



**ORTAK HAREKET YÜZEYLİ PARÇANIN TOZ ENJEKSİYON
KALIPLAMA İLE ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Oğuz YILMAZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2019

Oğuz YILMAZ tarafından hazırlanan “ORTAK HAREKET YÜZEYLİ PARÇANIN TOZ ENJEKSİYON KALIPLAMA İLE ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Çetin KARATAŞ

İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Abdulkadir EKŞİ

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Çukurova Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Fırat KAFKAS

İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 24/05/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Oğuz YILMAZ

24.05.2019

ORTAK HAREKET YÜZEYLİ PARÇANIN TOZ ENJEKSİYON KALIPLAMA İLE ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Oğuz YILMAZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2019

ÖZET

Toz enjeksiyon kalıplama (TEK) yöntemi, metal ve seramik tozların bağlayıcıyla karıştırılıp toz enjeksiyon makinesi ile kalıp içerisine enjekte edilmesidir. Bir TEK yöntemi olan insörtlü toz enjeksiyon kalıplama (İTEK) yönteminde ise, enjeksiyon esnasında kalıp boşluğu içine hazır çekirdek (insört) konulmasına ve parçanın tümünün değil sadece insört çevresine besleme stoğunun enjekte edilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu çalışmada, İTEK yöntemi ile hareketli arayüzeye sahip, küresel şekilli ve montajlı parça üretimi araştırılmıştır. Parçanın iç kısmı Ck45 çeliğinden (insört) dış bölgesi WC-%9Co besleme stoğundan olacak şekilde tasarlanmıştır. Arayüzey oluşturması için Ck45 çeliği üzerine sıvı plastik, krom, akrilik esaslı boya, poliolefin daralan makaron, epoksi reçine, etil selüloz çözeltisi, nişasta çözeltisi, parafin-alümina tozu, poliamid, polietilen glikol çözeltisi, poliüretan, polivinil alkol çözeltisi, polivinil klorür, polimetilsiloksan-silica-asetoksilan ve teflon bant malzemeleri kaplanmıştır. Kapanmış Ck45 çeliği kalıp içerisine yerleştirilerek üzerine WC-%9Co besleme stoğu enjekte edilmiştir. Enjeksiyon sürecinden sonra numunelere kimyasal bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri uygulanmıştır. Üretilen hareketli mekanizmalı bileşenleri arasında ihtiyaç duyulan boşluk krom ve sıvı plastik arayüzey ile elde edilmiştir. Sinterleme aşamasında krom arayüzeyin difüzyonu engellemesi, sıvı plastik arayüzeyin ise buharlaşarak giderilmesi sonucunda bileşenler arası istenilen boşluk elde edilmiş ve montajlı parçanın hareketi sağlanmıştır.

Bilim Kodu : 91437
Anahtar Kelimeler : Toz Enjeksiyon Kalıplama, Montajlı Parça, Mikro-boşluk, Hareketli Ara yüzey, Sinterleme
Sayfa Adedi : 92
Danışman : Doç. Dr. Çetin KARATAŞ

THE INVESTIGATION OF PRODUCIBILITY OF JOINT MOVABLE INTERFACE
PART BY POWDER INJECTION MOLDING METHOD

(M. Sc. Thesis)

Oğuz YILMAZ

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2019

ABSTRACT

Powder injection molding (PIM) method is to mix metal and ceramic powders with binder and inject into the mold with powder injection molding machine. Inserted powder injection molding (IPIM) which is a PIM method, include using the principle of injecting the feedstock on a preformed insert located inside the mold. In this study, assembled parts with spherical shaped and movable interface were investigated of production by IPIM. The interior and outer part was made of Ck45 steel (insert) and WC-9%Co feedstock, respectively. To create the interface, Ck45 steel is coated with chrome, liquid plastic, acrylic based paint, polyolefin heat shrinkable tubing, epoxy resin, ethyl cellulose solution, starch solution, paraffin-alumina powder, polyamide, polyethylene glycol solution, polyurethane, polyvinyl alcohol solution, polyvinyl chloride, polymethylsiloxane-silica-acetoxylene and teflon tape. The coated Ck45 steel was placed into mold and then WC-9%Co feedstock is injected upon the insert. The chemical debinding and sintering processes were applied to specimens after injection. The desired cavity between components of produced moving mechanisms was obtained with chrome and liquid plastic interface. The chrome interface obstacles diffusion of components, liquid plastic interface removes by evaporation at sintering stage. Thus, the cavity is obtained and the movement of mechanism is provided.

Science Code : 91437

Key Words : Powder Injection Molding, Assembled Part Micro-cavity, Movable Interface, Sintering

Page Number : 92

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Çetin KARATAŞ

TEŞEKKÜR

Engin bilgi birikimi ve değerli katkıları ile beni yönlendiren ve destekleyen sevgili Danışmanım Sayın Doç. Dr. Çetin KARATAŞ'a, a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Tezin tüm aşamalarında emeği geçen Sayın Dr. Mehmet Subaşı, Kamran Samet ve Harun Koçak'a ve kalıp analizlerinin SİGMASOFT yazılımı ile gerçekleşmesini sağlayan Cihan Türkay'a teşekkür ederim.

Ayrıca tezin ortaya çıkmasında, 115M437 kodlu "İnsörtlü Toz Enjeksiyon Kalıplama (İTEK) Yöntemi ile Yüksek Toklukta Sementit Karbür Frezeleme Takımlarının Geliştirilmesi" konulu proje ile desteklediği için TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Yüksek Lisans çalışma süresince maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
2.1. Toz Enjeksiyon Kalıplama (TEK) Yöntemi	3
2.2. İnsörtlü Toz Enjeksiyon Kalıplama (İTEK) Yöntemi.....	6
2.3. Küresel Şekilli Montajlı Parçalar (Mafsallar)	7
3. TUNGSTEN VE TUNGSTEN KARBÜR	11
4. TOZ ENJEKSİYON KALIPLAMA	13
4.1. Tozlar	16
4.1.1. Tozun şekli	17
4.1.2. Toz boyutu ve dağılımı	19
4.2. TEK’te Kullanılan Bağlayıcılar ve Özellikleri	20
4.3. Karıştırma ve Granülleme	23
4.4. Kalıplama	24
4.5. Bağlayıcı Giderme	26
4.6. Sinterleme	27

5. MALZEME VE YÖNTEM	28
5.1. Malzeme Özellikleri.....	29
5.1.1. Besleme stoğunun özellikleri	29
5.1.2. İnsört malzemesinin özellikleri	30
5.1.3. Arayüzey malzemelerinin özellikleri	31
5.2. Yöntem ve Deney Tasarımı	38
5.3. Enjeksiyon Kalıplama İşlemi	42
5.4. Bağlayıcı Giderme İşlemi	48
5.5. Sinterleme İşlemi	50
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	51
6.1. Bağlayıcı Giderme İşlemi Parametrelerinin Parçaya Etkisi.....	51
6.1.1. Bağlayıcı giderme işleminde kullanılan kimyasalın parçaya etkisi	51
6.1.2. Bağlayıcı giderme işleminde bekleme süresinin parçaya etkisi.....	52
6.1. Optimum İnsört Çapı/Enjeksiyon Bölgesi Çapının (D_i/D_e) Tayini.....	53
6.2.1 Dilatometre analizi ile besleme stoğunun termal özelliklerinin tespiti.....	53
6.2.2. WC-%9Co besleme stoğunun ham mukavemetinin hesaplanması.....	56
6.2.3. Matematiksel hesaplamalar ile optimum insört çapı/enjeksiyon bölgesi çapının (D_i/D_e) tayini	57
6.2.4. Sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel çalışmalar ile optimum insört çapı/enjeksiyon bölgesi çapının (D_i/D_e) tayini	61
6.3. İTEK Yöntemi Sonucunda Hareketli Ve Montajlı Parçanın Meydana Gelmesi .	66
6.4. Montajlı Parça Üretiminde Sinterleme Sıcaklığının ve Arayüzey Kalınlığının Bileşenler Arası Boşluğa Etkisi	71
6.4.1 Krom arayüzeye sahip parçalarda	71
6.4.1. Sıvı plastik arayüzeye sahip parçalarda	73

