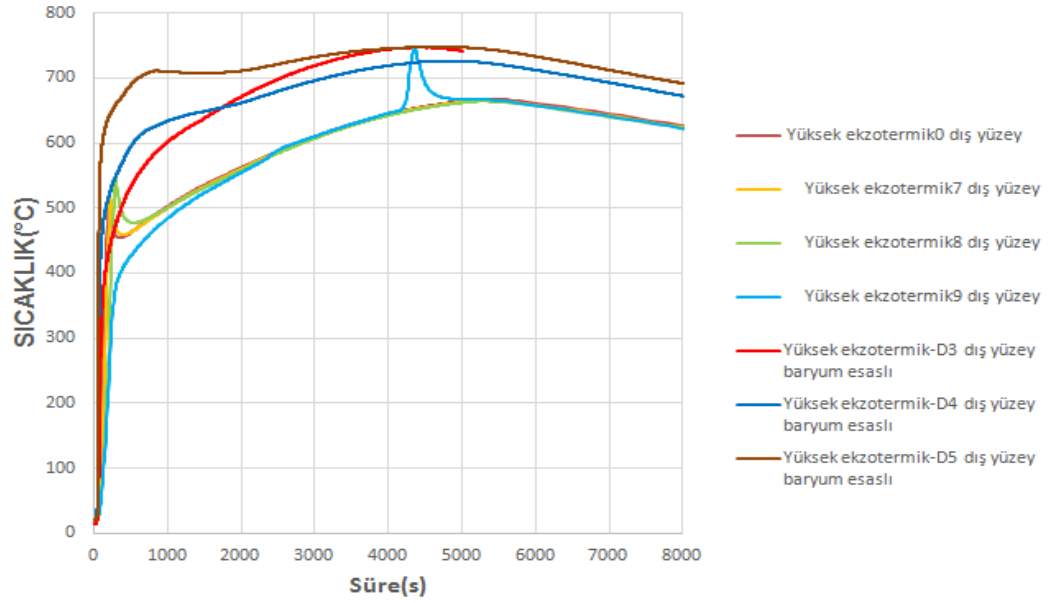
Benzeşim çalışmalarında sıcaklık-süre eğrilerindeki değişim üzerinde durulmuştur. Bu nedenle daha önce deneme dökümlerinde sıcaklık ölçümü için belirlenen aynı bölgelerden benzeşim programı üzerinden de ölçümler alınmıştır. Ayrıca gerçek döküm sonuçları ile döküm benzeşim sonuçlarını benzetmek amacıyla yapılan termal karakterizasyonlar göz önünde bulundurularak programda kayıtlı bazı parametreler üzerinde çeşitli değişiklikler yapılmıştır. Yüksek ekzotermik besleyici gömleklerin kullanıldığı deneme dökümlerinde ölçülen sıcaklık değerleri ile benzeşim çalışmalarından alınan sıcaklık ölçümleri düzenlenerek aşağıdaki şekillerde farklılıklar gösterilmiştir. (Ek-9, Şekil 5.63) “Yüksek ekzotermik 1-2-3-4-5-6-7-8-9” besleyici gömleklerin merkez ve iç yüzeyden kayıt altına alınan döküm benzeşim sonuçları sıcaklık ölçümleri arasında ihmal edilebilir seviyede 7-10°C’lik bir farklılık görülmüştür. Bu sıcaklık farklılığının döküm parçasının kalitesine doğrudan etki edeceği düşünülmemektedir. Döküm benzeşim çalışmaları ile deneme dökümlerinde ölçülen dış yüzey sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında, deneme dökümlerinden ölçülen sıcaklık değerleri döküm benzeşim programında özellikleri değiştirilmiş olan besleyici gömleklerin sıcaklık değerlerinden Orta ekzotermik karakterli besleyici gömlekler ile yapılan deneysel ve döküm benzeşim çalışmasının sonuçları karşılaştırmalı olarak grafikler ile gösterilmiştir (Şekil 5.64-Şekil 5.66).



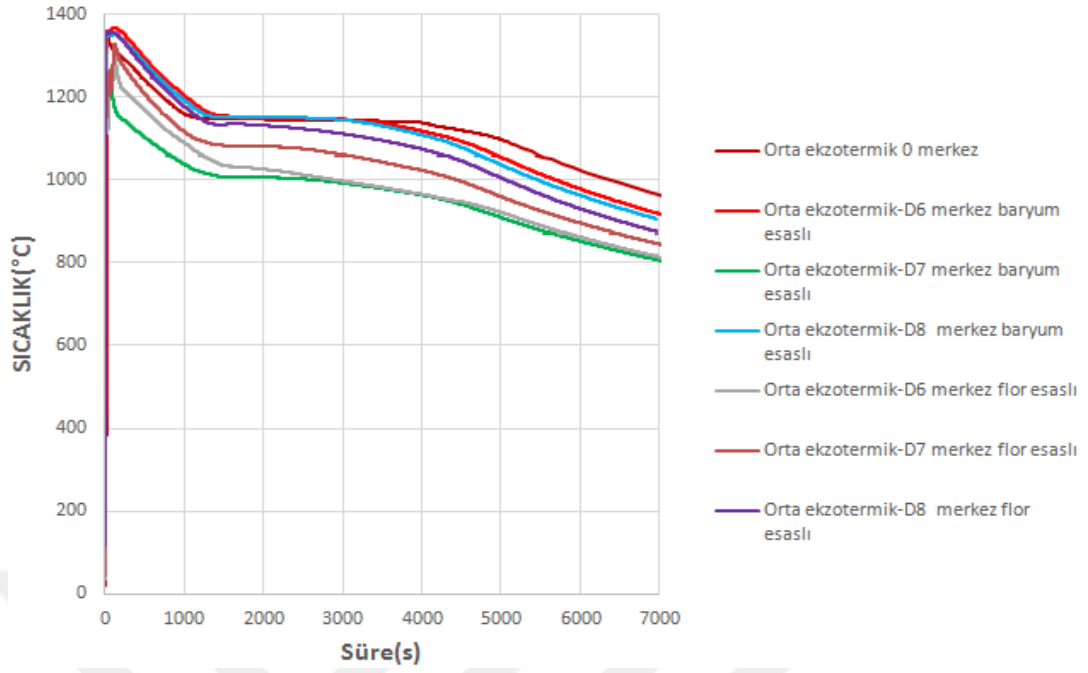
Şekil 5.61 KGDD alaşımında döküm uygulamalarında yüksek ekzotermik besleyici gömlek merkezinden ölçülen ve benzeşim yoluyla hesaplanan sıcaklıkların karşılaştırılması



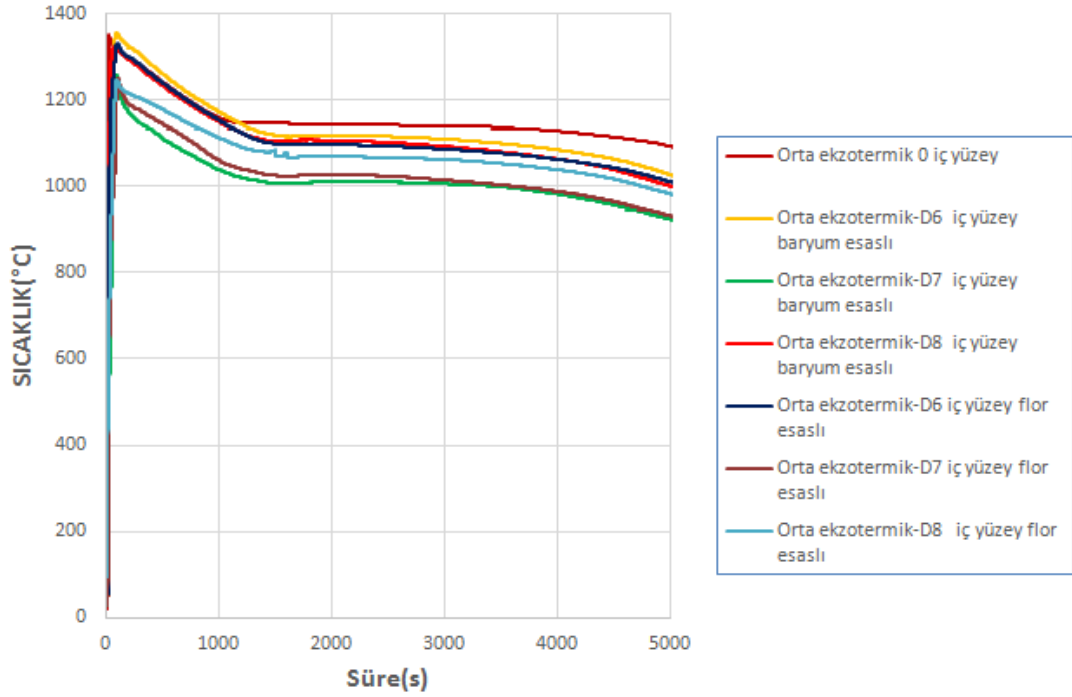
Şekil 5.62 KGDD alaşımında döküm uygulamalarında yüksek ekzotermik besleyici gömlek iç yüzeyden ölçülen ve benzeşim yoluyla hesaplanan sıcaklıkların karşılaştırılması



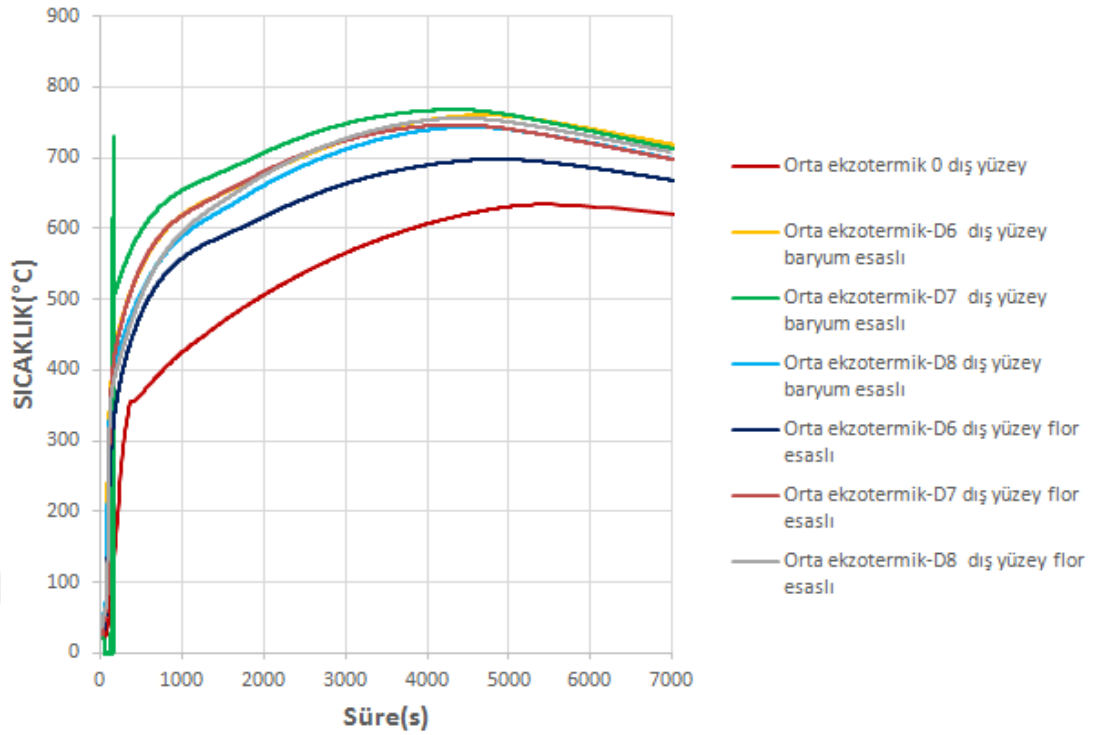
Şekil 5.63 KGDD alaşımında döküm uygulamalarında yüksek ekzotermik besleyici gömlek dış yüzeyden ölçülen ve benzeşim yoluyla hesaplanan sıcaklıkların karşılaştırılması



Şekil 5.64 KGDD alaşımında döküm uygulamalarında orta ekzotermik besleyici gömlek merkezden ölçülen ve benzeşim yoluyla hesaplanan sıcaklıkların karşılaştırılması



Şekil 5.65 KGDD alaşımında döküm uygulamalarında orta ekzotermik besleyici gömlek iç yüzeyden ölçülen ve benzeşim yoluyla hesaplanan sıcaklıkların karşılaştırılması

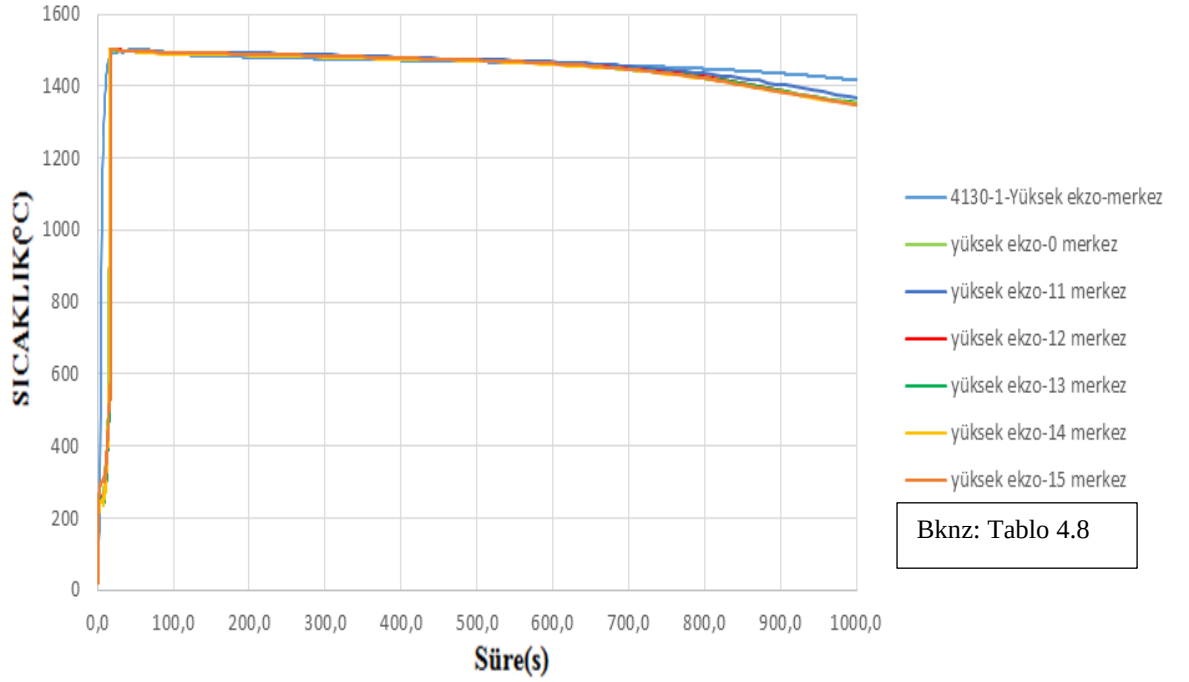


Şekil 5.66 KGDD alaşımında döküm uygulamalarında orta ekzotermik besleyici gömlek dış yüzeyden ölçülen ve benzeşim yoluyla hesaplanan sıcaklıkların karşılaştırılması

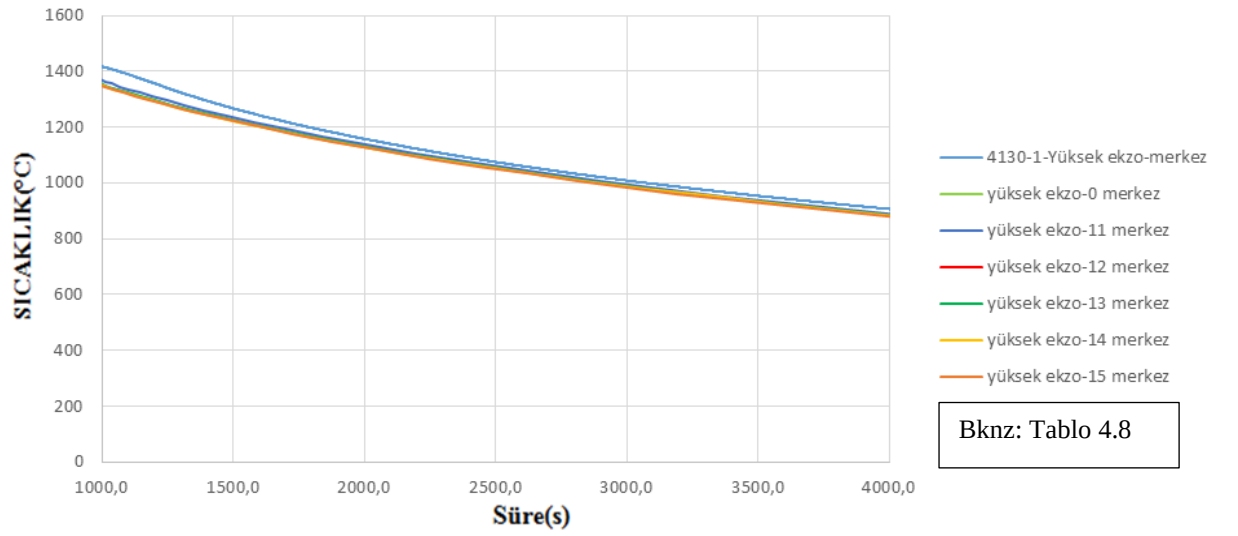
EN-GJS-500 alaşımlarının benzeşim çalışmaları sonrasında çelik alaşımlarının benzeşim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Programda kayıtlı besleyici gömlek verileri üzerinde değişiklikler yapılarak eğrilerin birbirine yaklaştırılması amaçlanmıştır.

Şekil 5.67 ile Şekil 5.69 arasında özellikleri değiştirilen besleyici gömleklerin kullanılması sonucunda ölçülen sıcaklık değerleri ve deneme dökümlerinden ölçülen sıcaklık değerlerinin süreye bağlı değişimi gösterilmiştir. Döküm benzeşim çalışmalarında yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlekler seçilerek AISI 4130 alaşımı için yapılan benzeşim çalışmalarından ölçülen farklı bölgelerdeki sıcaklık değerleri Şekil 3.1-Şekil 3.9 arasında, orta ekzotermik özellikli besleyiciler kullanılarak yapılan benzeşim çalışmaları sıcaklık ölçümleri Şekil 3.10-Şekil 3.18 arasında gösterilmektedir. Benzeşim çalışmalarında alınan sıcaklıklara ek olarak 4130-1 döküm uygulamasında ölçülen sıcaklık değerleri karşılaştırmalı olarak aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. İlgili grafiklerin adlandırılmasında sıcaklık ölçümü alınan bölgenin yeri belirtilmiştir.