Sayfa

6.5. Hareketli ve Montajlı Parçada Bileşenler Arası Oluşan Boşluğun Matematiksel Hesaplamalar ve Sonlu Elemanlar Analizi ile İfade Edilmesi	76
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	79
7.1. Sonuçlar.....	79
7.2. Öneriler	80
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ.....	91



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. TEK uygulama alanları.....	16
Çizelge 4.2. TEK yönteminin avantajları ve dezavantajları	16
Çizelge 4.3. Tozların özellikleri ve TEK'e etkileri.....	20
Çizelge 4.4. TEK'te örnek bağlayıcı sistemleri	21
Çizelge 4.5. TEK yönteminde ideal bağlayıcı özellikleri	22
Çizelge 5.1. WC-%9Co besleme stoğunun fiziksel özellikleri.....	29
Çizelge 5.2. WC tozun karakteristiği.....	30
Çizelge 5.3. WC tozun kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri	30
Çizelge 5.4. Ck45 çeliğinden imal edilen insörtün özellikleri.....	31
Çizelge 5.5. Sıvı plastik kaplamasının fiziksel ve mekanik özellikleri	37
Çizelge 5.6. Kromun difüzyon karakteristiği.....	38
Çizelge 5.7. Protherm PLF 110/30 ısıtma işlem fırını özellikleri.....	38
Çizelge 5.8. Deney tasarımı	41
Çizelge 5.9. TEK Parametreleri	46
Çizelge 5.10. Arburg Allrounder 220S enjeksiyon makinesinin teknik özellikleri.....	47
Çizelge 6.1. Kimyasal bağlayıcı giderme işleminde kullanılan kimyasallar ve elde edilen sonuçlar	51
Çizelge 6.2. Bekleme süresinin bağlayıcı giderme oranı üzerine etkisi	52
Çizelge 6.5. Farklı D_i/D_e oranlarına sahip numuneler için enjeksiyon bölgesinde meydana gelen gerilmeler.....	61
Çizelge 6.6. Arayüzey türleri ve sonuçları.....	67
Çizelge 6.5. Krom arayüzeye sahip parçalarda sinterleme sıcaklığı ve arayüzey kalınlığının boşluk miktarına etkisi	72
Çizelge 6.6. Sıvı plastik arayüzeye sahip parçalarda sinterleme sıcaklığı ve arayüzey kalınlığının boşluk miktarına etkisi.....	74

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.9. Farklı sıcaklıklardaki hacimsel çekme farkının hesaplanması	77



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Otomobillerde kullanılan küresel mafsallık bağlantıları.....	8
Şekil 2.2. Sanal bir kalça üzerinde uygulanan bir test konfigürasyonunun gösterimi	9
Şekil 2.3. Parmak protezi için kullanılacak olan küresel bağlantı	10
Şekil 3.1. Tungsten karbür kesici takımlar	12
Şekil 4.1. TEK'in Venn şeması ile gösterimi	13
Şekil 4.2. TEK işlem basamakları	14
Şekil 4.3. TEK'in imalat yöntemleri ile adet-karmaşıklık derecesi karşılaştırılması	15
Şekil 4.4. TEK yöntemi ile imal edilmiş parçalar.....	15
Şekil 4.5. Parçacık şekilleri ve tanımlamaları.....	17
Şekil 4.6. Farklı karmaşık geometrilerdeki toz örnekleri a) Küre, b) Pul, c) Yuvarlak düzensiz, d) Düzensiz.....	18
Şekil 4.7. TEK için İdeal toz şekli	18
Şekil 4.8. Toz boyut dağılımının belirlenmesinin şematik olarak anlatımı	19
Şekil 4.9. TEK için üretilmiş örnek bir toz için toz boyut analizi	20
Şekil 4.10. Farklı toz ve bağlayıcı karışımları a) Fazla bağlayıcı oranı, b) Optimum bağlayıcı oranı, c) Az bağlayıcı oranı	23
Şekil 4.11. Bir enjeksiyon kalıplama makinesinin kesiti	24
Şekil 4.12. TEK işlemi.....	25
Şekil 4.13. Sinterleme aşamalarının şematik gösterimi	28
Şekil 5.1. Hareketli yüzeye sahip ve montajlı parçanın üretim yöntemi	42
Şekil 5.2. Kalıp, yolluk, enjekte bölge ve insörtlere programda tanımlanması.....	43
Şekil 5.3. Kalıp dolumu ve enjeksiyon işleminde sıcaklık dağılımı.....	43
Şekil 5.4. Enjeksiyon işleminde insört bölgesinin sıcaklık dağılımı	44
Şekil 5.5. Kalıp dolumu için gerekli olan basınç değerleri.....	44

Şekil	Sayfa
Şekil 5.6. Kalıp içerisinde sıkışan hava	44
Şekil 5.7. Enjeksiyon işleminde oluşan kaynak hatları.....	45
Şekil 5.8. WC-%9Co besleme stoğunun TG analizi.....	49
Şekil 5.9. Termal bağlayıcı giderme işleminin grafiksel gösterimi	49
Şekil 5.10. WC-%9Co besleme stoğunun 1200 °C sinterleme için sıcaklık-zaman döngüsü	50
Şekil 6.1. Bekleme süresinin bağlayıcı giderme oranı üzerine etkisi	52
Şekil 6.2. Dilatometre cihazına girilen sıcaklık-zaman döngüsü.....	54
Şekil 6.3. WC-%9Co besleme stoğundan üretilen numunelerin dilatometre analizinde ölçülen sıcaklığa göre boyut değişimi	55
Şekil 6.4. Yaklaşımlar sonucu bulunan gerilim–gerinim eğrisi.....	57
Şekil 6.5. Tasarlanan numune ve birleşme bölgesinin gösterimi.....	57
Şekil 6.6. Tasarlanan geometrinin modellenmesi	58
Şekil 6.7. Sıcaklıkla birlikte temas bölgesinde meydana gelen iç kuvvetler	59
Şekil 6.7. ANSYS programında modellenen numunenin mesh yapısı	62
Şekil 6.8. $D_i/D_e = 0,8$ olan numunenin ANSYS analizi sonucu oluşan gerilmeler ve sinterleme deneyi sonucu	62
Şekil 6.9. $D_i/D_e = 0,7$ olan numunenin ANSYS analizi sonucu oluşan gerilmeleri ve sinterleme deneyi sonucu	63
Şekil 6.10. $D_i/D_e = 0,6$ olan numunenin ANSYS analizi sonucu oluşan gerilmeleri ve sinterleme deneyi sonucu	63
Şekil 6.11. $D_i/D_e = 0,5$ olan numunenin sinterleme deneyi sonuçları ve ANSYS analizi sonucu oluşan gerilmeler	64
Şekil 6.12. $D_i/D_m = 0,45$ olan numunenin ANSYS analizi sonucu oluşan gerilmeleri ve sinterleme deneyi sonucu.....	65
Şekil 6.13. $D_i/D_m = 0,4$ olan numunenin ANSYS analizi sonucu oluşan gerilmeleri ve sinterleme deneyi sonucu.....	65
Şekil 6.14. Matematiksel model ve ANSYS analizi sonuçlarının malzeme dayanımı ile karşılaştırılması	66

Şekil	Sayfa
Şekil 6.15. Küresel mafsalın hareket eksenleri	69
Şekil 6.16. Malzemelerin hacimsel davranışı sonucu oluşan boşluğun şematik anlatımı.....	70
Şekil 6.17. Arayüzey kalınlığının boşluk miktarına etkisi.....	75
Şekil 6.18. Sinterleme sıcaklığının boşluk oluşumuna etkisinin sonlu elemanlar analizi	78



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1 WC-%9Co besleme stoğu granülü.....	29
Resim 5.2. a) Küresel başlıklı insört, b) Ön deneyler için hazırlanmış insört	31
Resim 5.3. Sıvı plastik malzemenin kaybolma sıcaklığı tayini	39
Resim 5.4. a) Sıvı plastik arayüzeye sahip küresel başlıklı insört, b) Sıvı plastik arayüzeye sahip ön deneyler için çapakları temizlenmiş insört.....	39
Resim 5.5. Kaplama kalınlığı ölçüm cihazı	40
Resim 5.6. Numunelerin üretildiği toz enjeksiyon kalıbı	42
Resim 5.7. ARBURG Allrounder 220S toz enjeksiyon kalıplama makinası.....	45
Resim 5.8. Arburg 220S enjeksiyon makinesi grafik ekran	46
Resim 5.9. WC-%9Co besleme stoğu enjeksiyonu yapılmış insörtlü numune.....	47
Resim 5.10. Kimyasal bağlayıcı giderme işlemine tabi tutulan numuneler.....	48
Resim 6.1. a) Test numunelerinin bağlayıcı giderme işlemi öncesi SEM görüntüsü, b) Test numunelerinin bağlayıcı giderme işlemi sonrası SEM görüntüsü...	53
Resim 6.2. Dilatometre analizi için hazırlanan numuneler.....	54
Resim 6. 3. a) 1340, b) 1300, c)1250, d)1200, e) 600, f) 300, g) 250 °C'ye çıkılmış numuneler.....	55
Resim 6.4. Olumlu ve olumsuz sonuç veren arayüzeyler; a) Boya, b) Poliolefin daralan makaron, c) Epoksi reçine, d) Etil selüloz çözeltisi, e) Nişasta çözeltisi, f) Parafin+Alümina tozu, g) Poliamid, h) Polietilen glikol çözeltisi, ı) Poliüretan, j) Polivinil alkol çözeltisi, k) Polivinil klorür, l) Polimetilsiloksan+silica+ asetoksilan, m) Teflon bant n) Krom o) Sıvı plastik.....	68
Resim 6.5. Hareketli mafsalları	68
Resim 6.6. 1300 °C'de sinterlenmiş parçada boşluğun optik mikroskoptaki görüntüsü.....	70
Resim 6.7. Enjeksiyon sonrası parçanın kesit görüntüsü.....	71
Resim 6.8. 1400 °C sıcaklıkta sinterlenmiş krom arayüzeye sahip numune numune	72
Resim 6.9. 1400 °C sıcaklıkta sinterlenmiş sıvı plastik arayüzeye sahip numune	74

Resim**Sayfa**

Resim 6.10. 600 μm arayüzey kalınlığına sahip numunelerde sıcaklığın boşluğa etkisinin optik mikroskopta incelenmesi.....	75
--	----



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A	Çubuğun kesit alanı (mm^2)
A_ç	Çeliğin kesit alanı (mm^2)
A_e	Enjeksiyon bölgesinin kesit alanı (mm^2)
D₁₀, D₅₀, D₉₀	Toz boyutu
D	Toz çapı
d_d	Dış çap (mm)
d_{fo}	Besleme stoğunun dış çapı (mm)
d_{fi}	Besleme stoğunun iç çapı (mm)
d_i	İç çap (mm)
d_s	Ck45 çeliğinin çapı (mm)
E	Young modülü (GPa)
E_ç	Çeliğin Young modülü (GPa)
E_e	Enjeksiyon bölgesinin Young modülü (GPa)
L	Toz boyu
L_ç	Çubuk boyu (mm)
L_ç	Çeliğin boyu (mm)
L_e	Enjeksiyon bölgesinin boyu (mm)
L_i	Numunenin ilk boyu (mm)
P	Çubuğun mesnete uyguladığı kuvvet (N)
P_t	Temas bölgesinde uygulanan kuvvet (N)
Sw	Toz boyut dağılımı
t_f	Besleme stoğunun kalınlığı (mm)
t_s	Ck45 çeliğinin kalınlığı (mm)
V₀	İlk hacim (mm^3)
V_{0f}	Besleme stoğunun ilk hacmi (mm^3)
V_{0s}	Ck45 çeliğinin ilk hacmi (mm^3)

Simgeler**Açıklamalar**

W	Toz genişliği (μm)
ΔL	Sıcaklıkla boydaki değişim
ΔT	Sıcaklık farkı
ΔV	Hacimsel büzülme (mm^3)
σ	Dayanım değeri (MPa)
$\sigma_{\text{ç}}$	Çelikte oluşan gerilme (MPa)
σ_e	Enjeksiyon bölgesinde oluşan gerilme (MPa)
ε_e	Enjeksiyon bölgesinin gerinimi (mm/mm)
$\varepsilon_{\text{ç}}$	Çeliğin gerinimi (mm/mm)
α	Isıl genleşme katsayısı ($1/^\circ\text{C}$)
$\alpha_{\text{ç}}$	Çeliğin termal genleşme katsayısı ($1/^\circ\text{C}$)
α_e	Enjeksiyonun termal genleşme katsayısı ($1/^\circ\text{C}$)
δ_e	Çeliğin boyunda meydana gelen değişim (mm)
δ_e	Enjeksiyon boyunda meydana gelen değişim (mm)

Kısaltmalar**Açıklamalar**

CCl_4	Karbon Tetra Klorür
D_i/D_e	İnsört Çapı/Enjeksiyon Bölgesi Çapı
İTEK	İnsörtlü Toz Enjeksiyon Kalıplama
PEG	Polietilen Glikol
POM	Polioksimetilen
PVA	Polivinil Alkol
SEM	Tarayıcı Elektron Mikroskobu
TG	Termogravimetri
WC-CO	Tungsten Karbür-Kobalt

1. GİRİŞ

Mafsal, hareket eden iki parçanın hareket edebilme özelliklerini kaybetmeden birbirine bağlanmasını sağlayan mekanik bir sistemdir. Küresel mafsal ise bir milin küresel bir yatak içinde belli açıyla hareket edebildiği mafsal türüdür [1]. Robot teknolojilerinde, savunma ve uzay sanayisinde, otomotiv, medikal gibi birçok sektörde bu mafsallar önem kazanmaktadır.