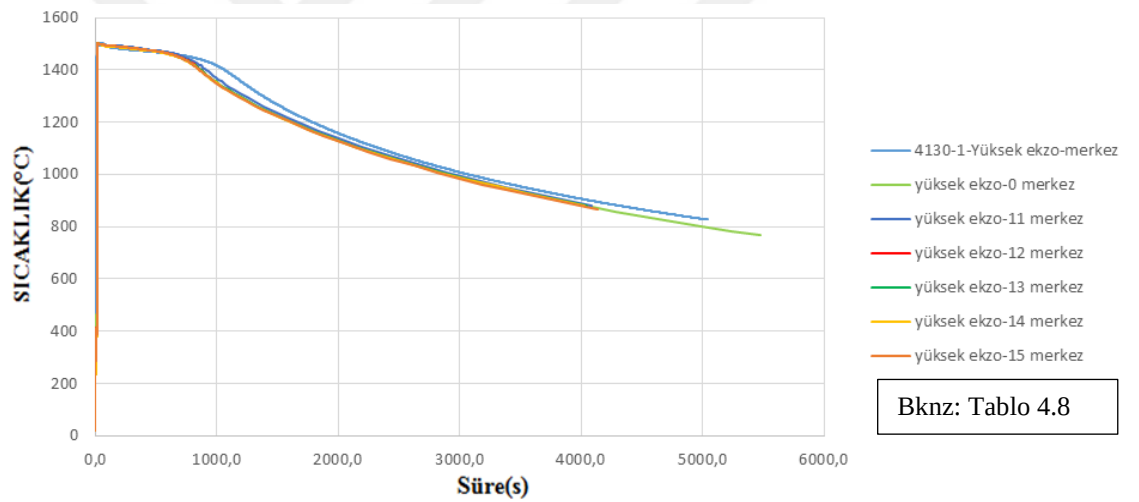
Şekil 5.67’de ilk 1000 saniyedeki çoğunlukla sıvı metlin soğumasını kapsayan benzeşim döküm uygulaması karşılaştırılmasında sıcaklık ölçümleri arasındaki farkın 5-12°C arasında değişmektedir. 1000 saniyedeki döküm uygulaması sıcaklık ölçümleri ile yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlekler seçilerek yapılan döküm benzeşim çalışmalarından ölçülen sıcaklık değerleri arasındaki fark 55°C-65°C arasında değiştiği belirlenmiştir. Döküm uygulaması ile benzeşim çalışmaları arasındaki sıcaklık farkının sürenin artmasıyla azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.67 AISI 4130 alaşımının döküm uygulamalarında yüksek ekzotermik besleyici gömlek dış yüzeyden ölçülen ve benzeşim yoluyla hesaplanan sıcaklıkların karşılaştırılması (0-1000s aralığı)

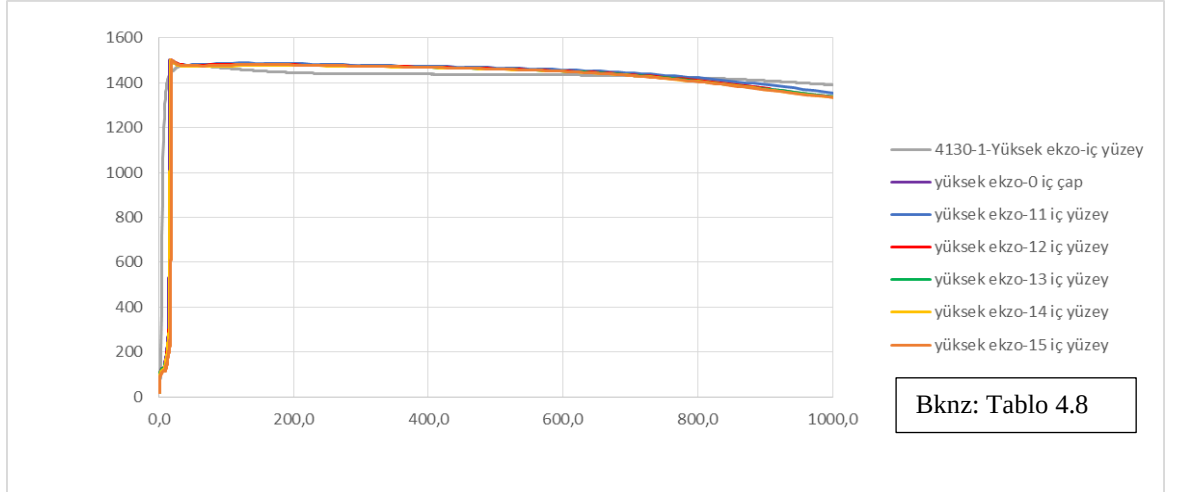


Şekil 5.68 AISI 4130 alaşımı için merkez bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (1000-4000 s aralığı)

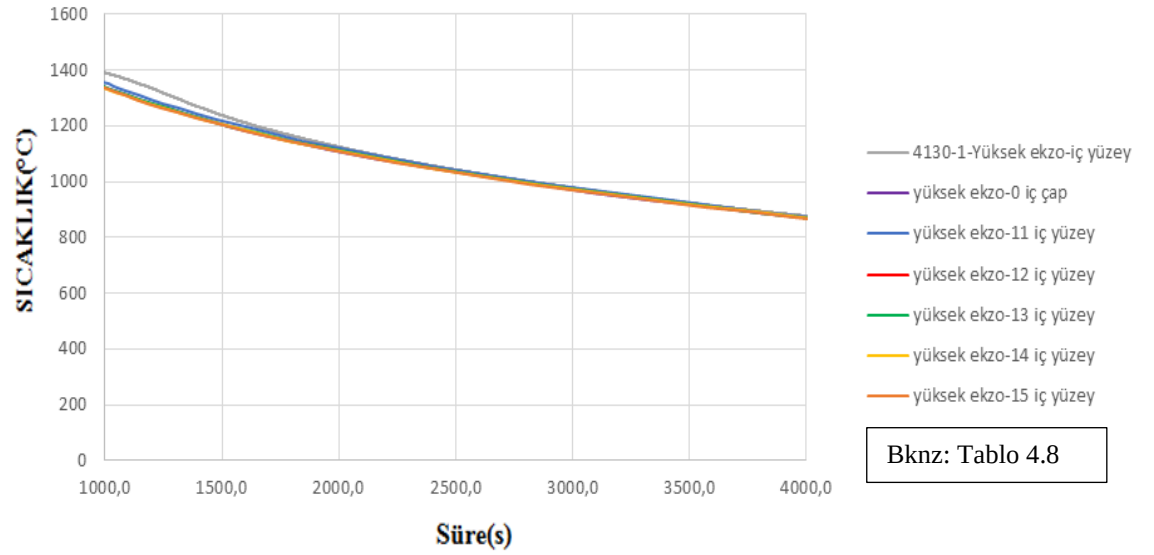


Şekil 5.69 AISI 4130 alaşımı için merkez bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (0-5000s aralığı)

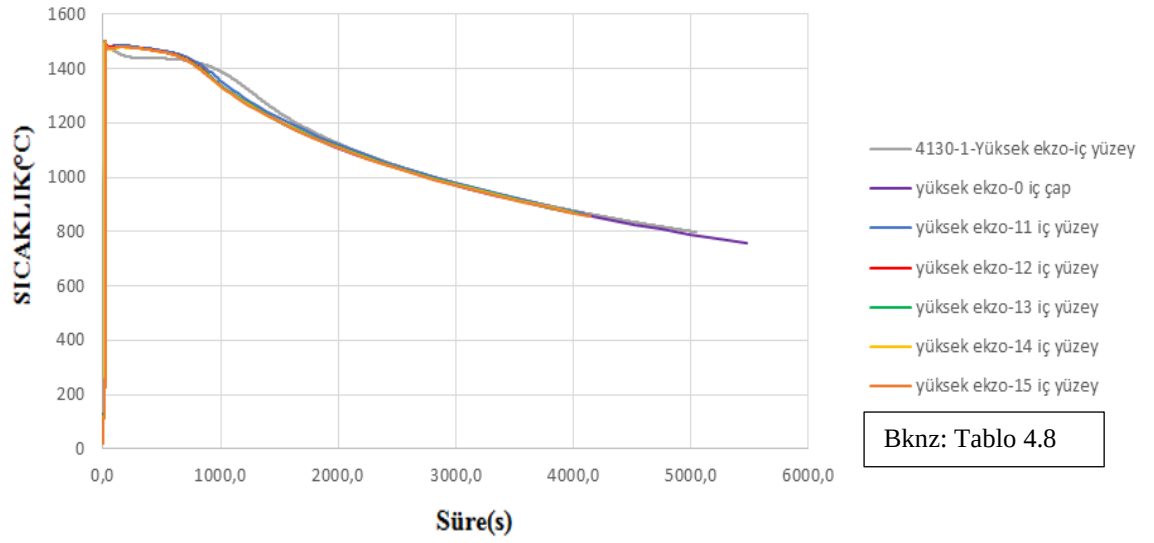
Şekil 5.70'de yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlekler kullanılarak yapılan benzeşim çalışmalarından alınan iç yüzey sıcaklık değerleri ile deneme dökümlerinden ölçülen sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında ilk 1000 saniyede 15-20°C sıcaklık farkının olduğu belirlenmiştir. 1000. saniyedeki sıcaklık farkının 57°C olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.71'te görüldüğü gibi ilerleyen sürelerde ölçülen sıcaklıklar kesişmektedir.



Şekil 5.70 AISI 4130 alaşımı için iç yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (0-1000s arası)

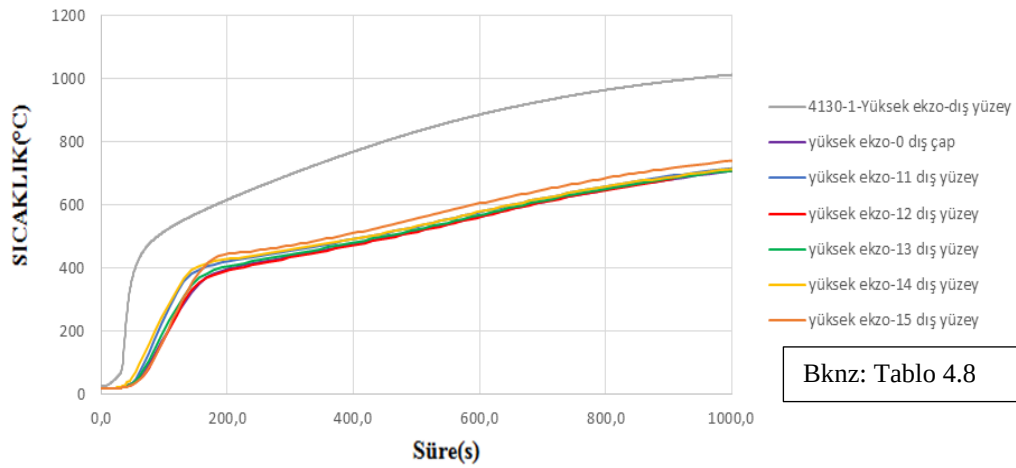


Şekil 5.71 AISI 4130 alaşımı için iç yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (1000-4000s arası)

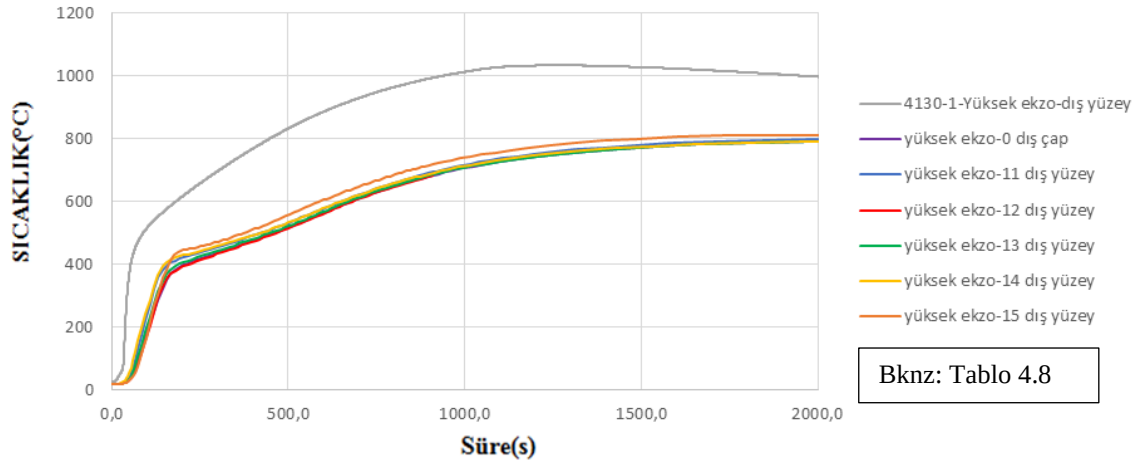


Şekil 5.72 AISI 4130 alaşımı için iç yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (5000 s kadar)

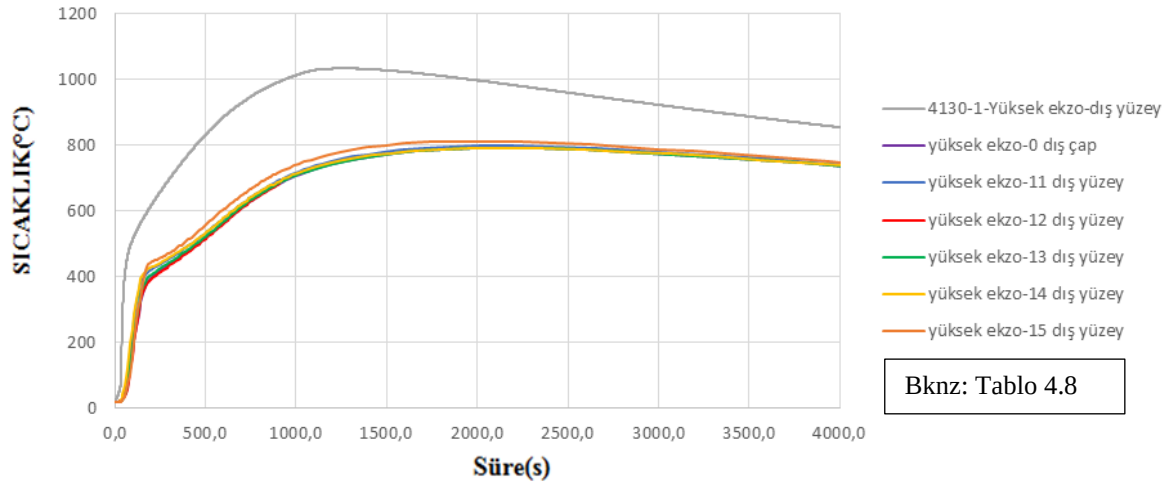
Şekil 5.73 incelendiğinde dış yüzey ölçümleri arasında 1000. saniyede 200°C’de fazla sıcaklık farkının olduğu görülmektedir. Diğer bölgelerdeki sıcaklık farkları ile karşılaştırıldığında dış yüzey ölçümleri arasındaki uyumsuzluğun daha belirgin olduğu görülmektedir. 4000. Saniyede sıcaklık farkının 100°C’nin altına düştüğü belirlenmiştir.



Şekil 5.73 AISI 4130 alaşımı için dış yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (1000 saniye)

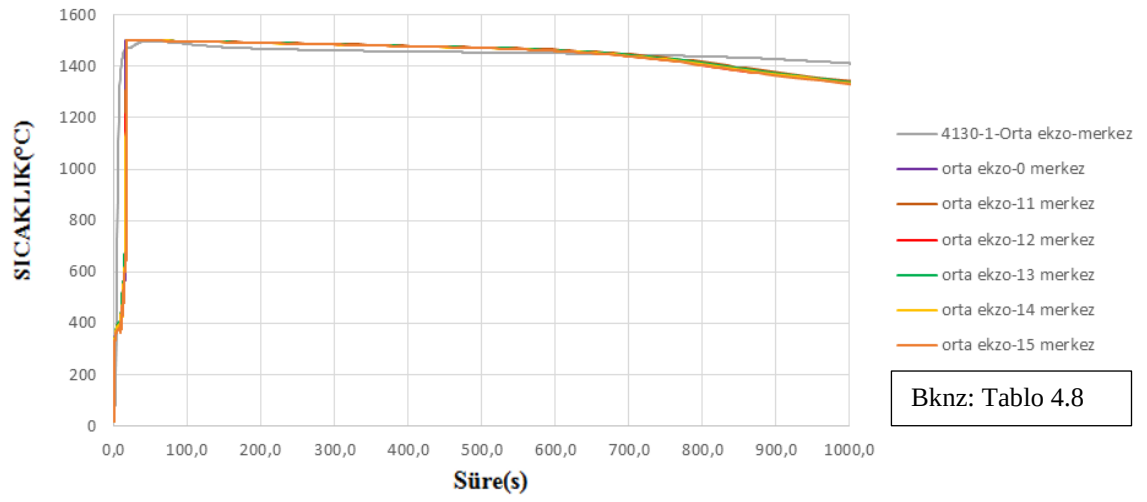


Şekil 5.74 AISI 4130 alaşımı için dış yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (2000 saniye)

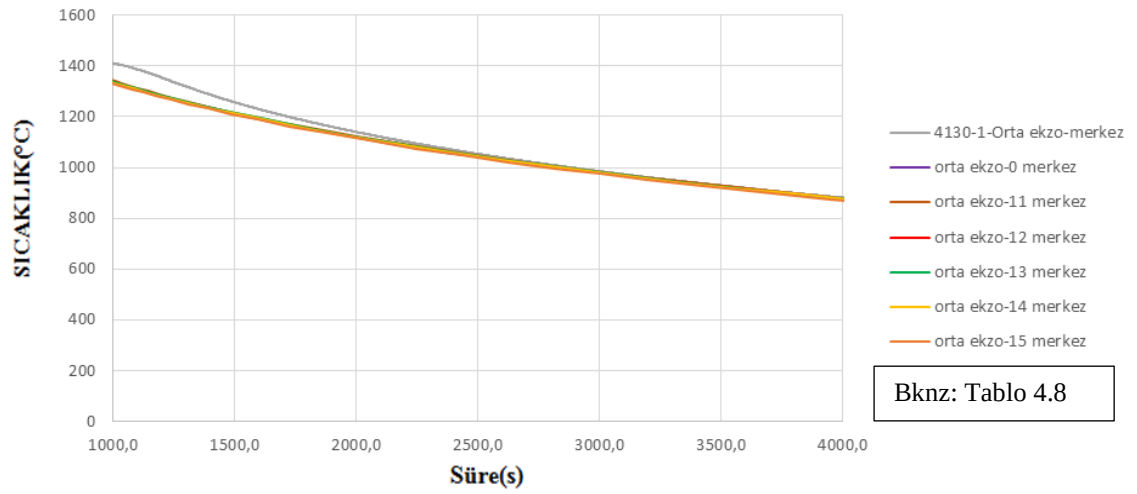


Şekil 5.75 AISI 4130 alaşımı için dış yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (4000 saniye)

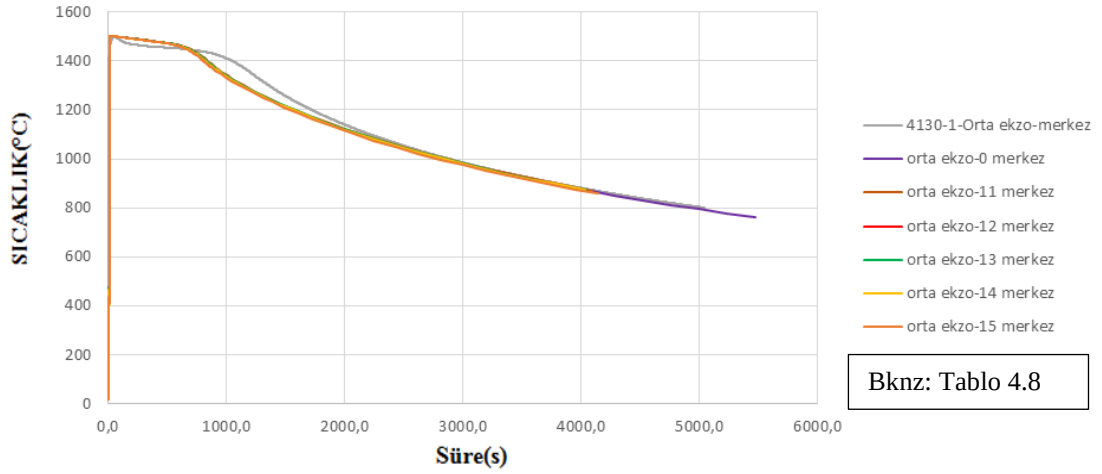
Şekil 5.76’de orta ekzotermik karakterli besleyici gömlekler seçilerek yapılan döküm benzeşim çalışmalarından alınan merkez sıcaklık ölçüm değerleri gösterilmektedir. Deneme döküm çalışmasından ölçülen sıcaklık değerleriyle karşılaştırıldığında ilk 500 saniyede 15-20°C sıcaklık farklarının olduğu belirlenmiştir. 1000 saniyede sıcaklık farkının 68°C olduğu belirlenmiştir. İlerleyen sürelerde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin benzeşim çalışmalarına benzer olarak sıcaklık eğrilerinin kesiştiği görülmektedir.



Şekil 5.76 AISI 4130 alaşımı için merkez bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (1000 saniye)

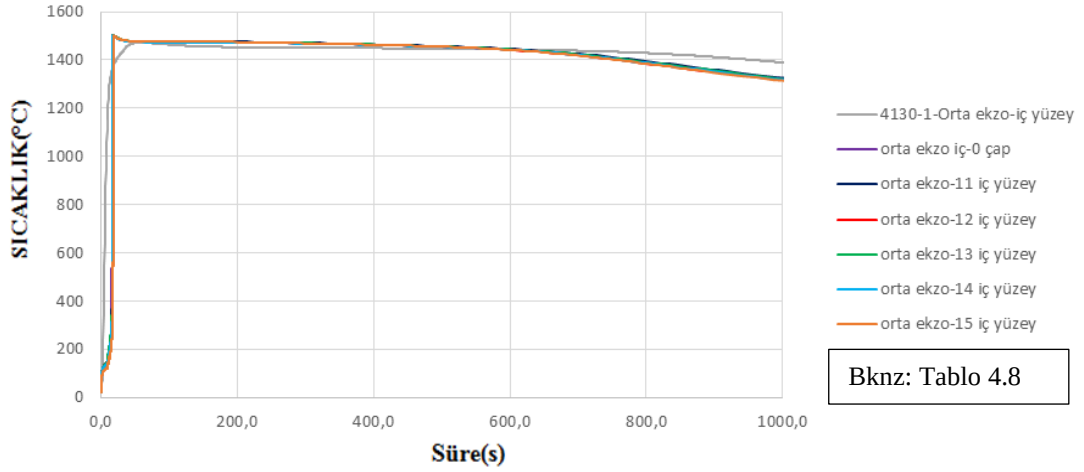


Şekil 5.77 AISI 4130 alaşımı için merkez bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (1000-4000 saniye arası)

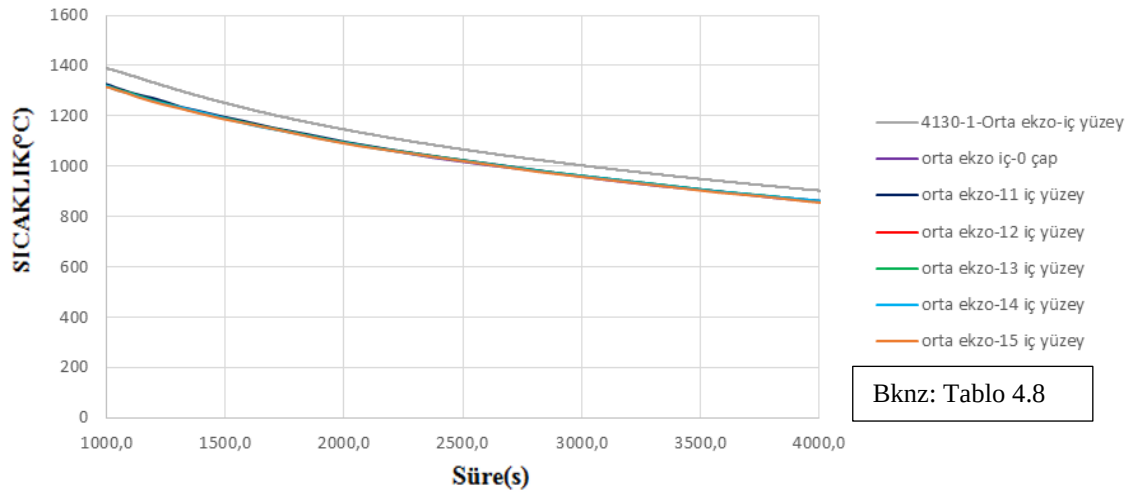


Şekil 5.78 AISI 4130 alaşımı için merkez bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (5000 saniye)

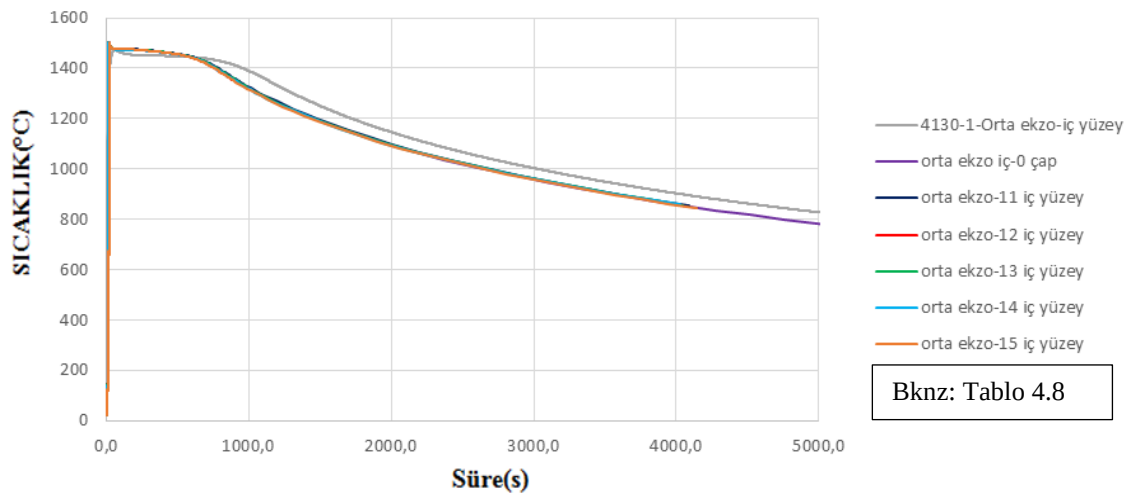
Şekil 5.79 incelendiğinde orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin benzeşim çalışmalarından ölçülen sıcaklık değerlerinin ilk 500 saniyede deneme dökümlerinde ölçülen sıcaklık değerlerinden yaklaşık 10-25°C aralığında daha düşük sıcaklık değerlerinde kaldığı görülmektedir. 1000. Saniyedeki sıcaklık farkının 60°C olduğu tespit edilmiştir. İlerleyen sürelerde bu sıcaklık farkının 50-60°C aralığında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.79 AISI 4130 alaşımı için iç yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (1000 saniye)

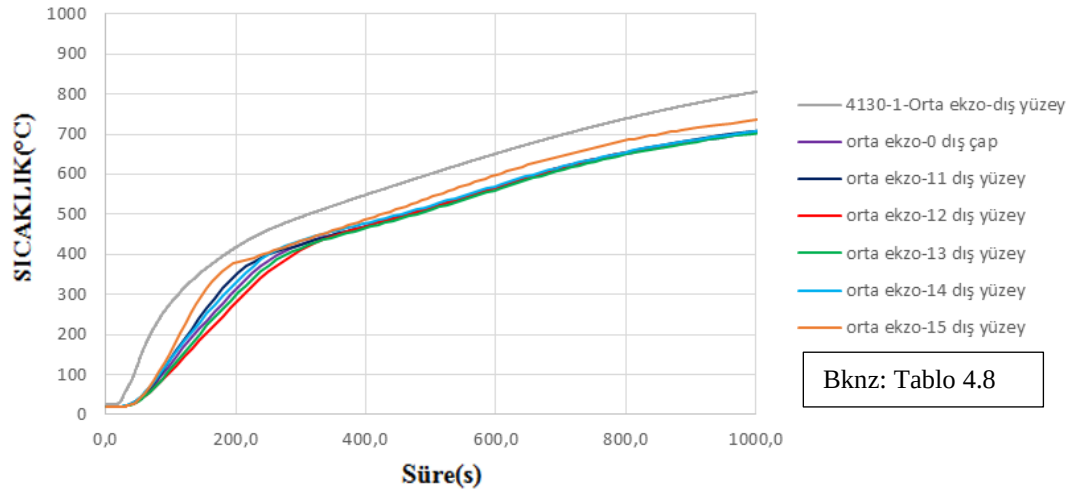


Şekil 5.80 AISI 4130 alaşımı için iç yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.(1000-4000 saniye arası)

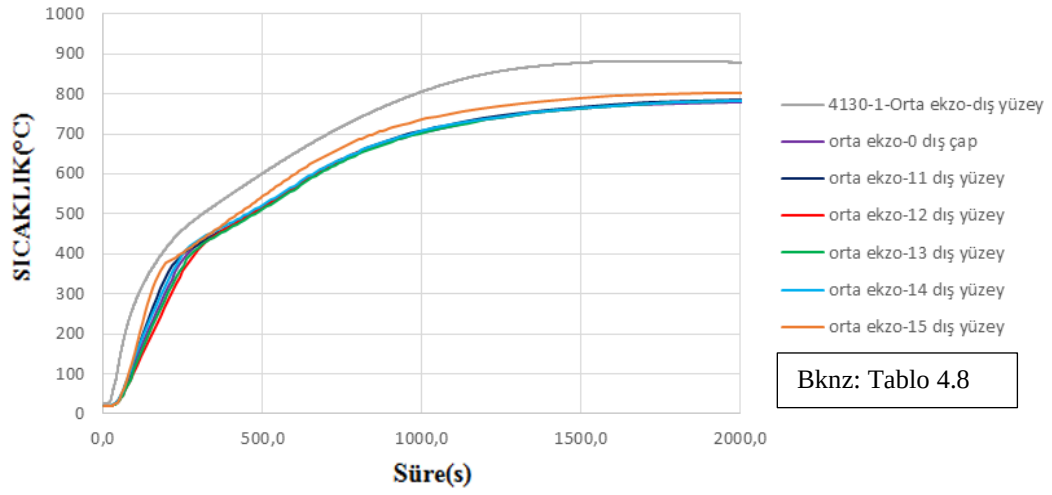


Şekil 5.81 AISI 4130 alaşımı için iç yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (5000 saniye)

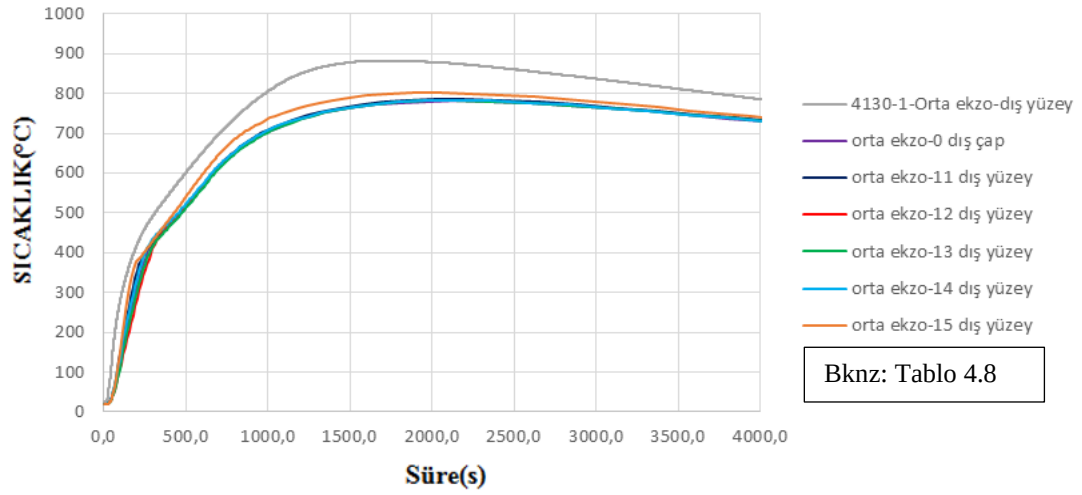
Şekil 5.82 incelediğinde orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin dış yüzey sıcaklık ölçümlerinin yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklere oranla daha uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak deneme dökümlerinde ölçülen sıcaklık değerlerinin 50-70°C daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.82 AISI 4130 alaşımı için dış yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (1000 saniye)



Şekil 5.83 AISI 4130 alaşımı için dış yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (2000 saniye)



Şekil 5.84 AISI 4130 alaşımı için dış yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (4000 saniye)

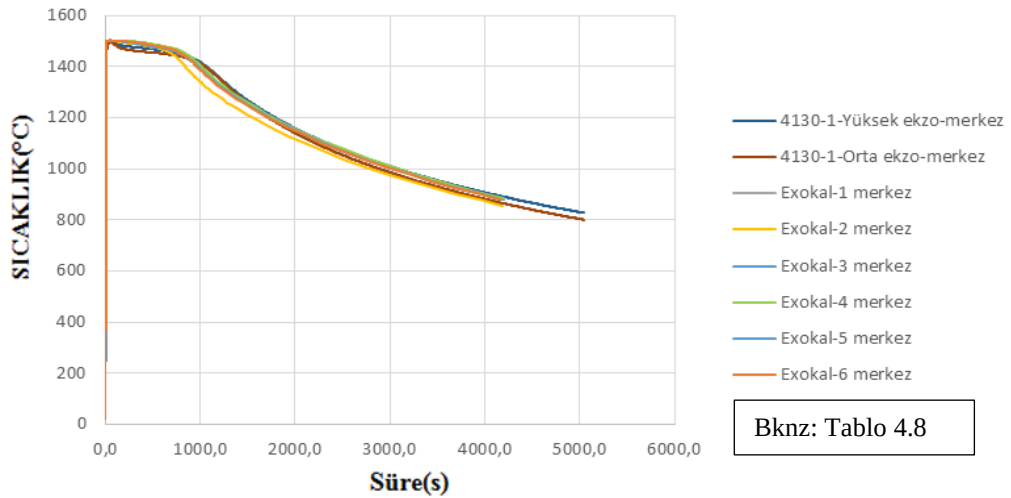
Yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömlekler seçilerek yapılan döküm benzeşim çalışmalarının deneme dökümleri ile uyumluluğu sıcaklık değerleri karşılaştırılarak irdelenmiştir. Besleyici gömleklerin türüne ve sıcaklık alınan bölgeye bağlı olarak sıcaklık değerlerinin farklılık gösterdiği ortaya konulmuştur. Döküm benzeşim programı veri tabanında bulunan yüksek ve orta ekzotermik karakterli besleyici gömleklerin özelliklerinin değiştirilmesi sonucunda sıcaklık eğrilerinde belirgin değişimlerin görülmediği çizilen eğrilerle gösterilmektedir (Şekil 5.85-Şekil 5.86). Değiştirilen parametreler sonucunda oluşan sıcaklık farklılıklarının doğrudan döküm kalitesine etki edeceği düşünülmemektedir. Bundan dolayı deneme dökümlerinde ölçülen sıcaklık eğrilerine uygun davranış gösteren besleyici gömleği döküm benzeşim programında oluşturabilmek için Exokal besleyici gömleklerin özelliklerinde değişimler yapılmıştır. Yapılan değişiklikler Tablo 2.8’de gösterilmektedir. AISI 4130 alaşımı seçilerek döküm benzeşim çalışmalarına devam edilmiştir ve soğuma eğrileri irdelenmiştir. Exokal besleyici gömleklerin seçilerek yapılan çalışmaların sıcaklık eğrileri Şekil 5.85-Şekil 5.85 arasında gösterilmektedir.

Şekil 5.85 incelendiğinde Exokal tipi besleyici gömleğin döküm benzeşim kullanıldığı benzeşim çalışmalarındaki sıcaklık eğrilerinin, yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömlekler göre daha uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin grafiklerin yorumlanmasında

belirlenen sürelerdeki sıcaklık farkları ortaya konmuştur. Exokal besleyici gömleklerin eğrilerinin uyumluluğu benzer şekilde analiz edilmiştir.

Merkez bölgesi sıcaklık-süre grafiğini gösteren Şekil 5.85 incelendiğinde 500. saniyedeki Exokal-3 besleyici gömlek kullanılarak alınan sıcaklık ölçümleri ile deneme dökümlerinde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak termal çiftler yardımıyla ölçülen sıcaklık eğrileri arasında 12°C olduğu belirlenmiştir. 1000. saniyedeki sıcaklık eğrileri arasındaki farkın 20°C olduğu ve bu sıcaklık farkının ilerleyen sürelerde kapanarak eğrilerin kesiştiği belirlenmiştir.

Şekil 5.85 incelendiğinde 500. saniyedeki Exokal-1 besleyici gömlek kullanılarak alınan sıcaklık ölçümleri ile deneme dökümlerinde orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak termal çiftler yardımıyla ölçülen sıcaklık eğrileri arasında 12°C olduğu belirlenmiştir. 1000. saniyedeki sıcaklık eğrileri arasındaki farkın 20°C, 1500. saniyede sıcaklık farkının 17°C olduğu tespit edilmiştir.

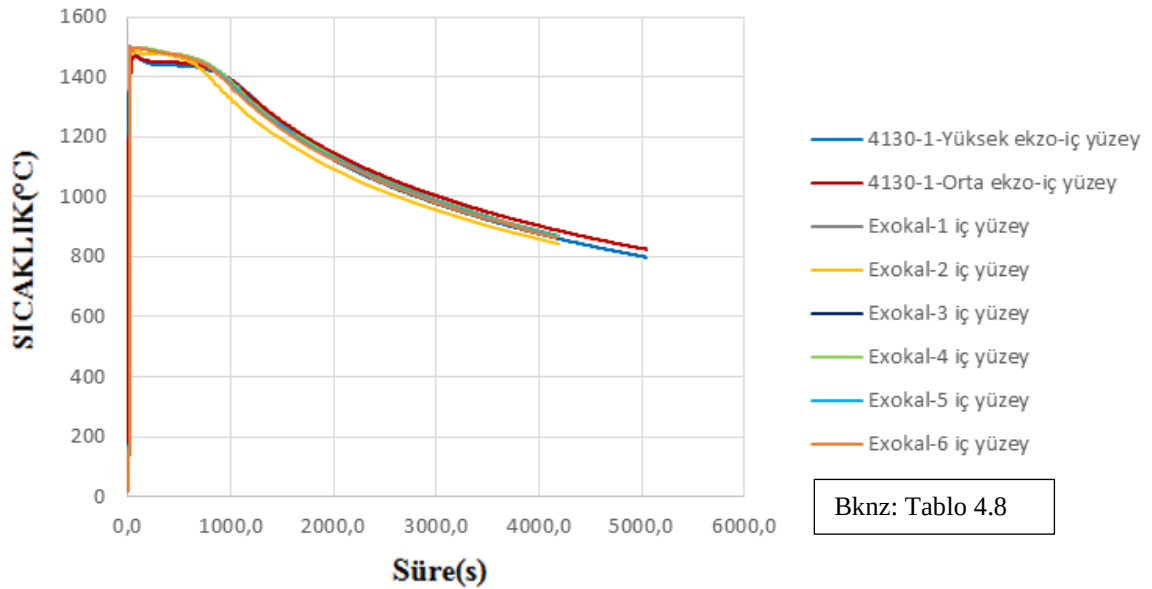


Şekil 5.85 AISI 4130 alaşımı için merkez bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

İç yüzey bölgesi sıcaklık-süre grafiğini gösteren Şekil 5.85 incelendiğinde 500. saniyedeki Exokal-3 besleyici gömlek kullanılarak alınan sıcaklık ölçümleri ile deneme dökümlerinde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak termal çiftler yardımıyla ölçülen sıcaklık eğrileri arasında 35°C olduğu belirlenmiştir. 1000. saniyedeki döküm uygulaması ile döküm benzeşim çalışmalarında ölçülen

sıcaklık değerleri aynı olduğu belirlenmiştir. İlerleyen sürelerde eğrilerin birbirleri ile kesiştiği belirlenmiştir.

Şekil 5.86 incelendiğinde 500. saniyedeki Exokal-1 besleyici gömlek kullanılarak alınan sıcaklık ölçümleri ile deneme dökümlerinde orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak termal çiftler yardımıyla ölçülen sıcaklık eğrileri arasında 26°C olduğu belirlenmiştir. 1000. saniyedeki döküm uygulaması ile döküm benzeşim çalışmalarında ölçülen sıcaklık değerleri aynı olduğu belirlenmiştir. İlerleyen sürelerde eğrilerin birbirleri kesişmediği ancak 10°C'nin altında bir sıcaklık farkının olduğu belirlenmiştir.

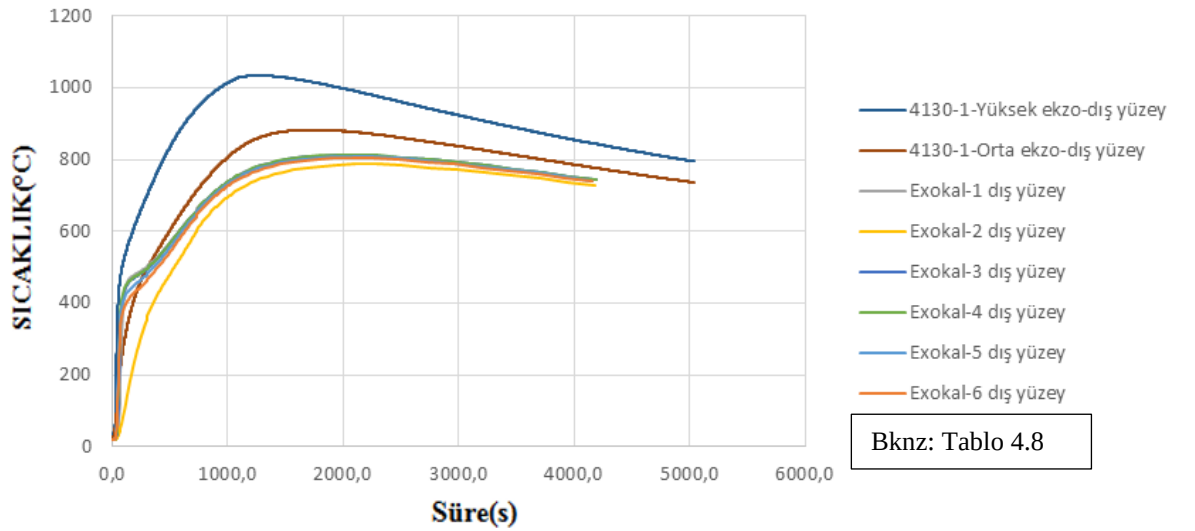


Şekil 5.86 AISI 4130 alaşımı için iç yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

Dış yüzey sıcaklık ölçümleri irdelendiğinde yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin ölçülen sıcaklık değerlerinin döküm benzeşim denemelerinde kullanılan besleyici gömleklerin farklı özelliklerine göre değişim gösteren sıcaklık değerlerine kıyasla daha yüksek olduğu net bir şekilde görülmektedir. Tablo 4.8'de gösterilen Exokal farklı özelliklere sahip besleyici gömleklerin dışında yeni özelliklere sahip Exokal besleyici gömlekler ile yapılan döküm benzeşim çalışmaları sıcaklık sonuçları incelediğinde dış yüzey sıcaklık ölçümleri arasındaki farkların daha önce yapılan benzeşim denemeleri ile aynı olduğu görülmüştür. Ancak yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlekler için Exokal-3 besleyici gömleğin merkez bölgesi ve iç yüzey

bölgesi sıcaklık ölçümlerinin yukarıdaki paragraflarda sayısal ifadelerle belirtildiği gibi deneme dökümlerinde ölçülen sıcaklık değerlerine oldukça yakındır.