Bu bağlantı elemanları, yüksek hız, rijitlik veya hassasiyetin gerekli olduğu robot mekanizmaları uygulamalarında kullanılır. Savunma ve uzay sanayisinde farklı geometrilerdeki kafes yapılarında, uçuş simülatörlerinde, havacılık endüstrisinde özel küresel rulman olarak kullanılmaktadır [2]. Otomotiv sektöründe kullanılan küresel mafsal bağlantıları, tekerleğin farklı durumlarında bağlantısının sürekliliğini sağlar ve kontrol kollarını direksiyon mafsallarına bağlar. Örneğin, aracın ön tekerleği bir tümsekteyse, mafsal hareketli bir mekanizma olduğundan aksı hafif yukarı kaldırarak bağlı kalmasını sağlar [3]. Küresel mafsallar otomotiv sektörünün dışında sağlık sektöründe kalça ve parmak protezi olarak da kullanılabilmektedir. Ayrıca vücuttaki eklemlerin büyük bir bölümünü oluşturan hareketli eklemler (sinovyal eklem) olarak kullanılırlar [4]. Küresel mafsalların bu alanlarda yaygın kullanımından dolayı daha pratik bir üretim metoduna ihtiyaç duyulmaktadır. Hareketli yüzeye sahip ve montajlı parça üretiminde fazladan kullanılan her teknik, zaman ve malzeme kaybına sebep olarak üretim maliyetini arttırmaktadır.

Yapılan yeni araştırmalar ile küçük ölçekteki mafsal imalatında malzeme ve geometrik sınırlamaları ortadan kaldırmak için toz enjeksiyon kalıplama (TEK) yöntemi kullanılmaya başlanmıştır [5-7]. Plastik enjeksiyon kalıplama prensibine dayanan TEK yöntemi ile özellikle küçük boyutlu parçaların üretimi ve karmaşık şekilli parçalar daha düşük maliyette, daha yüksek üretim oranlarında imal edilebilmektedir. TEK yöntemi; besleme stoğunun hazırlanması (toz-bağlayıcı karışımı), kalıba enjekte edilmesi, bağlayıcı giderme işlemi ve sinterleme olmak üzere dört temel adımdan meydana gelmektedir [8].

Ruh ve arkadaşları geliştirdikleri bağlayıcıyı kullanarak farklı metal malzemelerden yapılmış iki bileşenli parçaların birlikte sinterlenmesi sonucu mekanizma hareketinin gerçekleşmesini sağlamışlardır [9]. Hareketi sağlayacak boşluk, malzemelerin

sinterlemedeki hacimsel çekme farkı ile sağlanmıştır. Ancak bu yöntem, boşluk kontrolünün zor olması ve yöntemin seri üretime uygun olmaması nedeniyle pratik değildir. Bu yöntemin zahmetli olması, TEK işleminde kaybolabilen arayüzey ile ilgili çalışmaları beraberinde getirmiştir.

Chartier ve arkadaşları, Zhang ve arkadaşları, Williams ve arkadaşları çalışmalarında, TEK yönteminde bağlayıcı giderme işlemlerinde ortamdan uzaklaştırılabilen arayüzeyler üzerine araştırma yapmışlardır [10-12]. Çalışmalar sonucunda arayüzeyler bağlayıcı giderme işlemlerinde ortamdan uzaklaştırarak parça üretimi gerçekleşmiştir. Attia ve arkadaşları, 316L paslanmaz çelik besleme stoğu kullanarak TEK yöntemi ile parmak eklemi olarak kullanılabilen bir mafsalın üretilebilirliğini araştırmışlardır [13]. Çalışma sonucunda, enjeksiyon işlemi ile oluşturulan polioksimetilen (POM) arayüzey kullanımı ile hareketli mafsal üretilebilmiştir. TEK yönteminde arayüzey kullanımının araştırıldığı bu çalışmalarda arayüzey oluşturabilmek için multi-enjeksiyon kalıbı ve bunun enjeksiyonu için de çift ekstrüderli enjeksiyon makinası gerekmiştir. Ayrıca, arayüzey, kimyasal bağlayıcı giderme işleminde enjeksiyon bölgesinde çökme ve toz yığılması olabilmektedir.

Bu çalışmada insörtlü toz enjeksiyon kalıplama (İTEK) yöntemi ile hareketli yüzeye sahip ve montajlı parçanın üretilebilirliği yeni bir yöntem kullanılarak araştırılmıştır. Hareketli mekanizmaların bileşenleri arasında ihtiyaç duyulan boşluğun farklı arayüzeylerin kullanımı ile oluşturulması amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Tezin amacı TEK yöntemi ile hareketli yüzeye sahip ve montajlı parça ilave herhangi bir imalat tekniği kullanmadan üretmektir. Literatür kısmı iki ana bölümde sunulmuştur. Bunlar; toz enjeksiyon kalıplama (TEK) yöntemi, insörtlü toz enjeksiyon kalıplama (İTEK) ve küresel şekilli montajlı parçalar (mafsallar) olmaktadır.

2.1. Toz Enjeksiyon Kalıplama (TEK) Yöntemi

TEK, plastik enjeksiyon kalıplama prensibine dayanır. Bu yöntem özellikle küçük boyutlu ve karmaşık şekilli parçaların düşük maliyetlerle üretilebilmesi için geliştirilmiştir. Ayrıca, bu yöntem yüksek yoğunluklu metallere, seramiklerden, kompozitlerden ve intermetallerden parça yapabilmek için kullanılır [14]. TEK yöntemi ile ilgili literatürde çok fazla çalışma mevcuttur. Verilen literatürde, WC-%9Co esaslı besleme stoğu kullanıldığından dolayı bu besleme stoğu kullanılmış çalışmalar daha fazla belirtilmiştir.

Zhu ve arkadaşları çalışmalarında WC-%9Co tozun TEK yöntemi kullanarak kalıplanmasında, parafin esaslı çok bileşenli yeni bir bağlayıcı geliştirmişlerdir. Meydana gelen besleme stoğunun reolojisi üzerine çalışılmışlardır. Bağlayıcı giderme ve sinterleme parametreleri optimize edilerek parça üretimi yapılmıştır. Çalışma sonucunda üretilen parçaların kopma dayanımı 2500 MPa olurken yoğunluğu 14,72 g/cm³ olmuştur [15].

Cheg ve arkadaşları çalışmalarında W-%20 Cu tozu ve parafin mumu, yüksek yoğunluklu polietilen, etilen vinil asetat ve stearik asitten bağlayıcı sisteminden oluşan bir besleme stoğu kullanılarak TEK yöntemi ile parça imal etmişlerdir. Enjeksiyon, bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri için en uygun parametreler tespit edilmiştir. 1150 °C sinterleme sıcaklığında en yüksek yoğunluğun %95,58 olduğu gözlemlenmiştir. Ürün, ince ve homojen mikroyapıya sahip olmuştur [16].

Heng ve arkadaşları sinterleme sıcaklığının, WC-%10Co besleme stoğundan TEK işlemiyle üretilen parçanın, mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisini araştırmışlardır. 1380 °C, 1400 °C ve 1420 °C'deki sinterleme sıcaklıklarında çalışma yapılmıştır. Sinterleme sıcaklığı arttıkça tane büyümesi artmış, mekanik özellikler iyileşmiştir. Sinterlenmiş parçalarda

ortalama kopma mukavemeti 2042 MPa ve ortalama yoğunluk %96 (13,85 g/cm³) olmuştur [17].