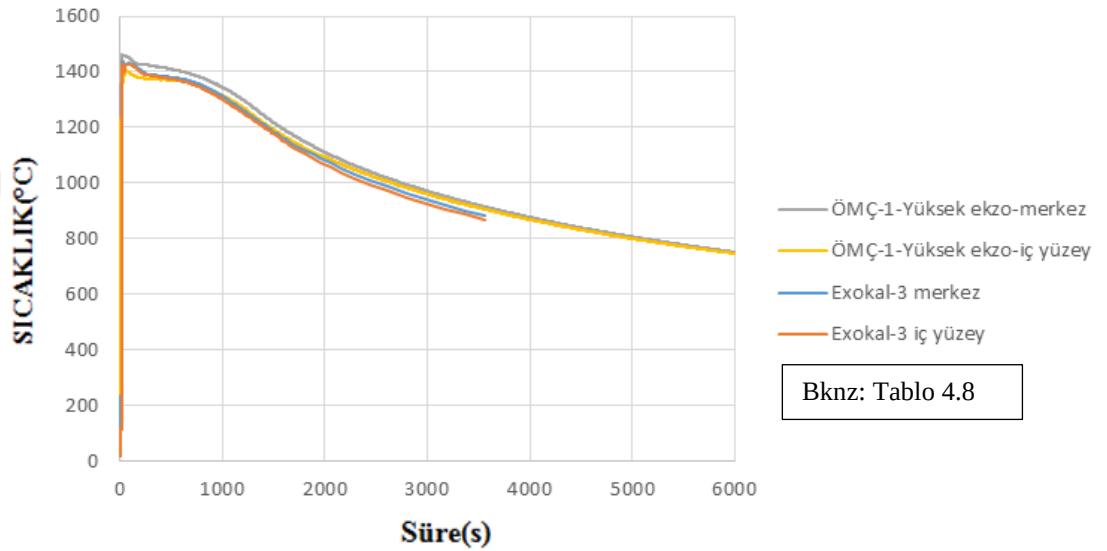
Orta ekzotermik özellikli besleyici gömlekler için dış çap ölçümlerinin daha düşük sıcaklık değerlerinde olduğu görülmektedir. Döküm benzeşim çalışmalarında kullanılan besleyici gömleklerin sıcaklık değerlerine oldukça yaklaşılmıştır. Exokal-1 besleyici gömleğin merkez ve iç yüzey ölçümlerinin tutarlı olduğu ve dış yüzey ölçümlerinin nispeten daha benzer davranış gösterdiği görülmektedir. Ancak bilinmelidir ki Exokal-1 ve döküm uygulamasında orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğin dış yüzeyinden ölçülen sıcaklık eğrileri arasında 20-40 °C arasında farklılıkların olduğu tespit edilmiştir.



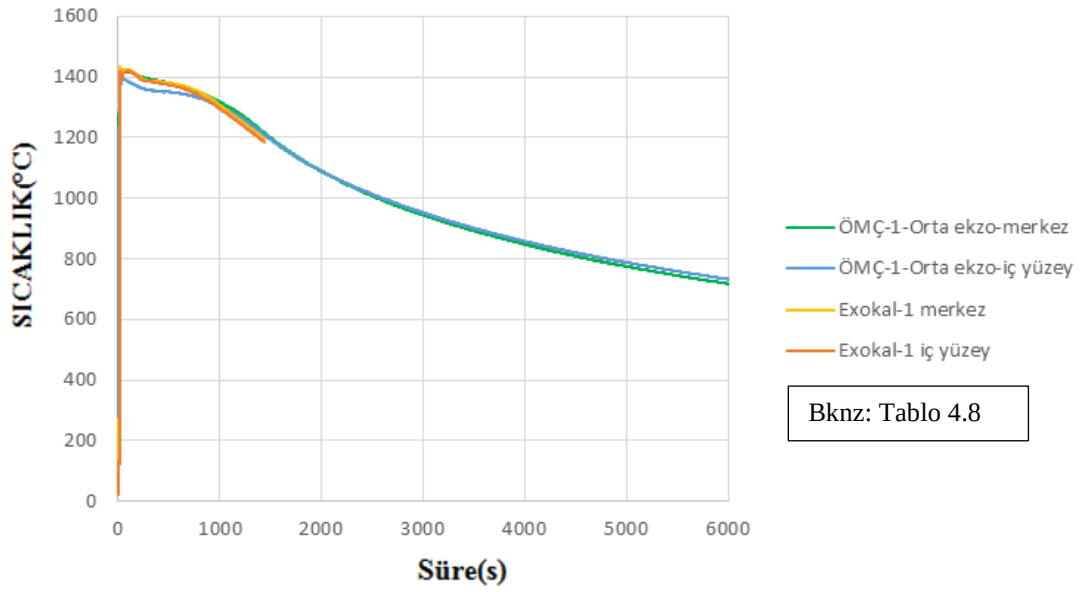
Şekil 5.87 AISI 4130 alaşımı için dış yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

Grafiklerin karşılaştırılması sonucunda yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek ile yapılan döküm uygulamasına en yakın besleyici gömlek özellikleri Exokal-3 olarak, orta ekzotermik özellikli besleyici gömlekler için Exokal-1 olarak belirlenmiştir. Bunun sonucunda östenitik mangan çeliği ve östenitik paslanmaz çelik için yapılacak olan benzeşim çalışmalarında Exokal-1 ve Exokal-3 besleyici gömlekler kullanılacaktır. Benzer şekilde sıcaklık-süre grafikleri çizilerek eğrilerin benzerlikleri irdelenecektir.

Şekil 5.88 ve Şekil 5.89’de östenitik mangan çeliğinin deneme dökümlerinde ölçülen sıcaklık değerleri ile benzeşim çalışmalarından alınan sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır. Benzer sıcaklık eğrileri östenitik paslanmaz çelik için Şekil 5.90-Şekil 5.92 arasında gösterilmektedir. Eğriler incelendiğinde östenitik mangan çelik alaşımı için yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin sıcaklık ölçümlerinin Exokal-3 ve Exokal-1 ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek seçilerek yapılan benzeşim çalışmalarında merkez sıcaklık ölçümlerinin 25-30°C arasında daha düşük sıcaklıkta olduğu belirlenmiştir. Ancak bu sıcaklık farkının doğrudan döküm parçasının kalitesine etki edeceği düşünülmemektedir. Sıcaklık eğrilerinin soğuma hızlarının benzer olmasından dolayı deneme dökümlerinde yüksek ekzotermik esaslı merkez sıcaklık ölçümü alınan termal çiftin merkeze doğru kaydığı ön görülmektedir.



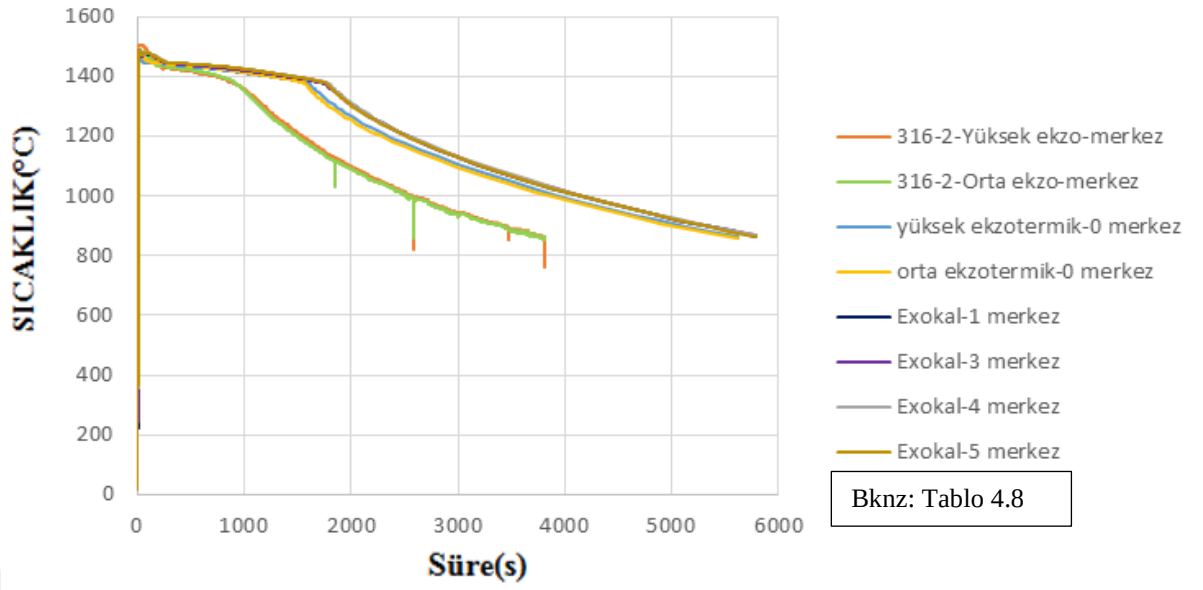
Şekil 5.88 A128M-A93-A alaşımı için merkez ve iç yüzey bölgelerinin sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (yüksek ekzotermik)



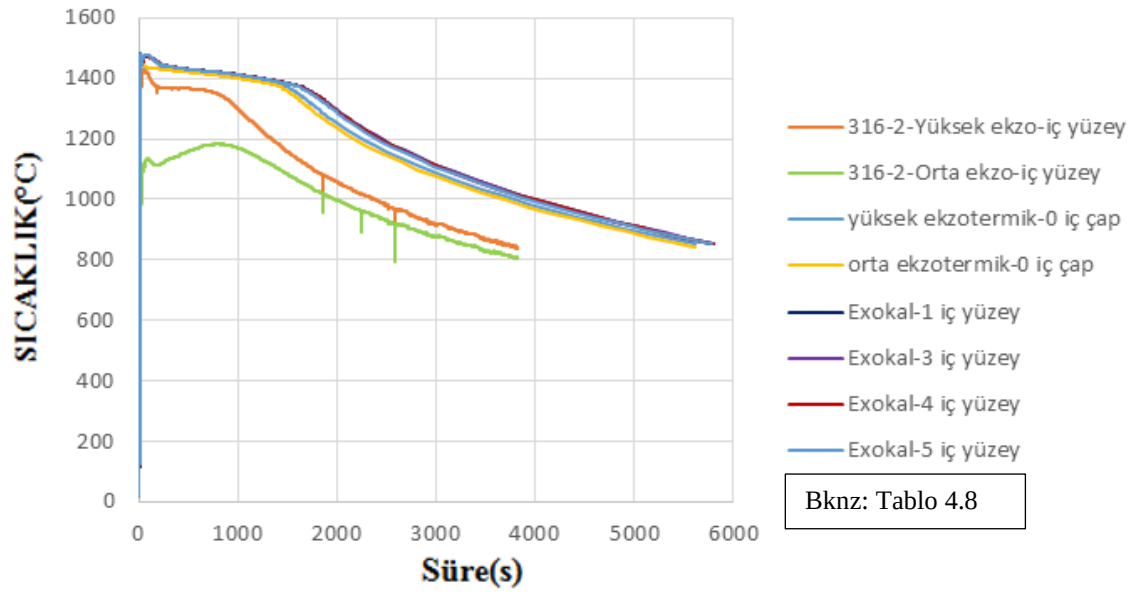
Şekil 5.89 A128M-A93-A alaşımı için merkez ve iç yüzey bölgelerinin sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (orta ekzotermik)

AISI 316 için düzenlenen grafikler aşağıda gösterilmektedir. Şekil 3.24 incelendiğinde İlk 500 saniyede döküm benzeşim programında seçilen ekzotermik besleyici gömleklerin sıcaklık eğrileri deneme dökümlerinden ölçülen sıcaklık eğrileri ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.

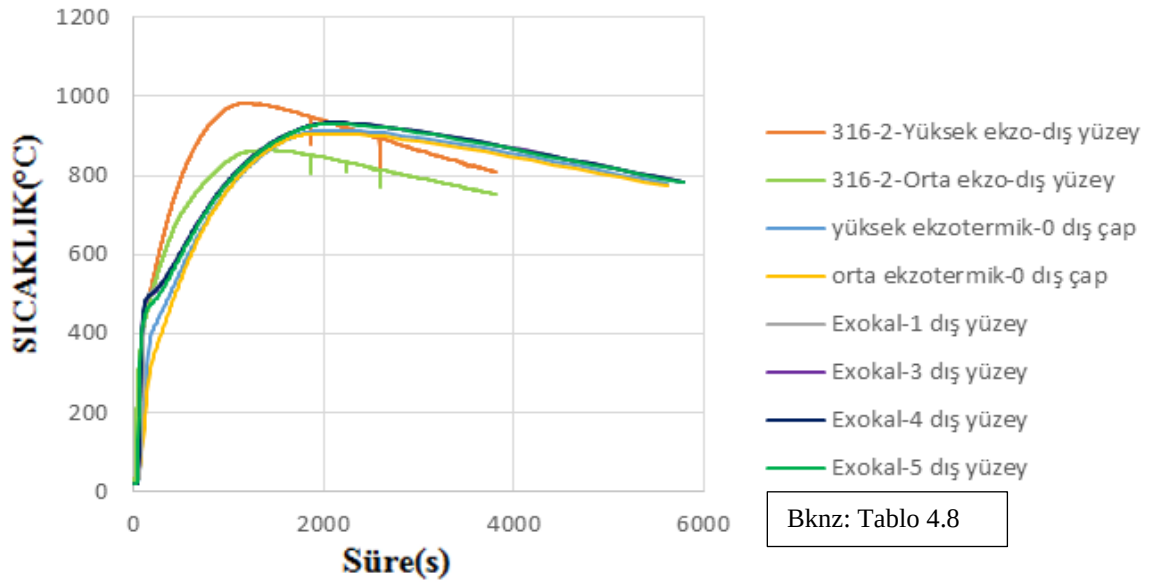
Şekil 5.91’da deneme dökümlerinde alınan iç yüzey sıcaklık ölçümlerinin döküm benzeşim sıcaklık eğrilerinden daha düşük değerlerde kaldığı görülmektedir. Şekil 5.92’da yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlekler ile orta ekzotermik özellikli besleyici gömleklerin dış yüzey ölçümleri arasında sıcaklık farkı olduğu görülmektedir. Yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömlekler ile yapılan deneme dökümlerinin dış yüzey ölçümlerinin döküm benzeşim programında seçilen besleyici gömleklerin sıcaklık eğrilerine Şekil 5.91’da yapılan karşılaştırılmaya göre daha uyumlu olduğu belirlenmiştir. Döküm uygulaması sıcaklık eğrilerinin eğimleri ile döküm benzeşim çalışmaları sıcaklık eğrilerinin eğimleri birbirine yakındır. Ancak her iki besleyici gömleğin deneme dökümlerinden ölçülen dış yüzey sıcaklık değerleri ile döküm benzeşim programından alınan sıcaklık değerleri arasında zamana bağlı olarak farklılar görülmektedir.



Şekil 5.90 AISI 316 alaşımı için merkez bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

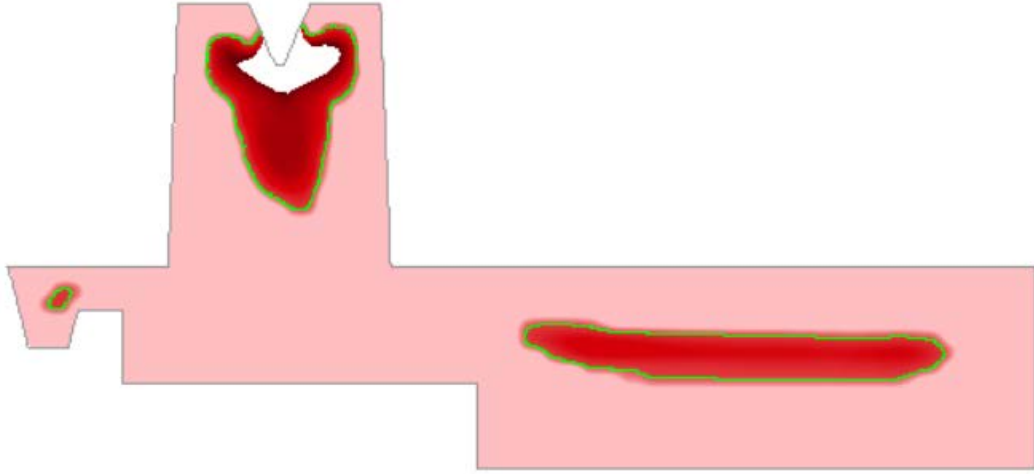


Şekil 5.91 AISI 316 alaşımı için iç yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması



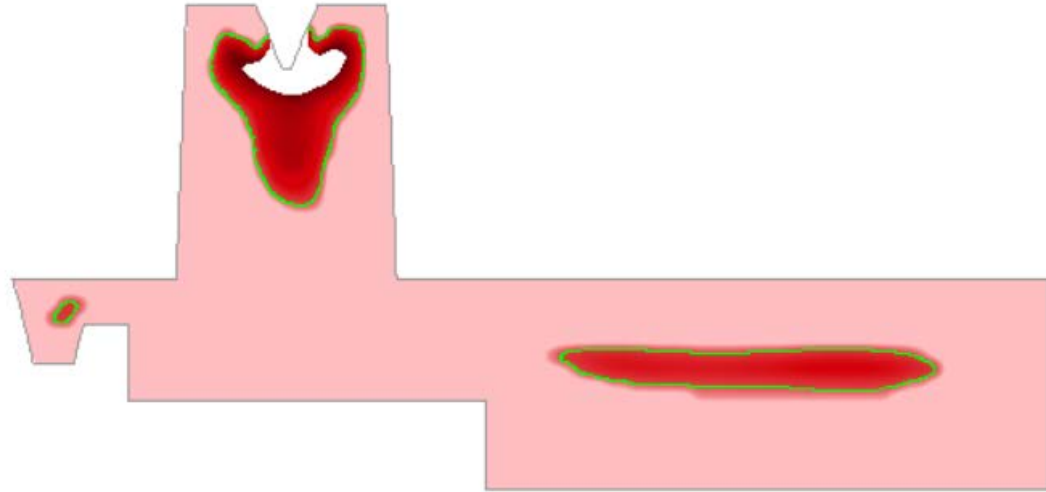
Şekil 5.92 AISI 316 alaşımı için dış yüzey bölgesi sıcaklık ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

Exokal-1 ve Exokal-3 kullanılarak yapılan döküm benzeşim çalışmaları sonucunda döküm parçalarının çekinti bölgeleri yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömlekler için Şekil 5.93 ve Şekil 5.94’de gösterilmektedir. AISI 4130 alaşımı için yapılan gama radyografi sonuçları incelendiğinde; yüksek ekzotermik karakterli besleyici kullanılarak dökülen parçada çekinti oluşumunun giriş yolluğundan 50-100mm arasında ve ASTM-E446 standartına göre level 1 seviyesinde, orta ekzotermik karakterli besleyici kullanılarak dökülen parçada çekinti oluşumunun giriş yolluğundan 50-100mm arasında ve 100-150mm arasında ASTM-E446 standartına level 2 seviyesinde çekinti içerdiği belirlenmiştir. Döküm benzeşim çalışmalarının çekinti bölgeleri inlediğinde gama radyografi sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 5.93 görüldüğü gibi yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömlek seçilerek yapılan benzeşim çalışmasının çekinti bölgesinde çekinti miktarının %16-19 seviyelerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 5.93 AISI 4130 alaşımı ve Exokal-3 besleyici kullanılarak yapılan benzeşim çalışmasının çekinti bölgeleri

Şekil 3.28. incelendiğinde 0-50 mm arasında çekinti yüzdesinin %10 değerinin altında olduğu ve 100mm-150mm arasında çekinti yüzdesi %10-18 arasında değiştiği belirlenmiştir. Daha koyu olan bölgelerde çekinti yüzdesi %18'lere kadar çıktığı görülmüştür.



Şekil 5.94 AISI 4130 alaşımı ve Exokal-1 besleyici kullanılarak yapılan benzeşim çalışmasının çekinti bölgeleri

5.6 Döküm Parçasının Çekinti Hataları

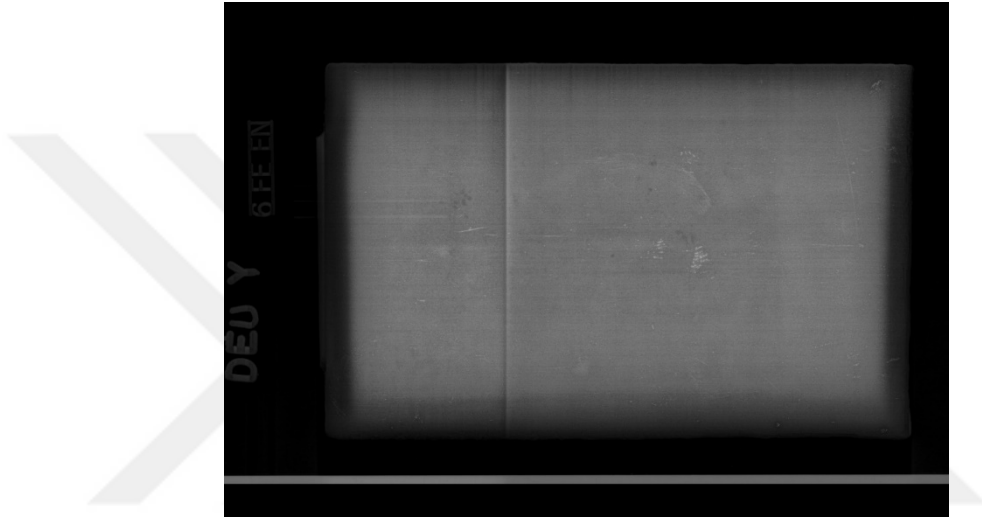
Radyografik muayene X veya gama ışınları kullanılarak malzeme içindeki süreksizliklerin görüntüsünün bir röntgen filmi üzerine aktarılmasıyla gerçekleştirilen bir tahribatsız muayene yöntemidir. Radyasyon (Işın) kaynağı ile film arasında muayene edilecek parça yerleştirilir ve ışınların bir kısmı parça 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. (Sonat ve ve diğer., , 2008)

Ou ve arkadaşları 2002 yılında döküm parçasının çekinti tayinini X ışınları kontrol yöntemi ile incelemiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda döküm parçalarının çekinti seviyeleri standartlar doğrultusunda 0 seviyesi en iyi 5 seviyesi en kötü olacak şekilde derecelendirilmiştir.