Heng ve arkadaşları WC-%10Co besleme stoğudan TEK ile parça üretimini optimize etmişlerdir. Kimyasal bağlayıcı giderme işlemi 65 °C'de yapılırken termal bağlayıcı giderme işlemi 470°C'de 5-10°C/dk hızda gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemi ise 1380 °C-1420 °C sıcaklık aralığında yapılmıştır. Çalışma sonucunda, %96 yoğunluk, 1700 MPa kopma mukavemeti, 2100 MPa eğilme mukavemeti ve 1,17 µm yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir [18].

Fayyaz ve arkadaşları çalışmalarında WC-%10Co besleme stoğunun reolojisini incelemişlerdir. Bağlayıcı olarak parafin ve düşük yoğunlukta polietilen kullanılmıştır. Kimyasal bağlayıcı giderme işlemi heptan ortamında 35 °C'ta 3 saat, sinterleme işlemi ise vakum ortamında 1410 °C'de 10 °C/dk ile yapılmıştır. Çalışma sonucunda optimum toz yüklemesi değerinin hacimce %50 olması gerektiği bulunmuştur [19].

Chen ve arkadaşları polietilen glikol (PEG) içeren bağlayıcılar üzerine çalışmışlardır. Araştırmalarında bağlayıcı giderme işlemini modelleyip simülasyonunu yapmışlardır. PEG kullanarak suda çözölen bağlayıcıları geliştirmişler ve bağlayıcı giderme işlemini hızlandırmışlardır [20].

Samet ve arkadaşları çalışmalarında parçanın kalınlığı, hacmi, yüzey alanı/hacim (A_y/V) oranı ve bağlayıcı ayrıştırma süresinin ağırlık kaybına etkisi tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda ham mukavemetli WC-% 9Co parçalarda yüzey alanı/hacim (A_y/V) oranı arttıkça ağırlık kaybının da arttığı, kalınlık ve hacmin artması ağırlık kaybını azalttığı tespit edilmiştir. Etanol ortamında ve 60 °C sıcaklıkta bağlayıcı ayrıştırma işlemi gerçekleştirilen numunelerde optimum sürenin 60 saat olduğu belirlenmiştir [21].

Luo ve arkadaşları TEK yöntemi ile tungstenden ürettikleri parçaların enjeksiyon ve sinterleme parametrelerinin boyutsal hassasiyete etkilerini incelemişlerdir. 2300 °C'de 180 dk süreyle hidrojen atmosferi altında sinterlemeden sonra tungsten parçanın teorik yoğunluğu %92,86 olmuştur. Parçaların boyut hassasiyetinin $\pm 0,09$ oranında kontrol edilebileceğini belirlemişlerdir. Enjeksiyon basıncı ve sinterleme sıcaklığı en etkin

parametreler olarak tespit edilmiştir. Yerçekimi etkisinden dolayı dikey yöndeki çekme oranı, yatay yöndeki çekme oranından %0,5 daha fazla olmuştur [22].

Zu ve arkadaşları çalışmalarında %4,9W-%2,1Ni-Fe besleme stoğu kullanarak, TEK yöntemi ile üretilmiş parçalarda kimyasal bağlayıcı giderme sıcaklığının ve ortamının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Sıcaklık ve sürenin artması ile ağırlık kaybı artmıştır. Optimum parametrelerde üretilen parçada çekme gerilmesi 1100 MPa, çekme uzaması %25 ve sertlik 64 HRC olmuştur [23].

Mamen ve arkadaşları ince (0,4 ila 1 μm) ve kaba (5,0 ila 7,0 μm) tungsten toz kullanılarak TEK yöntemiyle imal edilmiş parçaların sinterleme aşamasındaki davranışını, dilatometrik ve üç noktalı eğilme testleri ile 1700 °C'de saf bir hidrojen atmosferi altında araştırılmışlardır. Tozun parçacık büyüklüğünün, yoğunlaşma davranışını, sinterleme aktivasyon enerjisi ve sinterleme stresine olan etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmişlerdir. Analiz sonucunda ince toz ile üretilmiş parçaların yoğunluğunun daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Kaba toz ile üretilmiş parçaları sinterlemek için gerekli olan enerji miktarı daha fazla olmuştur [24].

Qu ve arkadaşları WC-TiC-Co tozu kullanarak TEK ile üretimi için parafin esaslı bir bağlayıcı geliştirmişlerdir. Geliştirilen besleme stoğunun kritik toz yüklemesi ve reolojik davranışları belirlenmiştir. Kritik toz yüklemesinin hacimce %62,5'e kadar çıkabildiği ve besleme stoğunun psödoplastik akış davranışı sergilediği gözlemlenmiştir. Kimyasal ve termal bağlayıcı giderme işlemleri H₂-N₂ karışım gazı atmosferinde yapılmıştır [25].

Fayyaz ve arkadaşları çalışmalarında mikro TEK imalatı ile tungsten parça üretilebilirliğini araştırmışlardır. Besleme stoğu WC-%10Co-%0,8VC tozu ile parafin, düşük yoğunluklu polietilen ve stearik asitten oluşan bir bağlayıcı sistemden oluşmuştur. Kimyasal bağlayıcı giderme işlemi 50°C sıcaklıkta argon atmosferinde 3 saat yapılmıştır. Sinterleme işlemi ise 1330-1450 °C sıcaklık aralığında vakum altında gerçekleştirilmiştir. Sinterlemeden sonra makul bir değer olan %94,5'lik bir yoğunluk elde edilmiştir. Mikro bileşenler, geleneksel toz metalurjisi ile karşılaştırıldığında, %16 ile %22 arasında çekme yüzdesi, iyi yüzey kalitesi ve sertlik değerleri vermiştir. Bu araştırma, mikro-TEK'in geleneksel toz metalürjisi ile karşılaştırılabilir küçük WC-Co bileşenleri üretebildiğini göstermektedir [26].

2.2. İnsörtlü Toz Enjeksiyon Kalıplama (İTEK) Yöntemi

Bir TEK yöntemi olan İTEK yönteminde ise, enjeksiyon esnasında kalıp boşluğu içine hazır çekirdek (insört) konulmasına ve parçanın tümünün değil sadece insört çevresine besleme stoğunun enjekte edilmesi prensibine dayanmaktadır. Böylece parçanın karmaşık geometriye sahip olan dış bölgesi enjeksiyon ile şekillenmektedir. İTEK'in birinci avantajı bağlayıcı giderme süresinin kısaltılması, ikinci avantajı ise daha az besleme stoğu kullanılmasından malzeme maliyetinin azaltılması ve diğer bir avantajı daha büyük (<10 mm) parçaların üretiminin yapılmasıdır.

Chang ve arkadaşları karmaşık yapıdaki parçanın İTEK yöntemiyle üretiminin 3 boyutlu simülasyonunu yapmışlardır. Simülasyon sonucunda İTEK yönteminin maliyet açısından diğer üretim yöntemlerinden daha verimli olduğu ispatlanmıştır [27].

Kim ve arkadaşları yüksek çözünürlüklü ve düşük maliyetli polimerik nano yapıların üretilmesi için yeni bir yöntem araştırmışlardır. Bu yöntem nano-İTEK kullanılarak yapılmıştır. İnsört olarak suda çözünebilen polivinil alkol (PVA) film tabakası kullanılmıştır. İTEK prosesinden ürün su ortamında bekletilmiştir. Bu sayede insörtün suda çözünerek ortamdan giderilmesi sonucunda arzu edilen parça geometrisi elde edilmiştir [28].

Arvind ve arkadaşları çok mafsallı minyatür robotik yapılar oluşturmak için insörtlü kalıplama yöntemini kullanmışlardır. İmal edilen robotik modelde optimum tasarım parametreleri analizler ile tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda insört kalıplama kullanılarak çoklu serbestlik dereceli mafsallı bir yapı oluşturulmuştur [29].

Wang ve arkadaşları çalışmalarında insört kalıplama ile üretilen parçaların kuvvet analizini gerçekleştirmişlerdir. Metal insört öncelikle kalıp içine yerleştirilmiştir ve daha sonra enjeksiyon kalıplama ile daldırma regülatörü olarak adlandırılan gömülü bir plastik ürün haline getirilmiştir. Çalışma sonucunda 15,82 N.m tork elde edilmiş ve yüksek mukavemet elde edebileceği görülmüştür [30].

Liou ve arkadaşları insörtlü mikro-hücreli enjeksiyon kalıplama işlemi ile mikro-polimer kompozit malzemesi üretmişlerdir. Çalışma sonucunda mikro hücreli polimer katkısı ile

daha düşük ağırlık, daha iyi fiber-matris arayüzü ve geliştirilmiş geri dönüştürülebilirlik sağlanmıştır [31].

Mao ve arkadaşları çalışmalarında polipropilen esaslı polimer kompozitleri, insörtlü kalıplama yöntemi ile üretmişlerdir. Bu yöntem ile daha yüksek verimlilik elde edilmiştir ve proses süresi azalmıştır. Çalışma sonucunda malzeme mukavemeti 2,3 katına çıkarak 70 MPa olmuştur [32].

Asghar ve arkadaşları çalışmalarında İTEK yöntemini kullanarak büyük hacimli parçaların üretimini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda insört ile esas malzeme (besleme stoğu) arasındaki difüzyonda sinterleme sıcaklığı ve insört çap oranının en etkin faktörler olduğu tespit edilmiştir. Difüzyon ile birleşme, insörtün yüzey pürüzlülüğüne bağlı olmak üzere, yüzey pürüzlülüğü büyüdükçe daha iyi olduğu tespit edilmiştir [33].

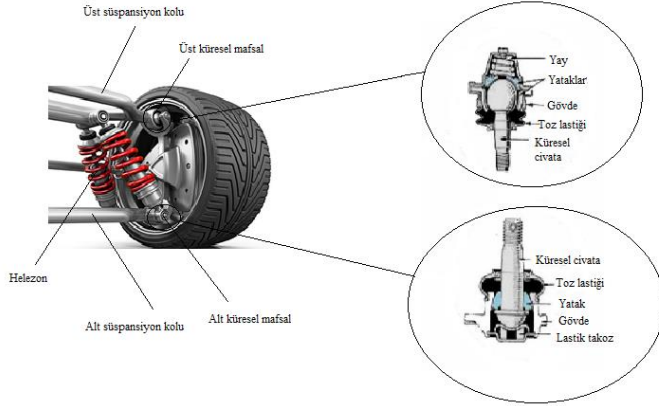
2.3. Küresel Şekilli Montajlı Parçalar (Mafsallar)

Mafsal, hareket eden iki parçanın hareket edebilme özelliklerini kaybetmeden birbirine bağlanmasını sağlayan mekanik bir sistemdir. Küresel mafsal, küresel bir yatak içinde belli açıyla hareket edebilen bir mafsal milinden oluşur. Genellikle robot teknolojilerinde, otomotiv sektöründe (rot, rotil gibi hayati önem taşıyan parçalarda) ve medikal sektöründe ve çeşitli imalat alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır [1].

Shin ve arkadaşları [34] yaptıkları çalışmada bir mafsal milinin ölçülerini ölçmeye yarayan bir görsel temelli inceleme sistemi tasarlamış ve imal etmişlerdir. Sistem arkadan ışıklandırma ile görüntülerin silüetinin çıkartılması ile çalışmaktadır. Sistem incelenen nesneyi diğer nesneleri tanıyabilmek için bir düzlemde değil uzayda çevirmektedir. Nesneyi dikey olarak hareket ettirirken nesnenin değişik parçalarının resmini çekmektedir. Bu sayede ölçme çözünürlüğü artmıştır.

Küresel mafsallar, otomobil içerisinde direksiyon mafsal kolu ile süspansiyonlarda bulunan kontrol kolu ile bağlantıyı sağlar. Bu mafsallar genellikle tüm otomobillerde bulunmaktadır. Tekerleklerle gelen düşey ve yatay kuvvetleri taşır ve aracın dönmesi esnasında direksiyon çatallarına pim vazifesi görür. Direksiyonun sisteminin istekleri doğrultusunda hareketi rot

kolundan alır ve direksiyon mafsalına iletir [35]. Şekil 2.1’de otomobillerde kullanılan küresel mafsalları bağlantılarının şematik açıklaması gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Otomobillerde kullanılan küresel mafsalları bağlantıları [35]

Park ve arkadaşları çalışmalarında, otomobillerin direksiyon sistemlerinde kullanılan ve bir küresel mafsalları olan rotun imalatını sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada şekillendirme parametrelerinin etkisini sonlu elemanlar yöntemi ile açıklamışlardır. Yapılan simülasyonlar ve analizler sonucunda parçanın optimizasyonu sağlanmıştır. Deneysel sonuçlar ile analiz sonuçları birbirine yakın çıkmıştır [36].

Im ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, dövme simülatörü ve bir yazılım ile desteklenmiş bir bilgisayar destekli işlem tasarımı ile küresel mafsalların soğuk dövme yöntemi ile imali için gerekli sistem tasarımı üzerine çalışmışlardır. Tasarım sonucunda verimliliğin çok daha fazla olduğu görülmüştür [37].

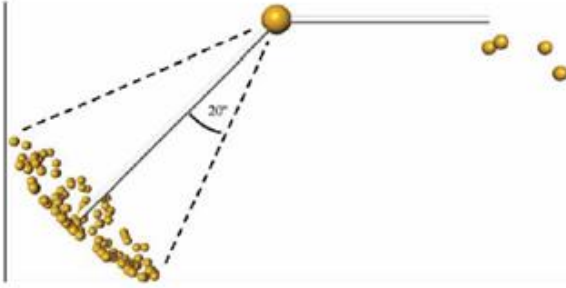
Akkoyunlu [1] küresel mafsallarda aşınma dayanımının incelenmesi ve iyileştirilmesi konusunda çalışmıştır. Rotillerde meydana gelen aşınmayı deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada sonucunda üretim koşullarında iyileştirmeler yapılmış, ileri kaplamalar ile aşınma sürtünmenin azaltılması ve servis ömrünün artırılması sağlanmıştır.

Song ve arkadaşları yaptıkları çalışmada rotinin (otomobillerin direksiyon ve süspansiyon sistemlerinin mekanik aksamalarını birbirine bağlamayı sağlayan bir bağlantı elemanı) işlem kademelerinin tasarımı için bir uzman sistemi geliştirmişlerdir. Ayrıca çalışmada, rotilde

bulunan mafsall milinin imalatı için işlem kademeleri tasarımı için uzman bir sistem geliştirilmiştir [38].