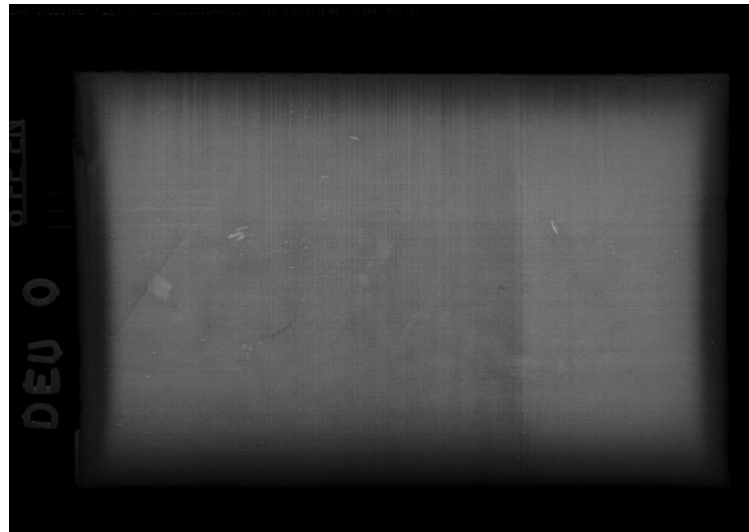
Yapılan her bir döküm çalışmalarında yüksek ve orta ekzotermik karakterli olmak üzere 2 adet parçanın dökümü gerçekleştirilmiştir. Kalıp tasarımında kullanılan besleyici gömleklerin farklı olması döküm parçasının çekinti görünümünü nasıl etkilediğinin anlamak amacıyla gama radyografi testi yapılmıştır. Çelik döküm uygulamasında ilk olarak döküm uygulaması yapılan GS-60 çeliğinin yüksek ve orta ekzotermik karakterli besleyici gömleklerin kullanıldığı parçaların radyografi sonuçları Şekil 5.95 ve Şekil 5.96’de verilmiştir.

Şekil 5.95 ve Şekil 5.96 incelendiğinde döküm parçaları içerisinde bir çekinti hatası görülmemiştir. Bu doğrultuda daha önce yapılan ve sonuçları verilen döküm benzeşim çalışmalarına devam edilerek ilk makro çekinti oluşumu görülen Şekil 4.11’te verilen boyutlar üzerinde döküm çalışmalarına devam edilmiştir.

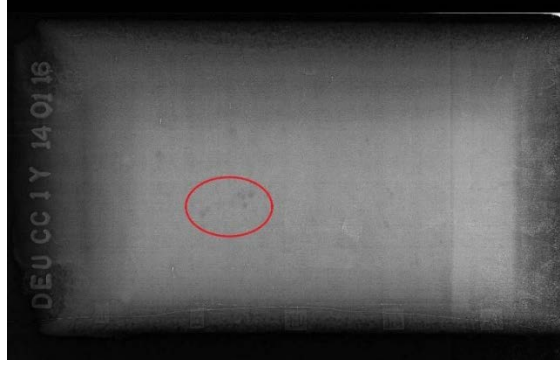
Şekil 5.97 ve Şekil 5.98’de 4130 alaşımına sahip ilk döküm uygulamasının radyografik çekinti görünüşleri, Şekil 19’da standart çekinti görünüşleri verilmektedir. Şekil 5.97 ve Şekil 5.98 ayrı ayrı ASTM E446’a göre Şekil 5.99 ile karşılaştırıldığında; yüksek ekzotermik karakterli besleyici kullanılarak dökülen parçada çekinti oluşumunun giriş yolluğundan 50-100mm arasında ve level 2 olduğu, orta ekzotermik karakterli besleyici kullanılarak dökülen parçada çekinti oluşumunun giriş yolluğundan 50-100mm arasında ve 100-150mm arasında level 1 seviyesinde çekinti içerdiği belirlenmiştir.



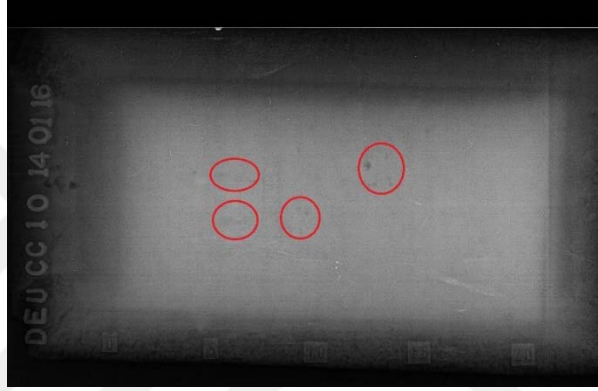
Şekil 5.95 Yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlek kullanılarak GS-60 alaşımı ile dökülen parçanın radyografi görüntüsü



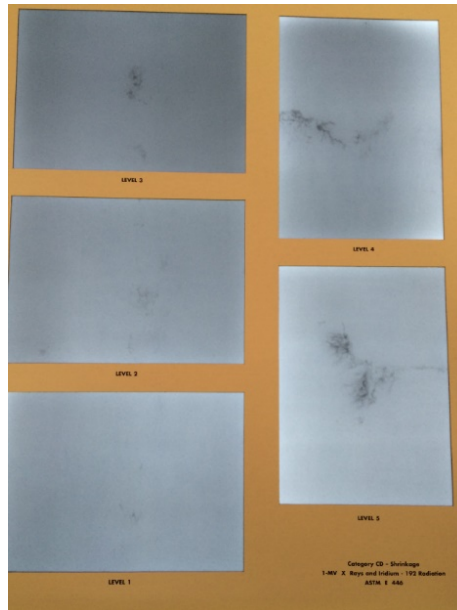
Şekil 5.96 Orta ekzotermik karakterli besleyici gömlek kullanılarak GS-60 alaşımı ile dökülen parçanın radyografi görüntüsü



Şekil 5.97 Yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömlek kullanılarak AISI 4130 alaşımı dökülen parçanın radyografi görüntüsü.



Şekil 5.98 Orta ekzotermik karakterli besleyici gömlek kullanılarak AISI 4130 alaşımı dökülen parçanın radyografi görüntüsü



Şekil 5.99 ASTM-E446'e göre çekinti bölgelerinin seviyelendirilmesi

BÖLÜM BEŞ

GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İncelenen karışımlarda hem ekzotermik özellikler hem de yalıtım özellikleri ele alınmıştır. Ekzotermik reaksiyonun karakterize edilmesi için literatürdeki metalotermik çalışmalar incelenmiş ve yapılan analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Mikro yapı görüntülerinde görülen metalik alüminyum partiküllerinin, yanma sonrasında korundum fazına dönüştüğü görülmüştür. Yanma öncesi görülen korundum fazı ise yalıtım elemanları ve ve diğer., dolgu elemanlarına ait olan fazdır.

DTA-TGA sonuçlarına bakıldığında reaksiyon sıcaklıkları literatür ile benzerlik göstermektedir. Fakat gerçek döküm şartlarında ısınma çok daha hızlı gerçekleştiği için reaksiyon süreleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmiştir. DSC sonuçlarının da DTA-TGA sonuçlarını desteklediği, fakat reaksiyon kinetikleri için DSC sonuçlarının esas alınmasının daha doğru olacağı görülmüştür. Bu nedenle ekzotermik reaksiyon karakterizasyonunda literatürde de olduğu gibi DSC kullanımı daha etkin olmaktadır.

Test edilen besleyici gömlekler orta ekzotermik olarak ortalama 456 kJ enerji verirken yüksek ekzotermik olarak ortalama 636 kJ enerji vermektedir. Ateşleyici değişikliğinin verilen enerji miktarını çok etkilemediği, fakat reaksiyon kinetiklerini ve süresini değiştirdiği görülmüştür. Karışım 2 ve Karışım 4, sırasıyla Karışım 1 ve Karışım 3'ten daha önce ekzotermik reaksiyona girmektedir.

Sonuç olarak;

- Ekzotermik özelliklerin daha az yalıtım özelliklerinin daha önemli olduğu orta ekzotermik besleyici gömleklerin ısı kaybının daha yüksek olduğu büyük hacimli besleyiciler sistemleri için,
- Ekzotermik reaksiyon sonucu ortaya çıkan enerjini daha fazla olduğu yüksek ekzotermik besleyici gömlekler ise küçük ve hemen ısıtılacak besleyici sistemleri için,

daha uygun olduğu ön görüsüne varılmıştır.

Ateşleyici değişiminde baryum esaslı ateşleyicilerin nispeten daha önce esas ekzotermik reaksiyonu başlattığı görülmüştür. Bununla birlikte farklı ateşleyicilerin kullanıldığı karışımlarda elde edilen ısı değerleri birbirine yakındır. Böylece flor bazlı ateşleyici yerine baryum bazlı ateşleyicinin kullanılabileceği görülmüştür.

Gömlek yakma çalışmaları incelendiğinde fiber yalıtım elemanının kullanıldığı karışımlarda soğuma görece daha yavaş olmaktadır. Fakat fiber kullanımı konusunda Avrupa Birliği'nin ciddi kısıtlamaları yün esaslı yalıtım elemanlarını kullanılmasını zorunlu hale getirilmiştir. Bu nedenle önümüzdeki dönemlerde yapılacak çalışmalarla çevre kısıtlarından ödün vermeden dolgu malzemesi oranları ve çeşitleri değiştirilerek söz konusu fark kapatılmalı hatta iyileştirilmesi gerekmektedir.

Besleyici gömleklerin performansları test etmek amacıyla ergime sıcaklığı düşük ve katılaşma çekintisi oranı yüksek olan küresel grafitli dökme demir alaşımı ile deneme dökümleri gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada yüksek ekzotermik bileşime sahip olan Karışım 3 ve Karışım 4 denenmiştir. Termal çiftler besleyici gömlek içerisinde ve dışarısında belirli noktalara sabitlenmiştir.

Seramik kaplı ısı çiftler döküm ve katılaşma sırasında ilk denemelerde kırılmıştır. Bu nedenle etki ölçümler gerçekleştirilememiştir. Fakat üçüncü denemedeki ölçümlerde gömlek performansları karşılaştırılabilmektedir. Karışım 4 ısı karakterizasyonlar sırasında ölçüldüğü gibi yüksek bir enerji vermiş ve ölçülen en yüksek sıcaklıkları Karışım 3'e göre yaklaşık 7 °C daha yüksek olmuştur. Sıvı metalin soğuma hızları her iki besleyicide de birbirine yakın olmakla birlikte Karışım 4 biraz daha hızlı soğumuştur.

Dökülen küp parçadan ve besleyici kısımlarından belirli bölgelerden çıkartılan numunelere optik ve elektron mikroskobu ile metalografik inceleme yapılmıştır. İncelemeler sonucunda beklendiği gibi grafit yapısının küreselleştiği görülmüştür. Fakat besleyicinin parçaya bağlandığı kısımlarda yaklaşık 1 mm derinliğe kadar

yapının lamele döndüğü görülmüştür. Aynı zamanda özellikle gömlek bileşiminde bulunan alüminyumun metale karıştığı düşünülmektedir. Özellikle Karışım 4 daha yüksek sıcaklıktan soğumaya başlamış ve daha uzun süre sıcak kaldığı için etkileşimin daha fazla olduğu düşünülmektedir.

Yapılan faz incelemeleri ile döküm sonrası besleyici bileşimi incelenmiştir. Daha önce açık atmosferde yapılan yakma testleri sonrasında yapılan incelemelerden farklı olarak magnezyum içeren bileşimler tespit edilmiştir. Yine çoğunlukla alüminyumun oksitlenmesi sonucu ortaya çıkan korunt fazı tespit edilmiştir.

Katılaşma sonrası oluşan çekinti görünümü açısından benzeşim sonuçları ve döküm sonuçları birbirine benzemektedir. Fakat sıcaklık ölçümlerinde ciddi farklılıklar vardır. Soğuma rejimleri benzerlik gösteren gömlekler olmakla birlikte örtüşen grafikler elde edilememiştir.

Sonuç olarak yüksek ekzotermik besleyicilerin küresel grafitli dökme demir alaşımlarında kullanılmasında yapılan hesaplamalar önem kazanmaktadır. Gömlek içerisindeki metalin uzun süre sıcak kalması kimyasal etkileşimi arttırmaktadır. Ayrıca benzeşim çalışmalarında farklılıklar bulunmaktadır ve doğru besleyici boyutlandırmasını zorlaştırmaktadır.

Besleyici gömleklerin performansları test etmek amacıyla ergime sıcaklığı düşük ve katılaşma çekintisi oranı yüksek olan küresel grafitli dökme demir alaşımı ile deneme dökümleri gerçekleştirilmiştir. Yüksek ekzotermik ve orta ekzotermik bileşime sahip olan Karışım 1, Karışım 2, Karışım 3 ve Karışım 4 bileşimine sahip olan besleyici gömlekler denenmiştir. Termal çiftler besleyici gömlek içerisinde ve dışarısında belirli noktalara sabitlenmiştir.

Bazı dökümlerde termal çiftlere bağlı çeşitli sorunlar yaşansa da genel olarak soğuma eğrileri elde edilebilmiştir. Besleyici gömlekler içerisindeki sıvı metalin soğuma davranışları incelendiğinde genel olarak baryum esaslı ateşleyici içeren gömleklerde çıkılan en yüksek sıcaklığın daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca

seramik fiber içeren gömlek içerisindeki sıvı metalin ise daha geç katılaştığı görülmüştür.

Benzeşim çalışmaları ile program aracılığıyla elde edilen soğuma eğrileri deneysel çalışmalardaki soğuma eğrilerine benzetilmeye çalışılmıştır. Fakat programın izin verdiği sınırlı parametrelerin değişiminin soğuma eğrileri pek etkilemediği ve elde edilen sonuçların deneysel sonuçlardan oldukça uzak olduğu tespit edilmiştir.

Orta ekzotermik besleyici gömleklerin performansları test etmek amacıyla küresel grafitli dökme demir alaşımı ile deneme dökümlerine devam edilmiştir. Orta ekzotermik bileşime sahip olan besleyici gömlekler denenmiştir. Termal çiftler besleyici gömlek içerisinde ve dışarısında belirli noktalara sabitlenmiştir.

Bazı dökümlerde termal çiftlere bağlı çeşitli sorunlar yaşansa da genel olarak soğuma eğrileri elde edilebilmiştir. Besleyici gömlekler içerisindeki sıvı metalin soğuma davranışları incelendiğinde genel olarak baryum esaslı ateşleyici içeren gömleklerde çıkılan en yüksek sıcaklığın daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca seramik fiber içeren gömlek içerisindeki sıvı metalin ise daha geç katılaştığı görülmüştür.

Yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömleklerin benzeşim çalışmaları ile elde edilen soğuma eğrileri düzenlenmiştir ve deneysel çalışmalardaki soğuma eğrilerine benzetilmeye çalışılmıştır. Sıcaklık-süre eğrileri incelendiğinde yüksek ekzotermik karakterli besleyici gömleklerin dış yüzey ölçümü hariç diğer bölgelerden ölçülen sıcaklık değerlerinin uyumlu olduğu görülmüştür. Orta ekzotermik karakterli besleyici gömleklerin benzeşim çalışması yapılmıştır. Orta ekzotermik karakterli besleyici gömleklerin sonuçları incelendiğinde, dış yüzey haricinde diğer bölgelerde alınan sıcaklık ölçümlerinin benzer olduğu görülmektedir. Döküm benzeşim programında özellikleri değiştirilmiş besleyici gömlekler ile yapılan benzeşim çalışmalarından elde edilen soğuma eğrileri incelendiğinde bariz bir değişim görülmemiştir.

Farklı alaşımlarda kullanılan besleyici gömleklerin döküm sonrası X ışınları kırınım analizleri incelendiğinde korunt (Al_2O_3) fazları görülmüştür. Korundum fazının hem yalıtım elemanında hem de alüminotermik reaksiyonun sonucu olduğu düşünülebilir. Metalik alüminyuma rastlanmadığından alüminotermik reaksiyonun tam olarak gerçekleştiği söylenebilir.

Döküm sonrası döküm uygulamasında kullanılan yüksek ve orta ekzotermik karakterli besleyici gömleklerin içerdikleri element miktarlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. Genel olarak yüksek ve orta ekzotermik özellikli besleyici gömlekler ile döküm kumu arasında kimyasal bir etkileşimin olmadığı anlaşılmıştır. 4130 alaşımlı döküm parçasının ve besleme metalinin farklı bölgelerinden yapılan kimyasal analiz sonuçlarının birbirine yakın olmasından dolayı besleyici gömleklerin döküm metali ile etkileşime girmediği tespit edilmiştir.

4130 alaşımlı döküm uygulamasında yüksek ekzotermik karakterli besleyici kullanılarak dökülen parçada çekinti oluşumunun giriş yolluğundan 50-100mm arasında ve level 2 olduğu, orta ekzotermik karakterli besleyici kullanılarak dökülen parçada çekinti oluşumunun giriş yolluğundan 50-100 mm arasında ve 100-150mm arasında level 1 seviyesinde çekinti içerdiği belirlenmiştir. 4130 alaşımı için orta ekzotermik özellikli besleyici gömlek kullanılarak yapılan çalışmalar sonucunda döküm parçasının level 1 seviyelerinde olması yüksek ekzotermiğe göre daha etkin besleme yaptığını göstermektedir.

4130-1 döküm uygulamasında sıvı metalin soğuma hızları karşılaştırıldığında orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğin merkez ve iç yüzey sıcaklık ölçümleri esas alınarak yapılan hesaplama sonuçlarının yüksek ekzotermik özellikli besleyici gömleklere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda orta ekzotermik özellikli besleyici gömleğin daha yavaş soğuma davranışı gösterdiği belirlenmiştir. Döküm benzeşim tabanında bulunan besleyici gömleklerin özellikleri değiştirilerek iyileştirmeler yapılmıştır. Ancak her iki besleyici için dış yüzey ölçümlerinde farklılıkların olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Abhilash, E., ve Joseph, A. M. (2009). Modelling and simulation of casting process: an overview. *Indian Foundry Journal*, 28-37.
- Amin, L. D., Patel, S., Mishra, P., ve Joshi, D. (2014). Rapid development of industrial castings using computer simulation. *Indian Foundry Journal*, 40-42.
- Aran, A. (2019). *Döküm teknolojisi imal usülleri ders notları*. Işık Üniversitesi Resmi Sitesi. 2 Haziran 2019, <http://www2.isikun.edu.tr/personel/ahmet.aran/dokum.pdf>
- Arda, İ., Şirin, S. ve Kayıkçı, R. (2011). Küresel grafitli dökme demir dökümlerinde hacimsel değişime etki eden faktörlerin incelenmesi. *6th International Advanced Technologies Symposium*. Elazığ: IATS, 35-46.
- Arıkan, M., ve Sahir , A. (2019,). *Sonlu Elemanlar Metodu'nun Mühendislikteki Uygulamaları*. 19 Haziran 2019, docplayer: <https://docplayer.biz.tr/20963087-Sonlu-elemanlar-metodunun-muhendislikte-uygulamaları.html>
- ASM. (1998). *Casting*. Ohio: American Society of Materials.
- Beeley, P. (2001). *Foundry technology*. Oxford: Butterworth Heinemann.
- Brain, S. M. (2004). *Introduction to materials engineering and Science*. New York, Wiley: Interscience Publication.
- Brown, J. R. (2000). *Foseco ferrous foundryman's hanbook*. Oxford: Butterworth Heinemann.
- Campbell, J. (2003). *Castings*. Londra: Butterworth-Heinemann.
- Campbell, J. (2004). *Casting practice the 10 rules of casting*. Londra: Butterworth-Heinemann.
- Candeğer, K. C. (2001). Dökümde besleyiciler ve ekzotermik besleyici malzemeler. *Metalurji*, 5-12.
- Carlson, K. D., ve Beckermann, C. (2008). Use of the niyama criterion to predict shrinkage-related leaks in high-nickel steel and nickel-based alloy castings.

Proceeding of the 62th SFSA Tehcnical and Operating Conference. Chicago: Steel Foundry Society of America, 5-8.

Chudasama, J. B. (2013). Solidification Analysis and Optimization Using Pro-Cast. *International Journal of Research in Modern Engineering and Emerging Technology*, 9-19.

Costabel, M. (2019). *Principles of boundary element methods*. Universite deRennes: 10 Haziran 2019
https://perso.univrennes1.fr/martin.costabel/publis/Co_PrinciplesBEM.pdf

Çolak, M., ve Kayıkçı, R. (2002). Döküm simülasyon programları üzerine bir değerlendirme. *Metal Dünyası*, 2-5.

Dures, L., Costa, B. F., Santos, R., Correia, A., Campos, J. ve Portugal, A. (2007). Fe₂O₃/Aluminium thermite reaction intermediate and final products characterization. *Material Science and Engineering A*, 199-210.

Emily, M. H. ve Michelle, L. P. (2005). Ignition dynamics and activation of metallic thermites from nano to micro scale particule composites. *Journal of Applied Physics*, 98.

Escot, P. B., Chauveau, C. ve Gökalp, I. (2007). Experimental studies on the burning of coated and uncoated micro and nano-sized aluminum Particles. *Aerospace Science and Techology*, 33-38.

Eymez, S. (2014). Sfero analizlerinde simülasyon programı ile dökümhane koşullarının adaptasyonu iç çekinti tayini. 7. *Uluslararası Ankiros Döküm Kongresi*. İstanbul: Türk Döküm Sanayicileri Derneği, 1-12.

Flemings, M. C. (1974). *Solidification process*. New York: Mc Graw Hill.