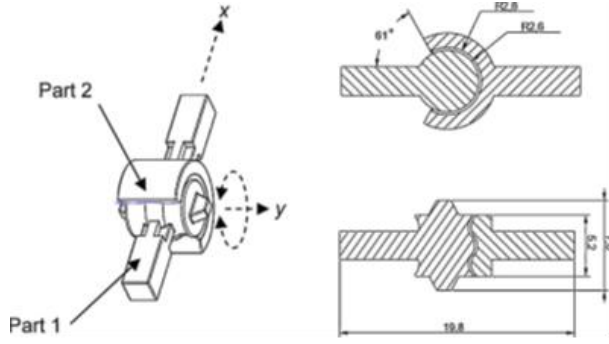
Küresel mafsallar otomotiv sektörünün dışında sağlık sektöründe kalça ve parmak protezi olarak da kullanılabilir. Sağlık alanında sinovyal eklem olarak kullanılmaktadırlar. Mafsaldaki küresel yüzeyin kemik içerisine bağlanması sağlanır. 360° dönebilme özelliğine sahip olan bu tür mafsallar kemiğin diğer bağlantılara göre daha rahat hareket edebilmesini sağlar [39].

Ehrig ve arkadaşları yaptıkları çalışmada küresel mafsallarda özellikle medikal sektörde sıklıkla kullanılan ve bilinmesi gereken dönme merkezinin tam olarak belirlenebilmesi üzerine çalışmışlardır. İlk olarak değişik metotları birbirleri ile karşılaştırmışlardır. Buna ek olarak "simetrik dönme merkezi" adını verdikleri, dönme merkezi koordinatlarının sadece bir bölgeye değil her bölgeye göre sabit olduğu bir yöntem belirlemişlerdir. Her bir metot için yaklaşık bin dönme merkezi tahmini analiz yapmışlardır. Çalışma sonucunda dönme merkezini 30 mm'ye kadar belirleme yetisine sahipken, simetrik dönme merkezi yöntemi ile yaklaşık 1,2 mm'ye kadar belirleyebilmişlerdir (Şekil 2.2) [40].



Şekil 2.2. Sanal bir kalça üzerinde uygulanan bir test konfigürasyonunun gösterimi [40]

Attia ve arkadaşları çalışmalarında, TEK işlemi kullanarak iki bileşenden oluşan ve sağlık sektöründe parmak eklemi olarak kullanılabilir bir bağlantı imal etmişlerdir (Şekil 2.3). Enjeksiyon işlemi ile oluşturulan polioksimetilen (POM) arayüzey kullanımı parçanın hareketini sağlamıştır. Arayüzeyin kimyasal bağlayıcı giderme işlemiyle ortamdan giderilmesi parçalar arası boşluk oluşumunu gerçekleştirmiştir [13].



Şekil 2.3. Parmak protezi için kullanılacak olan küresel bağlantı [13]

Ruh ve arkadaşları geliştirdikleri bağlayıcıyı kullanarak farklı metal malzemelerden yapılmış iki bileşenli parçaların birlikte sinterlenmesi sonucu mekanizma hareketinin gerçekleşmesini sağlamışlardır. Farklı besleme stoklarıyla TEK yöntemi ile iki bileşenli parça oluşturulmuştur. Ürünün hareketli olmasını sağlayan ise sinterleme işlemindeki hacimsel çekme mekanizmasıdır. Sinterleme aşamasında farklı çekme yüzdesiyle daralan parçalar arasında mikro ölçekte boşluk meydana gelmiştir [9].

Chartier ve arkadaşları, Zhang ve arkadaşları, Williams ve arkadaşları çalışmalarında, TEK yönteminde bağlayıcı giderme işlemlerinde ortamdan uzaklaştırılabilen arayüzeyler üzerine araştırma yapmışlardır. Bizmut, kalay ve indiyum esaslı farklı alaşımlardan oluşan arayüzeyler çift ekstrüderli enjeksiyon makinasıyla oluşturulmuştur. Arayüzeyler bağlayıcı giderme işlemlerinde yüksek sıcaklık ve kimyasal reaksiyonlar ile ortamdan uzaklaştırılmıştır. Bu sayede bileşenler arası boşluk sağlanmıştır. Çalışmalar sonucunda hareketli parça üretimi gerçekleşmiştir [10-12].

3. TUNGSTEN VE TUNGSTEN KARBÜR

Kimyaca saf tungsten (W), ateşe dayanıklı gümüş beyazı bir metaldir. 1600 °C’de dövülebilir hale gelmektedir ve ince tel halinde çekilebilmektedir. Demir, nikel, kobalt ve molibdenle sayısız alaşımlar meydana getirmektedir. Az miktarda tungstenin (%1’den %10’a kadar) çeliğe ilavesiyle, çeliğin, dayanıklılığı ve aside ve ısıya karşı mukavemeti artmaktadır. Tungstenin özellikle karbonla ve borla bileşiklerinin mukavemeti yüksektir. Tungstenin bu özellikleri onu en önemli endüstriyel materyal haline getirmektedir [41].

Tungsten elementi olarak 1771 yılında keşfedilmiştir. Fakat hemen hemen bir asra yakın bir zamanda kullanım alanı bulunamamıştır. Ancak daha sonraki yıllarda el aletleri yapımına yarayan yüksek kaliteli çeliklerin imalinde, büyük kesme hızı olan ısıya dayanıklı aletlerde, tüfek namlularında, içten yanmalı motor valfleri gibi parçalarda tungsten ve alaşımları ile üretilmeye başlanmıştır. Tungstenin büyük bir kısmı matkap ve matkap uçları, tanksavar mermi çekirdeği, kesici aletlerin imal edilmesine yarayan karbid ve borid alaşımlarının elde edilmesinde kullanılmaktadır. Tungstenin %5’lik bir kısmı ise elektrik endüstrisinde, ışık veren ampul teli, X ışını tüpleri, kontakt ve atomik kaynak elektrotları imali için kullanılmaktadır. Tungsten elementinin az bir kısmı da, kimya endüstrisinde, boya ve verniklerin yapımında ve aynı zamanda ateşe dayanıklı ve su geçirmez tekstil imalatında kullanılmaktadır [42].

Bir tungsten alaşımı olan tungsten karbür ise yüksek sertliği ve aşınma direnci fakat zayıf tokluğu olan bir bileşiktir. Kobalt ve nikel gibi sünek metal matrisler tokluğu iyileştirebilmektedir. Kobalt metal matris içerisine gömülmüş sement karbürler (genellikle WC-Co) aşınmaya dayanıklı, yeterli sertlik ve tokluk davranışı sergiler. Böylece kesme ve işleme sırasında oluşan titreşime dayanabilir. Tungsten karbür yaygın olarak kesme takımlarında ve aşınmaya karşı direnç istenilen durumlarda kullanılmıştır [43].

Tungsten karbürler genellikle, sıvı faz sinterlemesi ve ileri sinterleme operasyonlarını içeren toz metalürjisi yöntemi ile üretilir [44]. Tungsten karbür-kobalt (WC-Co) seramik metaller yüksek sertlik ve aşınmaya karşı üstün özellikleri ile geniş bir kullanım alanına sahiptirler [45-48]. Bu yüzden imalat sektörünün çeşitli dallarında kullanılmaktadır. WC-Co malzemelerde, kobalt (Co) metal matrisi içerisinde yüksek hacimde tungsten karbür (WC)

bulunmaktadır. Bu malzemeler daha çok imalat endüstrisinde yüksek mekanik ve termik yüklere dayanıklı olması sebebiyle kesici takım malzemesi olarak kullanılır (Şekil 3.1). Ayrıca, otomotiv ve havacılık, petrol ve gaz sondajı, jeotermal enerji araması, madencilik, inşaat ve aşınmaya karşı dayanıklılığın gerekli olduğu diğer tüm uygulama alanlarında faydalanılabilir.