Foundry, F. (2013). *Foundry Prattice*. Foseco: 23 Mayıs 2013
http://www.foseco.com.tr/tr/downloads/FoundryPractice/23001_Simulation_with_thermal_true_data.pdf.

- Gordon, P. (1968). *Principles of phase diagrams in materials systems*. New York: McGraw Hill.
- Gwizdz, 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*, 67-72.
- Hahma, A., Gany, A. ve Palovuori, K. (2006). Combustion of activated aluminum. *Combustion and Flame*, 464-480.
- 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. *Proceeding of The 67th SFSA Technical and Operating Conferance*. Chicago: Steel Founders Society of America, 1-28.
- Heine, R. W. (1967). *Principles of metal casting*. Stanford: McGraw-Hill.
- Hua, F. R., Liang, L. H., Ning, S. K., Xia, W. W. ve Bing, Y. X. (2006). Kinetics of thermite reaction in Al-Fe₂O₃ system. *Thermochimica Acta*, 129-131.
- Hussain, H. ve Khandwawala, A. I. (2013).). Optimal design of two feeder system: simulation studies for techno-economic feasibility. *American Journal of Engineering*, 314-321.
- Ignaszak, Z., P, P. ve J, C. (2005). Heat source description of iso-exothermic sleeves with the use of continous function. *Archives of Foundry*, 45-57.
- Iqbal, M., Patel, S. veVidyarthee, G. (2014). Simulation of casting and its validation by experiments. *International Journal of Engineering Science and Research Technology*, 555-565.
- Mei J.ve R. D. (1999). Mechanisms of the aluminium-iron oxide thermite reaction. *Scripta Materialia*, 541-548.
- Jabbari, M. veHosseinzadeh, A. (2013). Numerical modeling of coupled heat transfer and phase transformation for solidification of the gray cast iron. *Computational Materials Science*(68), 160-165.

- Jadhao, V. S. ve Salunke, J. J. (2014). Review paper on simulation based casting. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 17370-17374.
- Jeffrey, G., Pantoya Michelle, L. ve Valery, I. L. (2012). Effect of oxide shell growth on nano aluminium thermite propagation rates. *Combustion and Flame*, 3448-3453.
- Jolly, M. (2002). Casting simulation: how well do reality and virtual casting match State of the art review. *International Journal of Cast Metals Research*, 1-11.
- Kayıkçı, R. ve Akar, N. (2007). Farklı Kesit Kalınlıklarına Sahip Büyük Hacimli Bir Çelik dökümün Simülasyon Teknikleri ile Tasarlanması. *Politeknik*, 395-401.
- Khade, U. ve Sawant, S. (2014). Riser design optimization based on feeding rules using 3D CAD Modelling Casting Simulation. *Proceeding of IRF International Conference*. Hindistan.
- Kumruoğlu, L. C. ve Özer, A. (2008). Investigation of critical liquid fraction factor in nodular iron casting by computer simulation. *Journal of Materials Processing*, 182-188.
- Lipowska, B., Witek, J. ve Stec, K. (2010). Aluminium dross based insulating and exothermic materials for metallurgical industry. *Archives of Foundry Engineering*, 115-118.
- Menon, P. R. (1997). *Sa Paulo Brazil Patent No. US 006133340A*.
- 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*, 34-43.
- Miki, M. (1992). *Birleşik Krallık Patent No. GB2260285A*.
- 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 and Engineering Research*, 30-36.

- Narwade, A. R., Choudhari, C. M. ve Narkhade, B. E. (2014). Feeder design and analysis by casting simulation software. *International Journal of Informatine and Futuristic Research*, 281-292.
- Neu, M. G. ve Gough, M. J. (1993). *Birmingham, England Patent No. US005180759A*.
- NovaCast. (2013). Nova Flow&Solid Gravity CV User Guide 4.6. Nova Cast System AB.
- 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. *Methodology Metallurgical And Materials Transaction B*, 741-755.
- Özel, A. (2019). *Katılaşma zamanı ve besleme*. Sakarya Üniversitesi: 30 Mayıs 2019 http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/78351/50435/b%C3%B6l%C3%Bcm_4_kat%C4%B1la%C5%9Fma_zaman%C4%B1_ve_besleme.pdf
- Paki, T., Yeşilata, B. ve Işıker, Y. (2007). Kompozit yapı malzemelerinde ısıt özelliklerin ölçümü-2: hurda lastik katkılı beton için ölçüm sonuçları. *Mühendis ve Makine*, 33-39.
- Perez, J. C., Ruiz, J. E., Gonzalez, L. P. ve Gonzalez, P. R. (2012). Using of rice husk in the carbon steel casting part process. *Ingenieria Macanica*, 115-122.
- Perzyk, M., Kochanski, A., Mazurek, P. ve Karrczewski, K. (2014). Selected principles of feeding systems design: simulation vs industrial Experience. *Archives of Foundry*, 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*, 69-74.
- Porter, D. A. ve Easterling, K. A. (1992). *Phase tranformation in metal and alloy*. Londra: Chapman Hall.

- Ramu, T., Kumar, M. L. ve Ganesh, B. K. (2012). Modeling simulation and analysis in manufacturing of a flywheel casting by s. g. iron. *International Journal of Materials and Biomaterials Applications*, 25-28.
- Ravi, B. (2008, January). Casting simulation and optimisation: benefits, bottlenecks and best practice. *Technical Paper for Indian Foundry Journal*, 1-12.
- Rundman, K. B. (2010). *Metal casting*. Michigan: Dept. of Materials Science and Engineering.
- Sandell, P. K. (2008). Feeding of hollow cylindrical castings. *68th World Foundry Congress* (s. 201-206). Chennai: World Foundry Organization.
- Saturia, M., Gada, V. H., Sharma, A. ve Ravi, B. (2012). Computation of feed-paths for solidification using level-set-method. *Journal of Materials Processing Tehnology*, 1236-1249.
- Sola, F. (2014). Ingot feeding systems: analysis of fiber's behaviour before/after casting. *2nd International Conference I Ingot Casting Rolling and Forging*. Milano: AIM, 1-24.
- Sonat, E. E. ve Yelbay, H. İ. (2008). Dökümlerin radyografik muayenesinde kullanılan standartlar. *3rd International Non-Destructive Testing Symposium and Exhibition*. İstanbul, 1-10.
- Standard, I. (2009). *Hindistan Patent No. IS 15865*.
- Stefanescu, D. M. (2009). *Science and engineering of casting Solidification*. New York: Springer Science+Business Media.
- Tackaberry, T., Dahlstroom, P., Midea, A. ve Powell, C. (2008). *Avrupa Patent No. EP 1879710A1*.
- Tavakoli, R. ve Davami, P. (2008). Automatic optimal feeder design in steel casting process. *Computer Methods in Applied Mechanics an Engineering*, 921-932.
- Thomas, J. W., Hardin, R. A. ve Beckermann, C. (2014). Thermophysical properties for ASK chemical and exochem riser sleeves for steel castings. *Proceeding of The*

67th SFSA Technical and Operating Conference. Chicago: Steel Founders Society of America, 1-23.

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

William, A. W. ve Marc, J. A. (2000). Thermal conductivity measurment. *CRC Press*, 11-14.

Yüksel, Ç. (2019). *Besleyici tasarımı*. Atatürk Üniversitesi: 02 Haziran 2019
<http://avesis.atauni.edu.tr/ImageOfByte.aspx?Resim=8&SSNO=10&USER=4056>



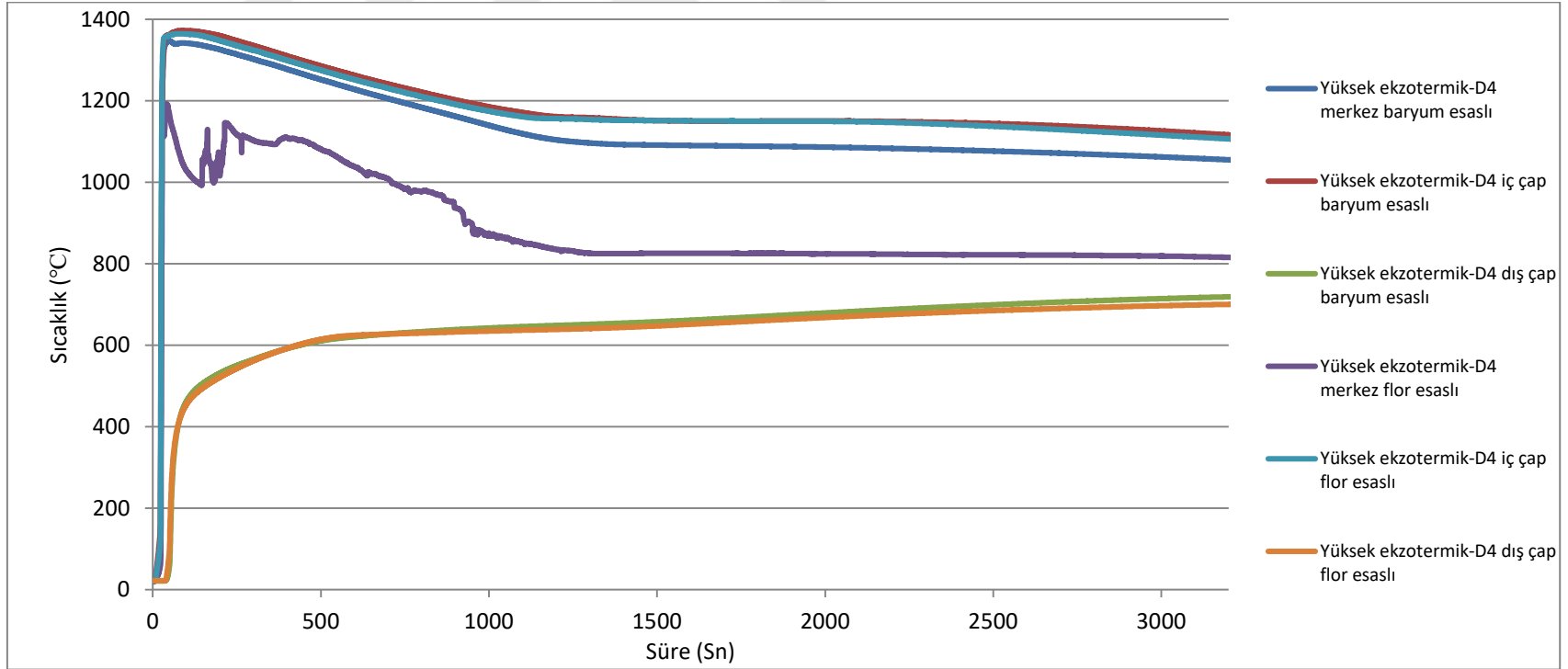
EKLER

EK 1: GÖSTERİMLER VE KISALTMALAR

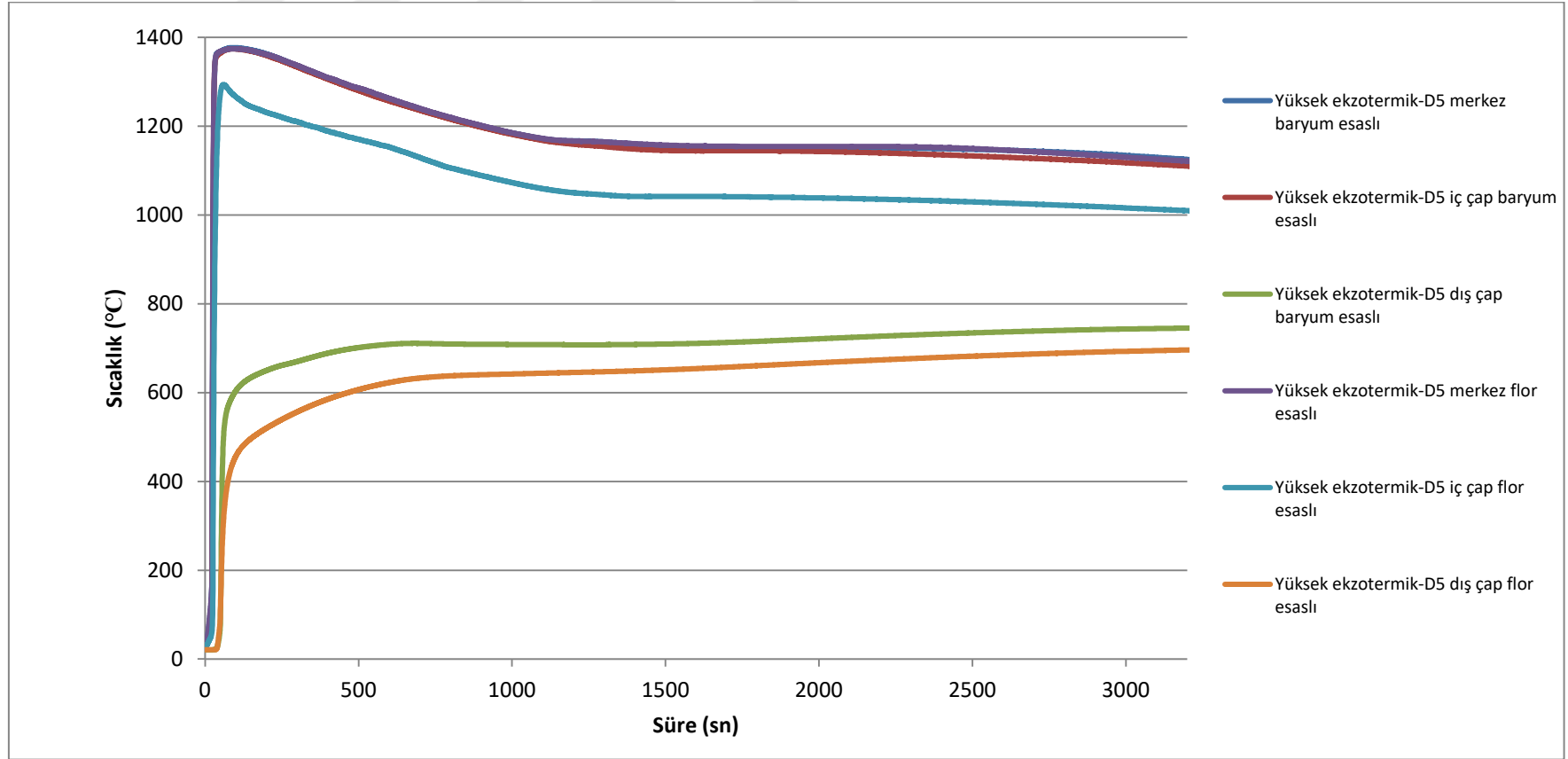
T	Sıcaklık (°C)
T _m	Ergime sıcaklığı (°C)
T _o	Başlangıç sıcaklığı (°C)
T _L	Liküdüs sıcaklığı (°C)
T _p	Döküm sıcaklığı (°C)
T _s	Solidüs sıcaklığı (°C)
G	Gibbs Serbes Enerjisi
G _s	Katı fazın Gibbs Serbes Enerjisi
G _L	Sıvı fazın Gibbs Serbes Enerjisi
H	Entalpi
H _s	Sıvı fazın entalpisi
H _L	Katı fazın entalpisi
S	Entropi
S _s	Sıvı fazın entropisi
S _L	Katı fazın entropisi
t	Süre (s)
t _s	Katılaşma süresi (s)
C	Bileşim (%)
C _o	Başlangıç bileşimi (%)
C _s	Katı bileşim (%)
C _L	Sıvı bileşimi (%)
k	Sabit
f	Hacimsen faz oranı
f _l	Hacimsel sıvı faz oranı
f _s	Hacimsel katı faz oranı
x	Arayüzeyden mesafe
D	Yayınım katsayısı
D _s	Sıvıdaki yayınım katsayısı
D _L	Katıdaki yayınım katsayısı
R	Sıvı-katı arayüzeyinin ilerleme hızı, katılaşma hızı ve gaz sabiti
G	Sıcaklık gradyanı
G _s	Sıvı içerisindeki sıcaklık gradyanı
G _k	Katı içerisindeki sıcaklık gradyanı
m	Eğim
m _L	Liküdüs eğimi (°C/s)
m _s	Solidüs eğimi (°C/s)
δ	Tabaka kalınlığı (mm)
ρ	Yoğunluk
Φ	Faz değeri
V	Hız vektörü

Γ	Genel yayılım katsayısı
S	Kaynak değeri
α, k	Isıl iletkenlik
ν	Kinematik viskozite
μ	Dinamik viskozite
c	Özgöl Isı
q	Isı akısı
J_A	Kütle akısı
τ_{xy}	Momentum akısı
h	Isı geçiş katsayısı
A	Yüzey alanı
Q	Isı
KGDD	Küresel grafitli dökme demir
OE	Orta ekzotermik besleyici gömlek
YE	Yüksek ekzotermik besleyici gömlek

EK 2:

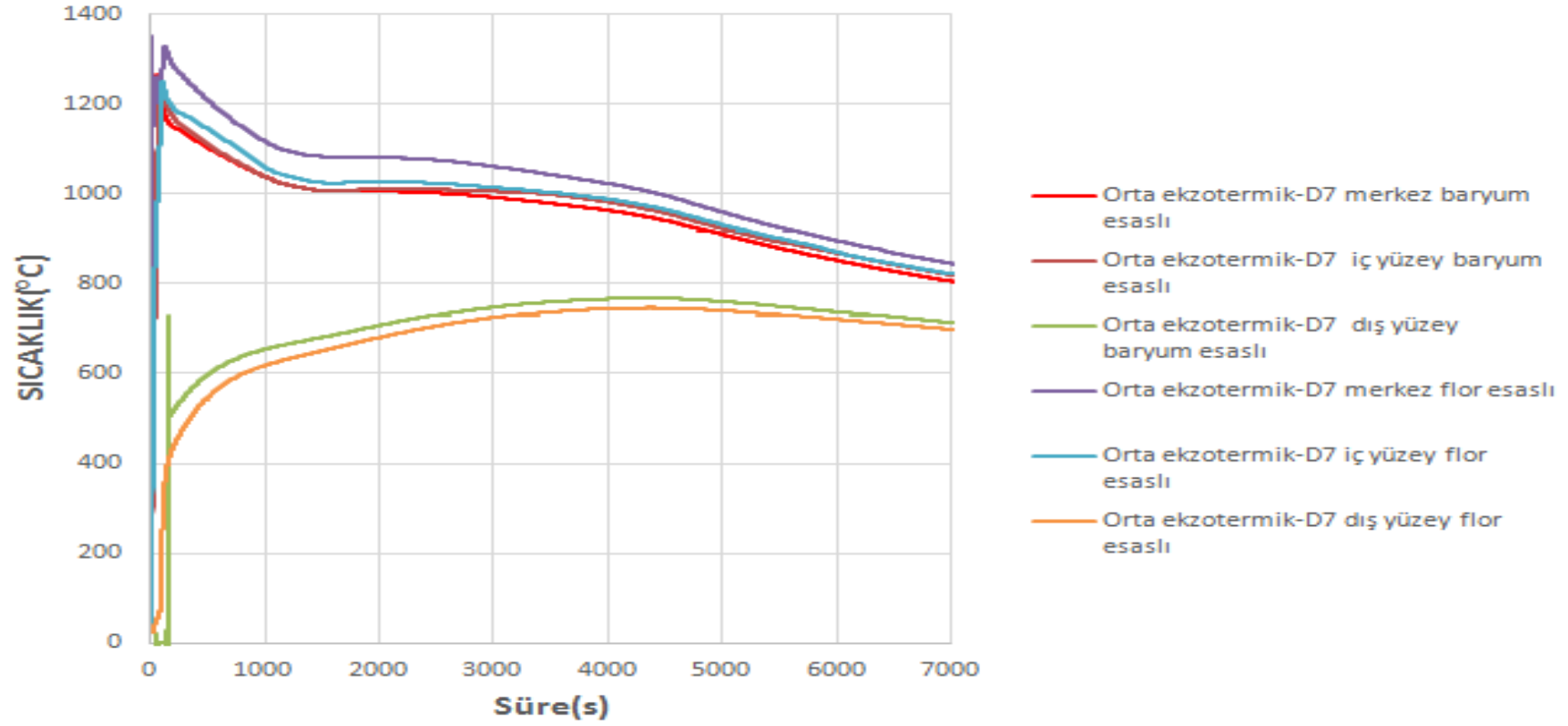


Şekil A.1 EN-GJS-500 alaşımında yüksek ekzotermik besleyici gömleklerin karşılaştırılması (D4 nolu döküm)

EK 3:

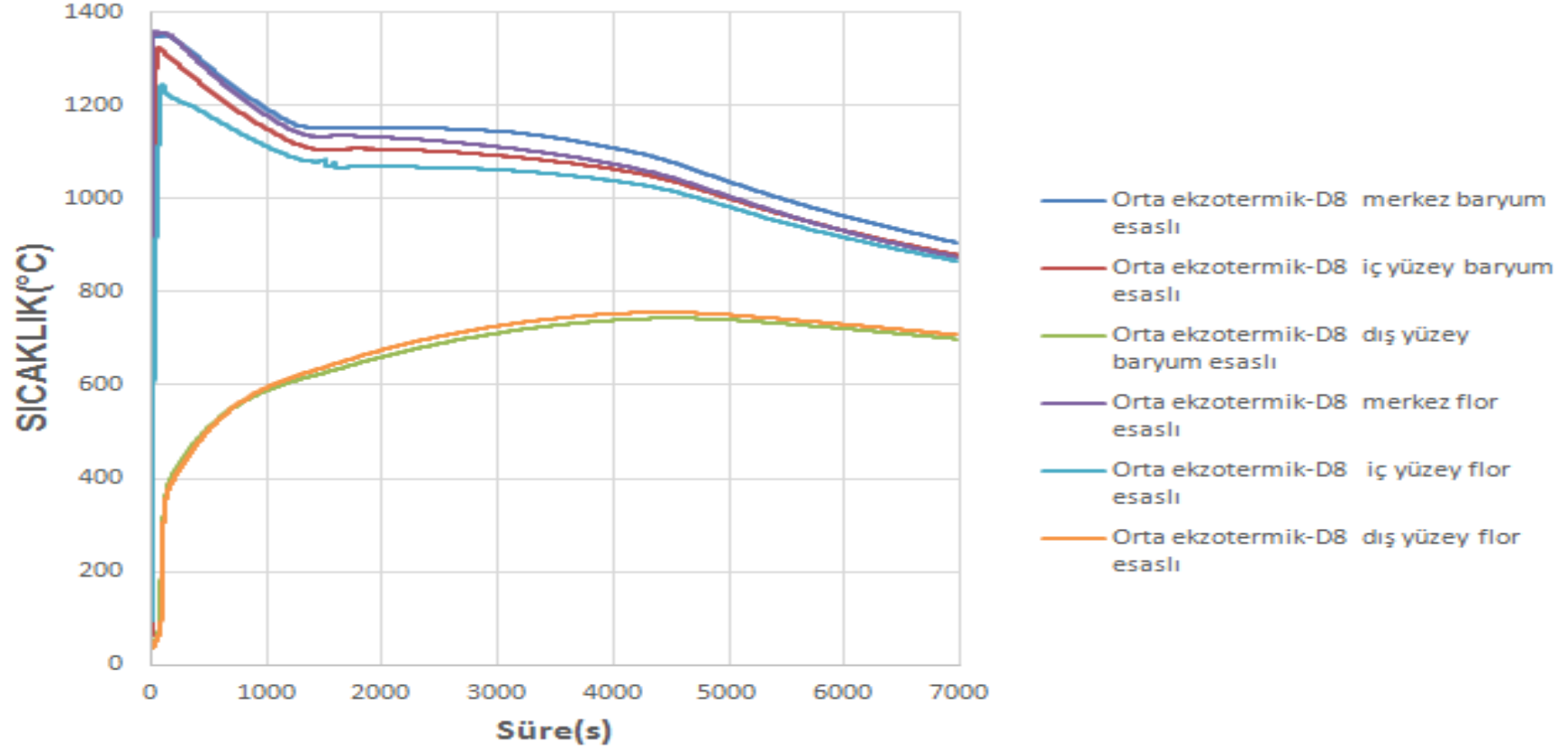
Şekil A.2 EN-GJS-500 yüksek ekzotermik besleyici gömleklerin karşılaştırılması (D5 nolu döküm)

EK 4:



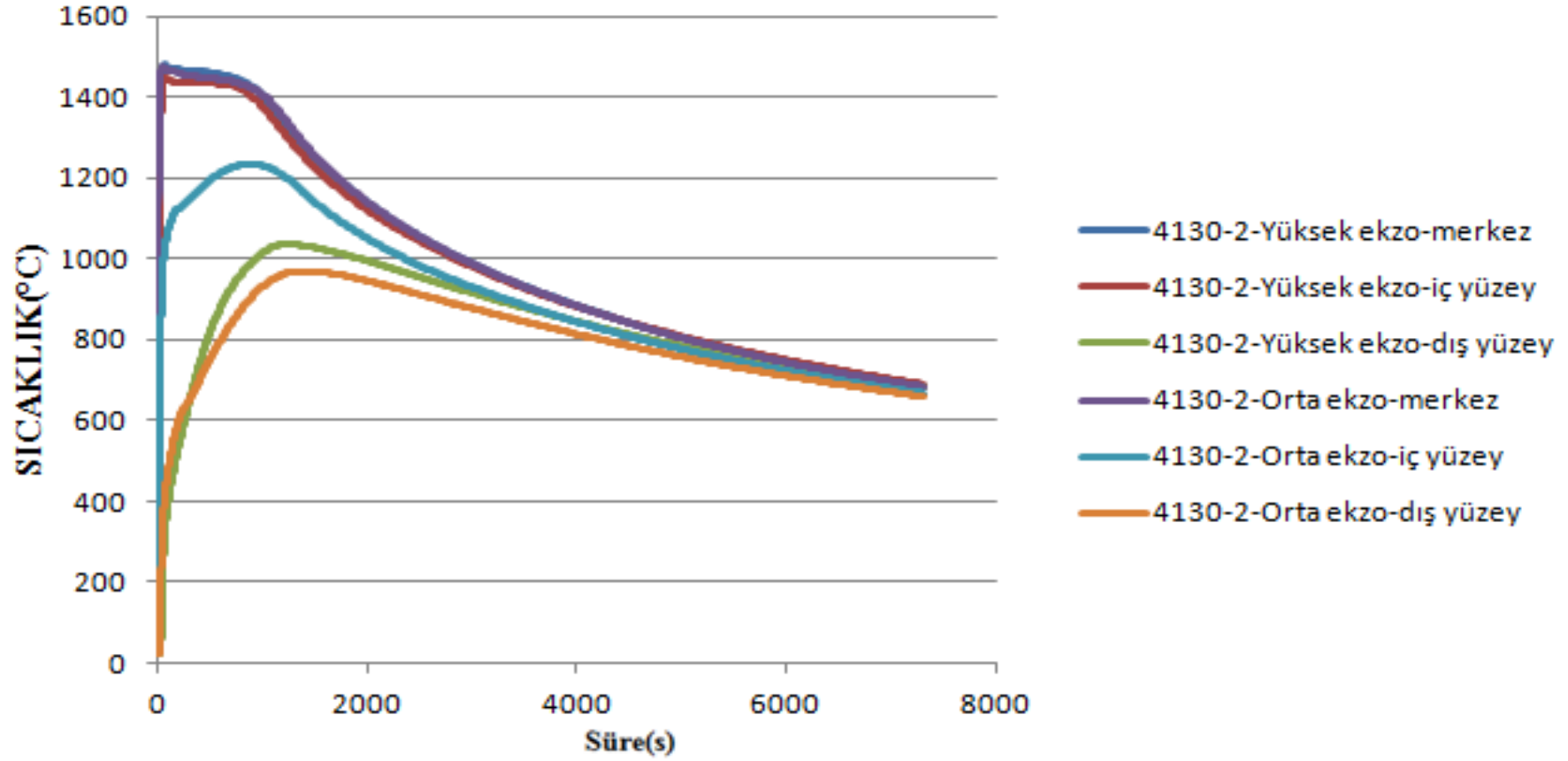
Şekil A.3 EN-GJS-500 yüksek ekzotermik besleyici gömleklerin karşılaştırılması (D7 nolu döküm

EK 5:



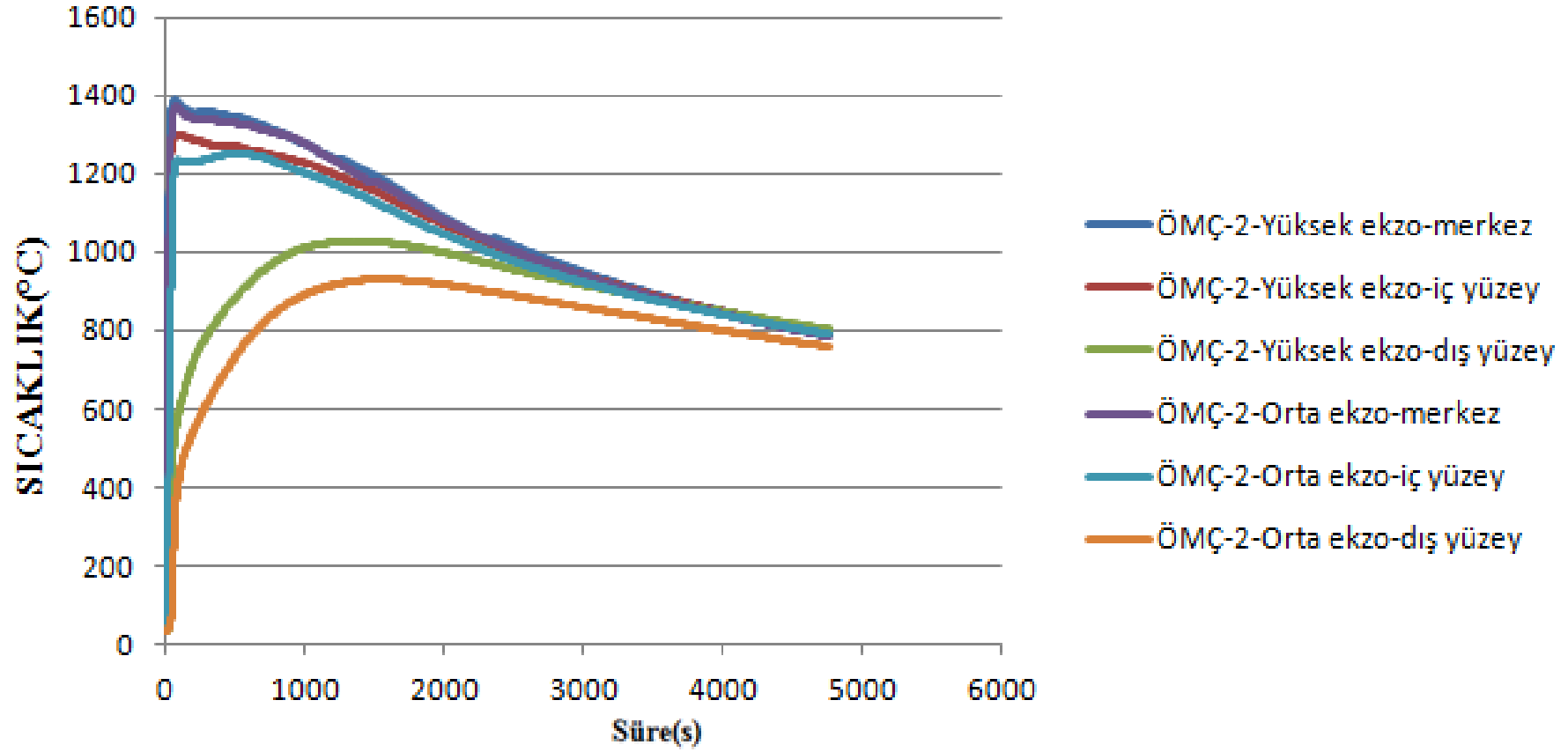
Şekil A.4 EN-GJS-500 yüksek ekzotermik besleyici gömleklerin karşılaştırılması (D8 nolu döküm)

EK 6:



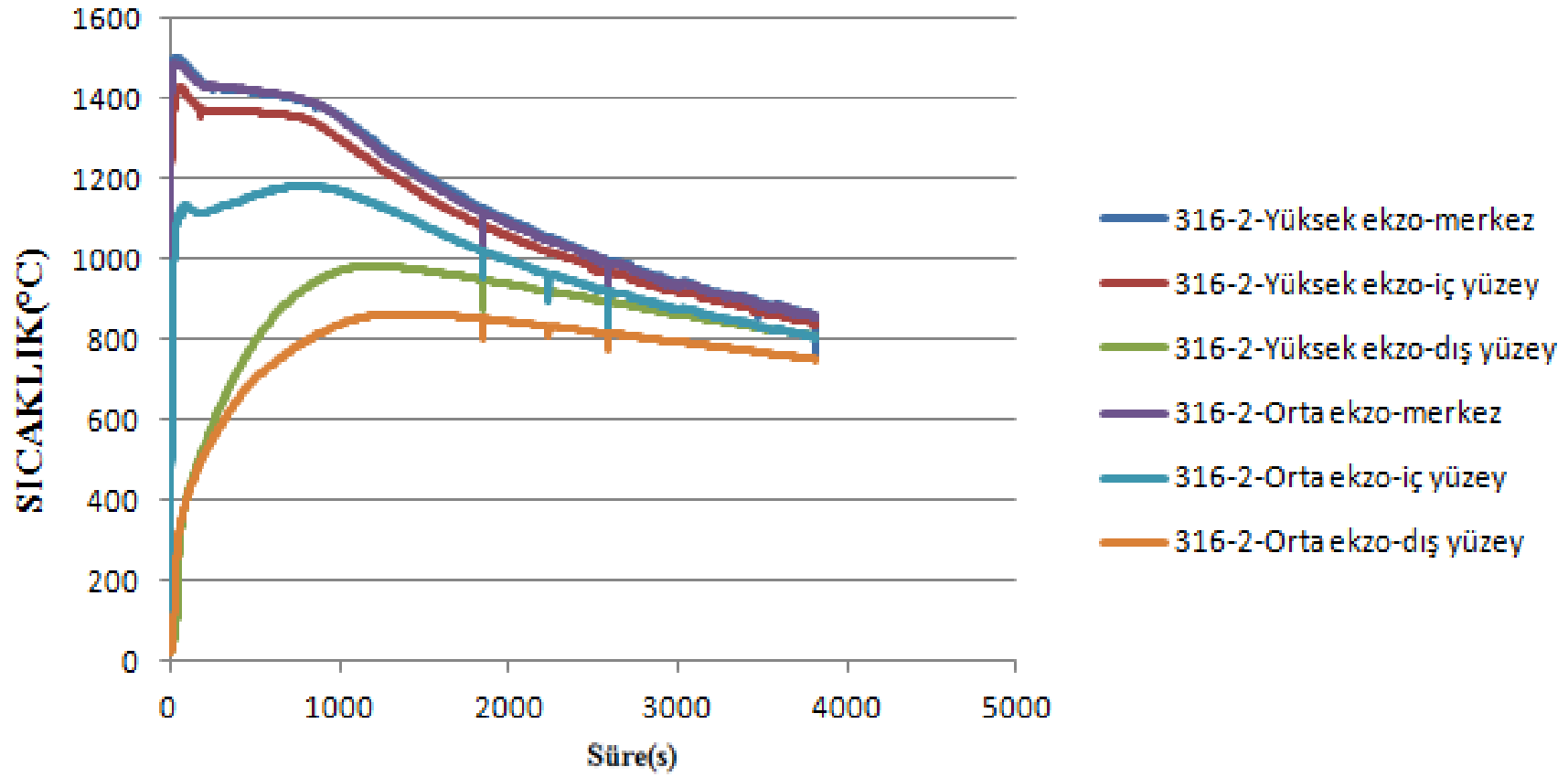
Şekil A.5 AISI 4130-2 döküm uygulamasında ölçülen sıcaklık değerlerinin süreye bağlı değişimi

EK 7:

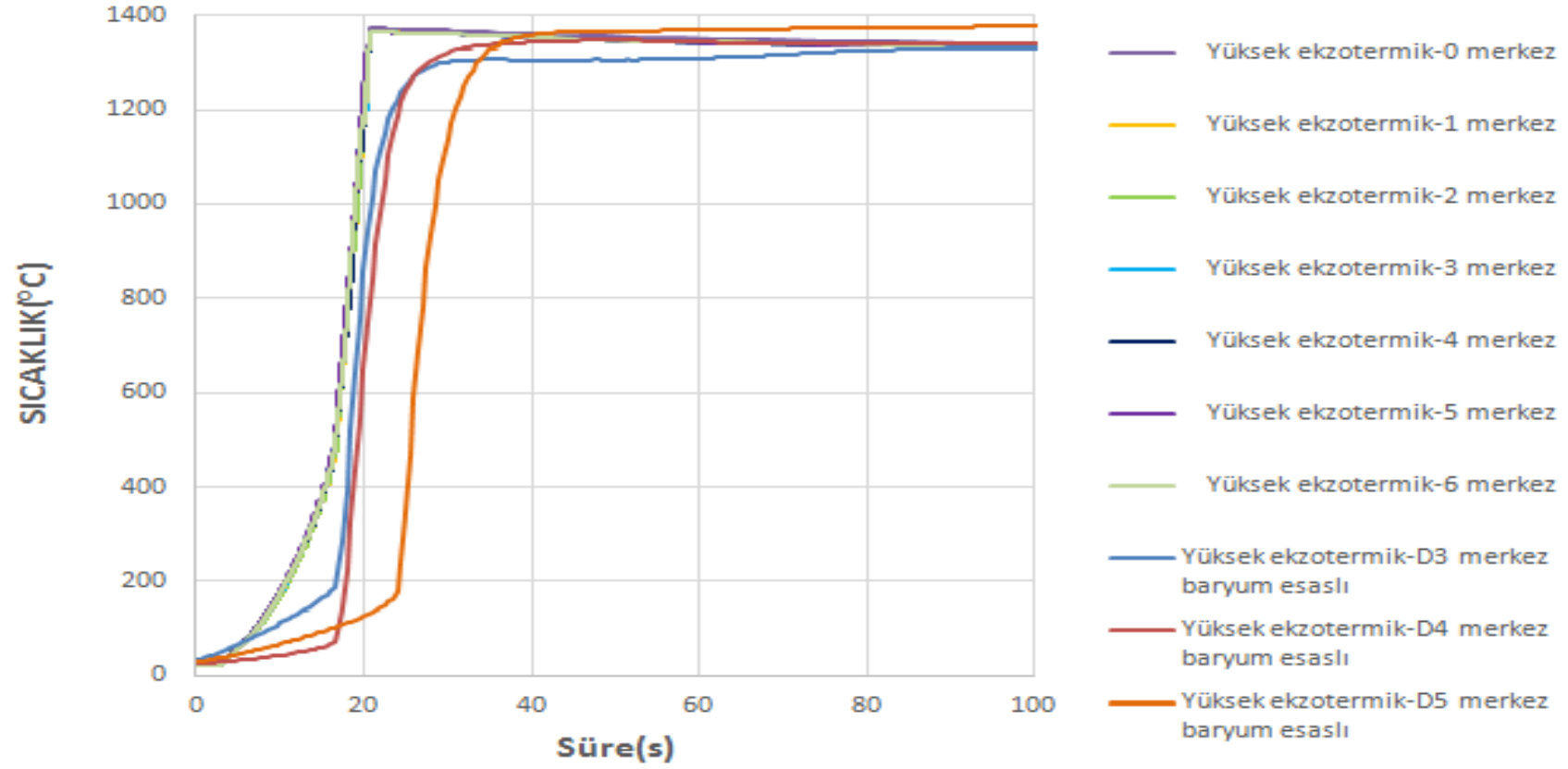


Şekil A.6 A128M-A93-2 döküm uygulamasına ölçülen sıcaklık değerlerinin süreye bağlı değişimi

EK 8:

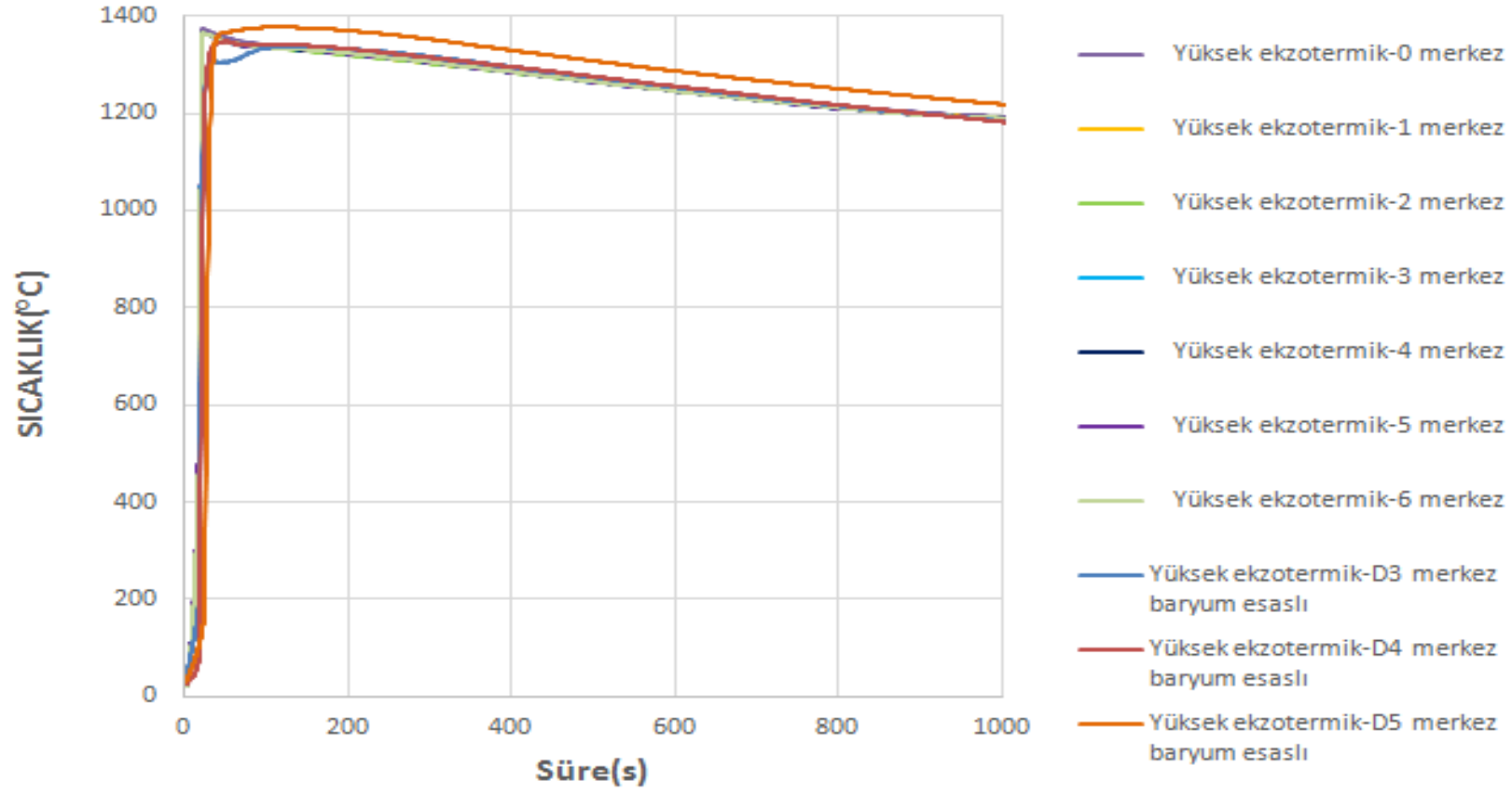


Şekil A.7 AISI 316-2 döküm uygulamasında ölçülen sıcaklık değerlerinin süreye bağlı değişimi

EK 9:

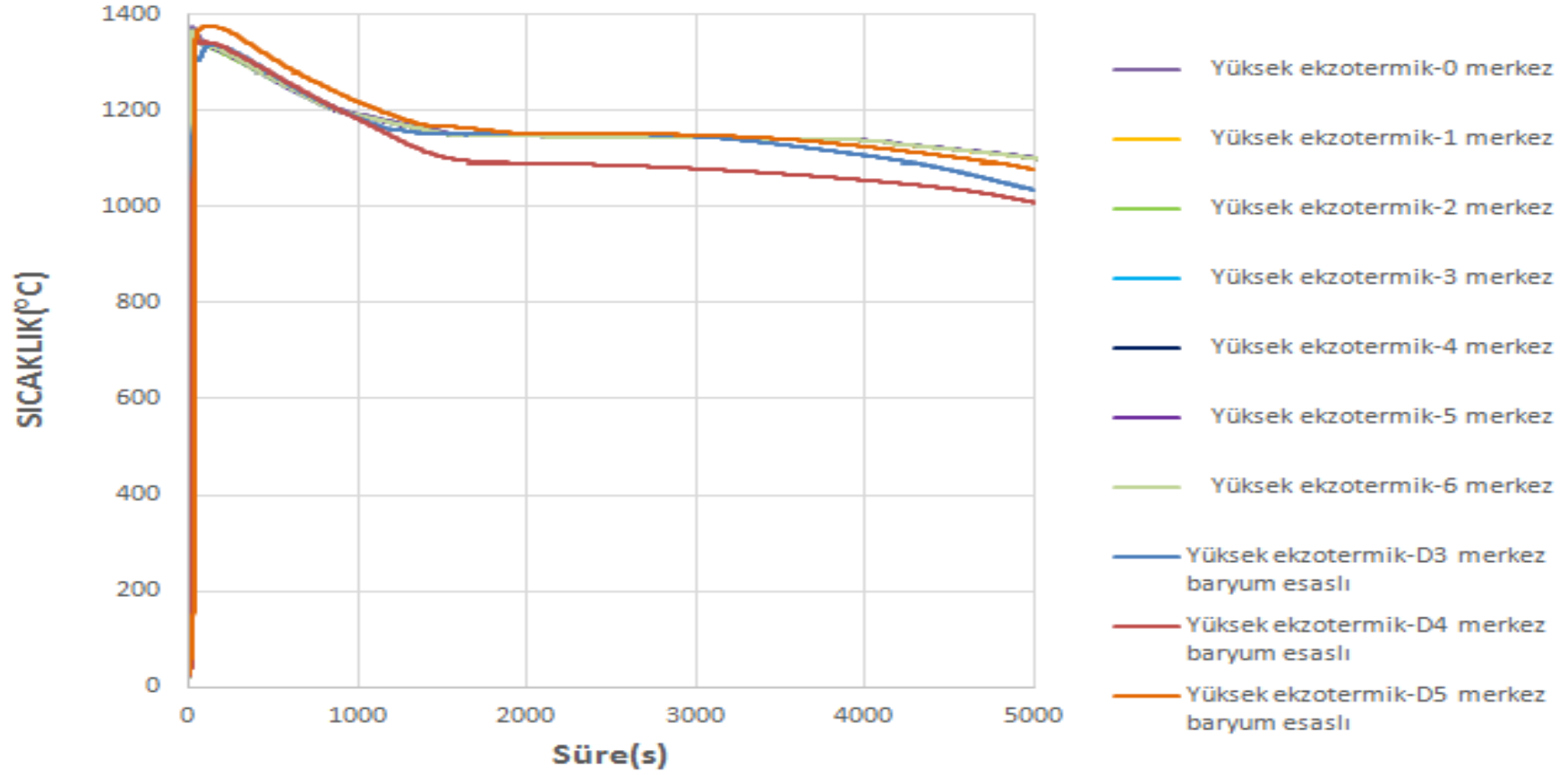
Şekil A.8 Küresel grafitli döküm alaşımlarında yüksek ekzotermik besleyici gömleklerin merkezden alınan sıcaklık ölçümlerinin karşılaştırılması (A Bölgesi)

EK 10:



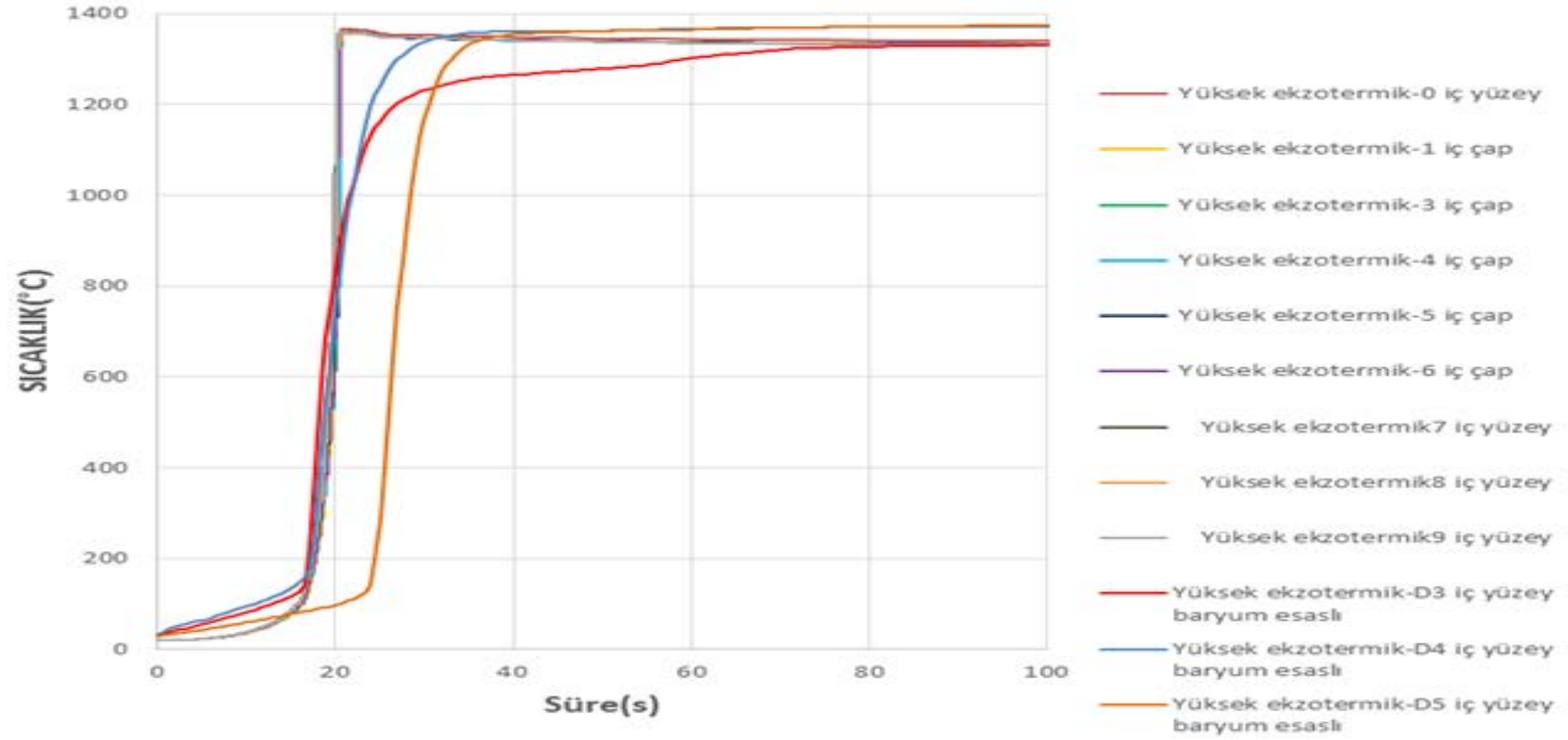
Şekil A.9 Küresel grafitli döküm alaşımlarında yüksek ekzotermik besleyici gömleklerin merkezden alınan sıcaklık ölçümlerinin karşılaştırılması (B Bölgesi)

EK 11:



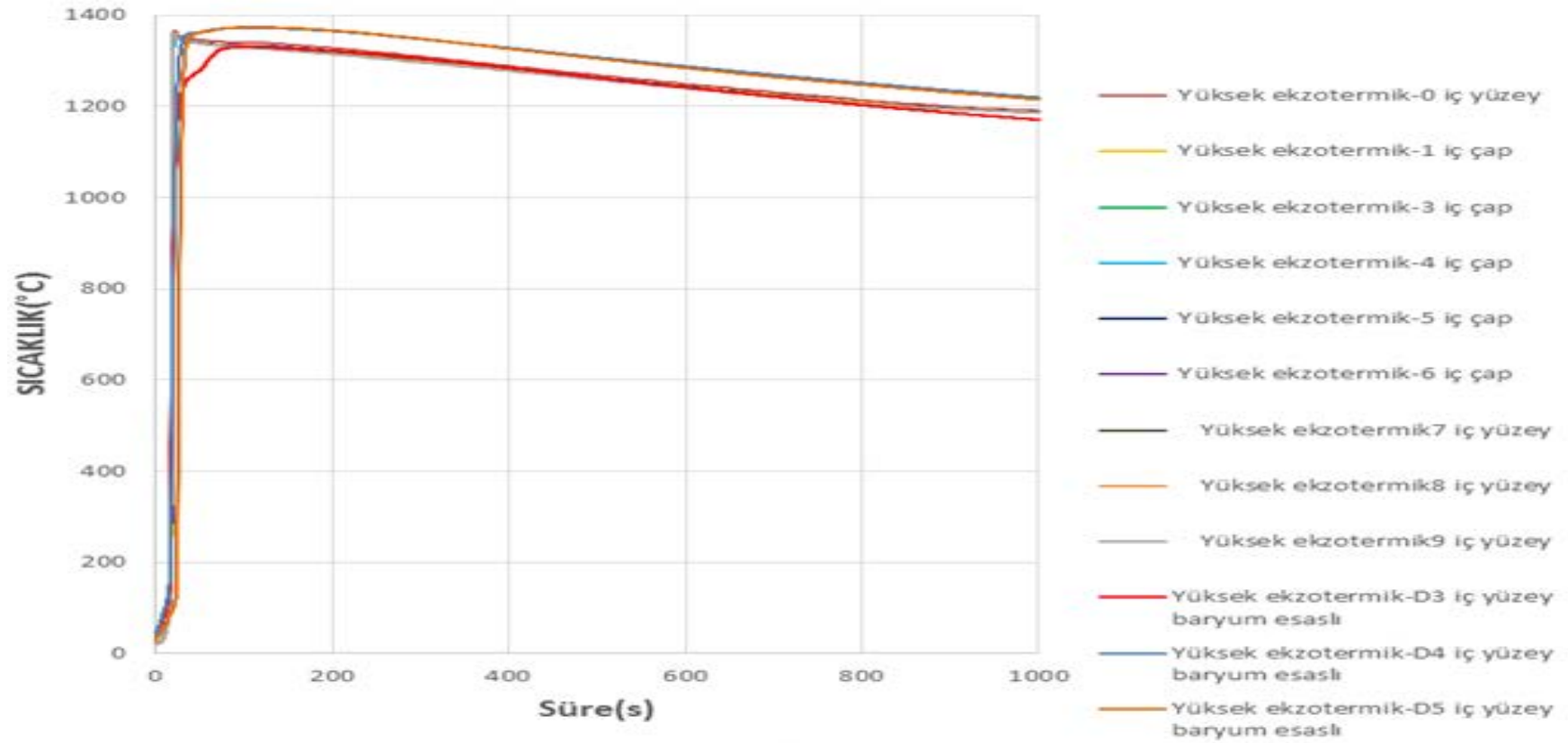
Şekil A.10 Küresel grafitli döküm alaşımlarında yüksek ekzotermik besleyici gömleklerin merkezden alınan sıcaklık ölçümlerinin karşılaştırılması (C Bölgesi)

EK 12:



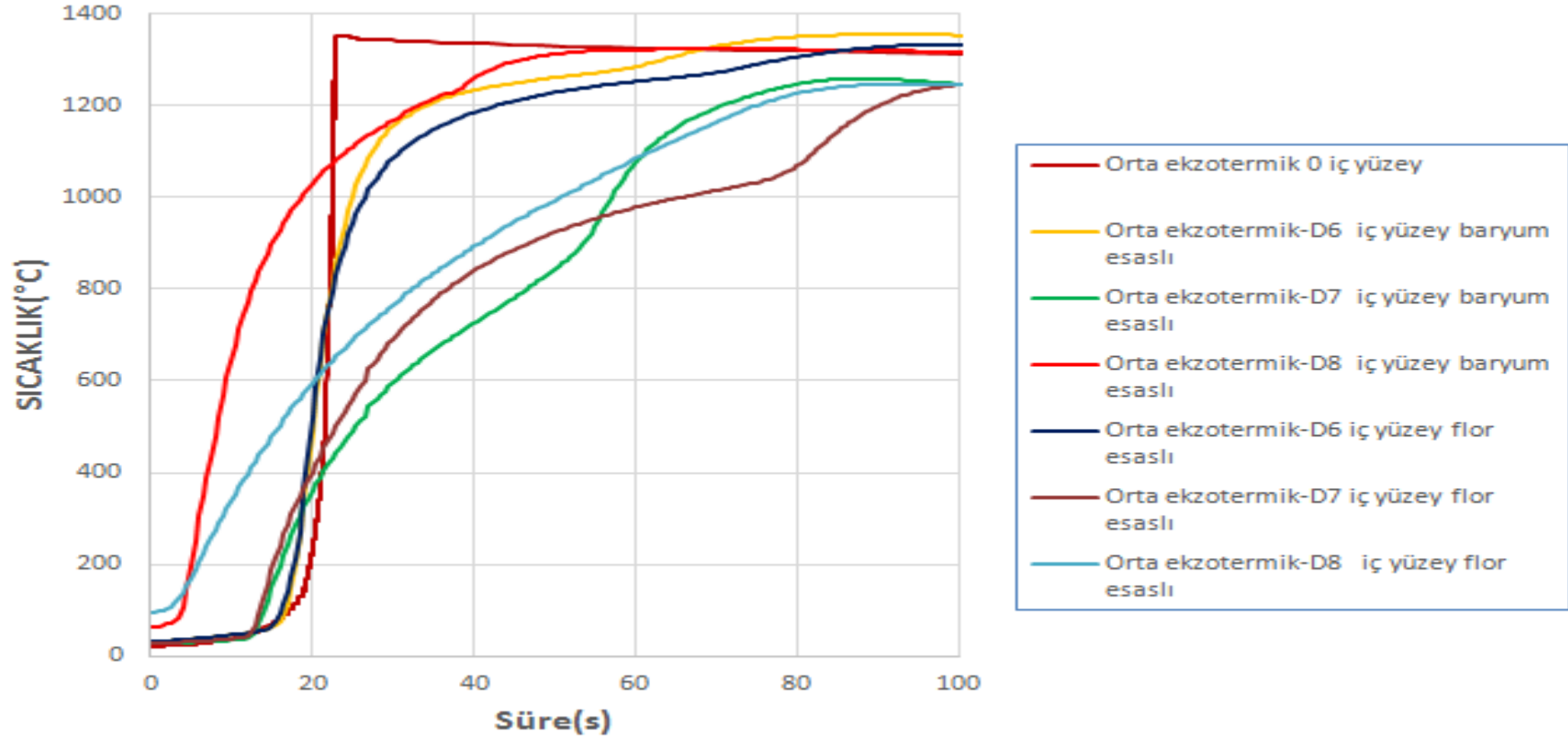
Şekil A.11 Küresel grafitli döküm alaşımlarında yüksek ekzotermik besleyici gömleklerin iç yüzeyden alınan sıcaklık ölçümlerinin karşılaştırılması (A Bölgesi)

EK 13:



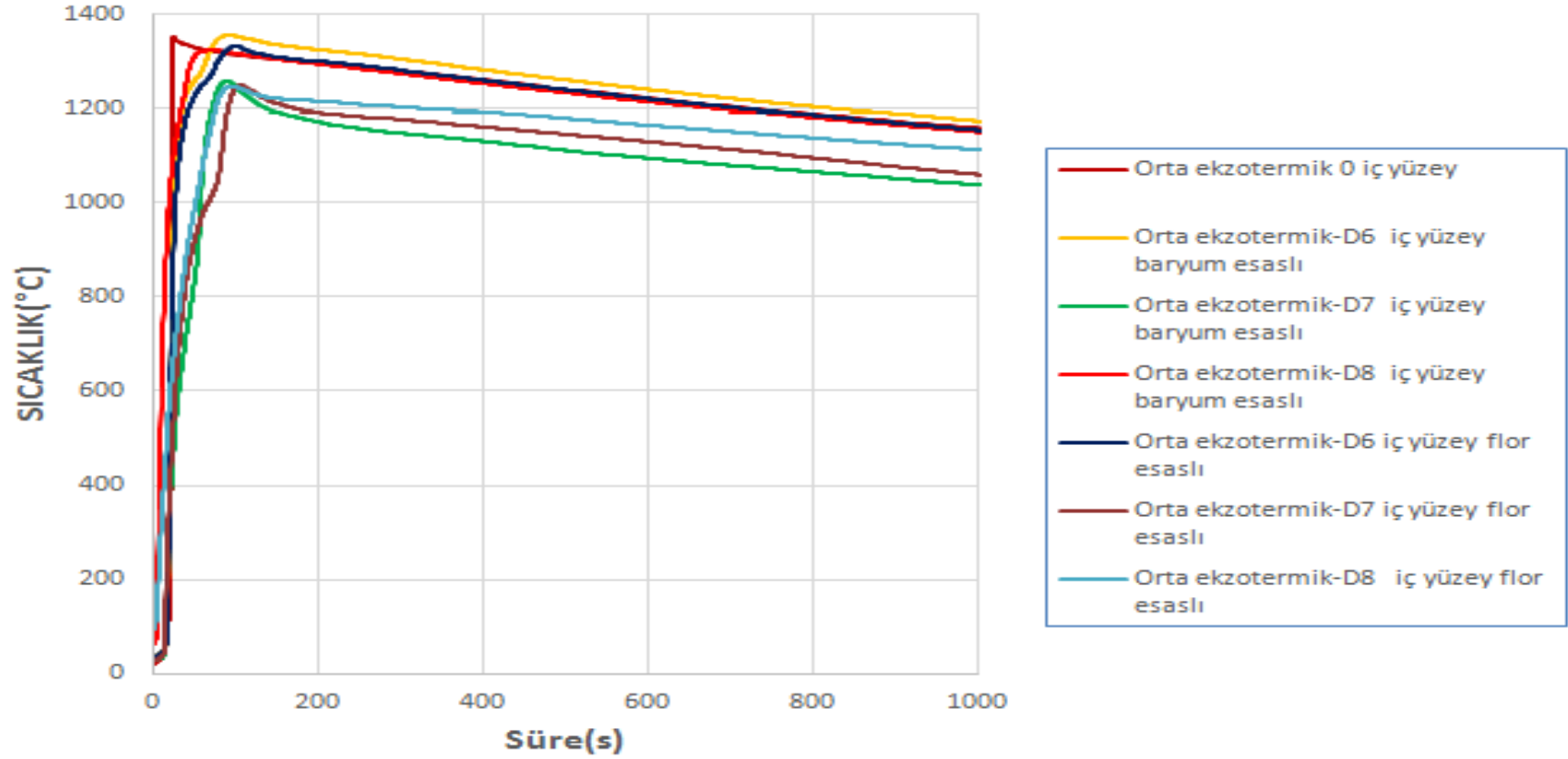
Şekil A.12 Küresel grafitli döküm alaşımlarında yüksek ekzotermik besleyici gömleklerin iç yüzeyden alınan sıcaklık ölçümlerinin karşılaştırılması (B Bölgesi)

EK 14:



Şekil A.13 Küresel grafitli döküm alaşımlarında orta ekzotermik besleyici gömleklerin iç yüzeyden alınan sıcaklık ölçümlerinin karşılaştırılması (100 s)

EK 15:



Şekil A.14 Küresel grafitli döküm alaşımlarında orta ekzotermik besleyici gömleklerin iç yüzeyden alınan sıcaklık ölçümlerinin karşılaştırılması (1000 s)