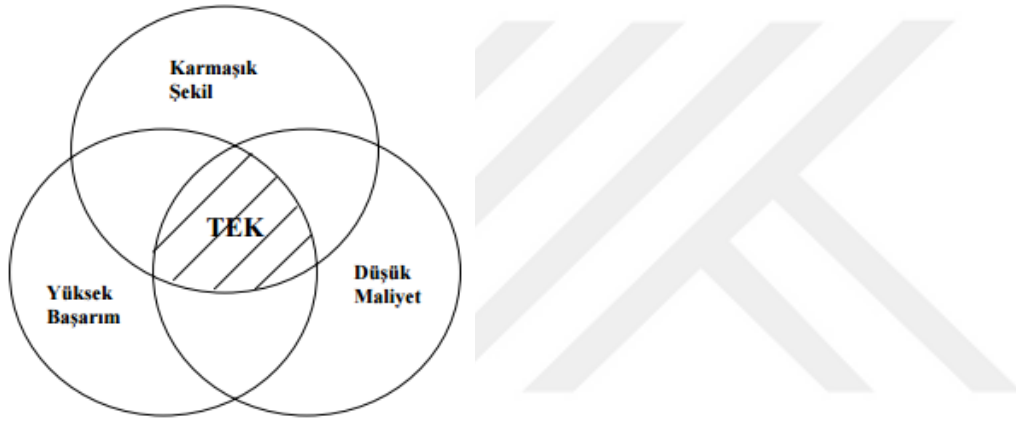
Şekil 3.1. Tungsten karbür kesici takımlar [49]

Nano boyuttaki WC-Co kompozit tozları kimyasal vakum ortamında sentezlenip üretilebilir [50]. Sert alaşımlar ve refrakter karbürler, WC sementiti yüksek sertlik ve çok iyi aşınma direncinin dışında yüksek basınç ve sıcaklıklardaki korozyon direnci ile madencilik endüstrisinde, metallerin işlenmesi ve delinmesi gibi geniş uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Ayrıca bu alaşımlar düşük tokluk direncine ve gevrekliğe sahiptir. Ancak alaşıma Co ilavesi ile alaşımın mikroyapısını yani WC tanelerinin bağını oluşturarak tokluk direnci geliştirilmiştir. Üretilen kompozitin mikroyapı ve mekaniksel özellikleri WC'in tane ölçüsüne ve Co içeriğine bağlıdır [51, 52].

Sementit karbür kesme takımlarının teknik özellikleri için WC tane boyutu önemlidir [53]. Nano yapıları WC-Co tozları, kaplama ve büyük kütleli bileşenlere uygulanabilirliği, iri taneli WC-Co tozlarına göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir [54]. Tungsten karbürli kompozit malzemeleri, tokluk mukavemeti ve yüzey gerilimi yüksek, abrasiv aşınmaya karşı dirençlidir [55, 56]. Bu karakteristik özellikler, kompozit içindeki Co bağlayıcı fazın miktarı ile ters orantılıdır [55]. Genellikle nano boyutta veya küçük parçacıklar şeklinde kullanılan WC-Co sert kompozit malzemelerin üstün performans ve yüksek aşınma direnci gösterirler [57]. Günümüzde WC-Co sert kompozitlerin; yüksek hızda çalışabilme ve düşük aşınma özelliğine sahip yani iyi bir tribolojik ve termal özellik gösteren yerlerde kullanılmaktadır [58].

4. TOZ ENJEKSİYON KALIPLAMA

Toz Enjeksiyon Kalıplama (TEK); metal veya seramik tozlarından küçük ve karmaşık şekilli, işlenmesi zor kesin boyutlu, hassas toleranslı, düzgün yüzeyli, işlenmesi güç ve fazla işlem gerektiren parçaların, uygun maliyetle üretimi için geliştirilmiş bir üretim metodudur [8, 59]. Şekil 4.1’de TEK tanımının şematik olarak anlatımı gösterilmektedir. Bu teknoloji ile değişik metal veya seramik parçaları diğer imalat yöntemlerine göre çok daha ekonomik ve hızlı bir biçimde üretilebilmektedir.



Şekil 4.1. TEK’in Venn şeması ile gösterimi [8]

İlk enjeksiyon kalıplama makinesinin patenti 1872’de John Hyatt tarafından alınmıştır. TEK teknolojisi ilk olarak 1920’li yıllarda seramik buji imalatında uygulanmıştır [60]. 1950’li yıllarda epoksi, balmumu, selüloz gibi bağlayıcılar kullanılarak düşük üretim hacminde karbür ve seramik bileşenleri şekillendirilmiştir. TEK’in gelişmesini sağlayan en önemli olay 1979 yılında geliştirilen iki tasarımın ödül alması olmuştur. Bu tasarımlardan biri jetlerde kullanılan vidalı sızdırmazlık elemanı, diğeri ise niobyum alaşımlı malzemeden yapılmış roket parçasıdır [61, 62]. 1980 yılında Almanya da dış sağlığında kullanılmak üzere üretilen bir parça ile ilk TEK parçanın seri üretimine başlanmıştır. TEK teknolojisi ilk zamanlarından beri büyük oranda gelişmiştir ve kullanımı yaygınlaşmıştır [63].

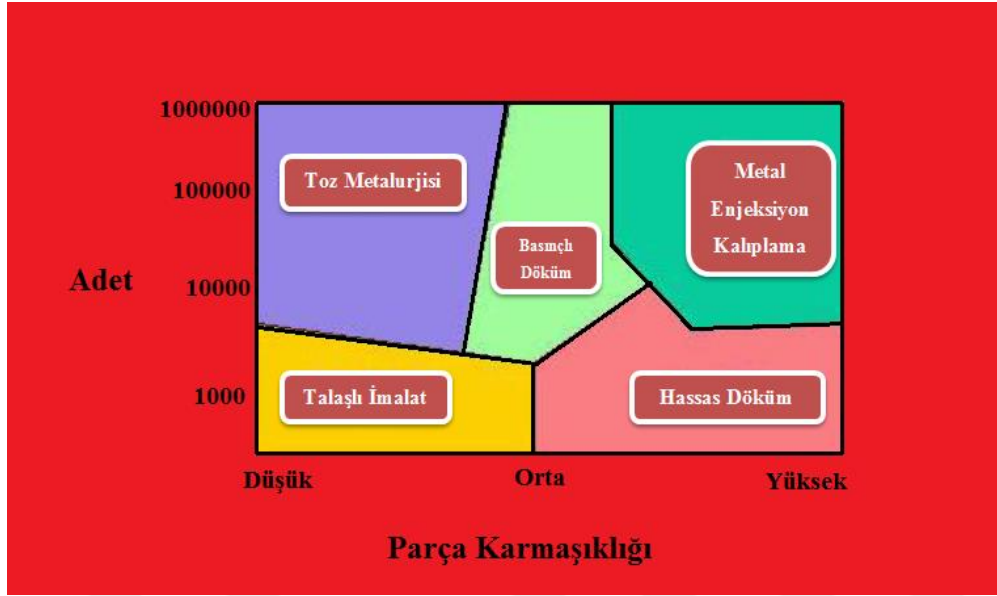
TEK yöntemi karıştırma, enjeksiyon kalıplama, bağlayıcı giderme ve sinterleme olmak üzere dört ana işlemten oluşmaktadır. Şekil 4.2’de TEK işleminin basamaklarının şematik olarak anlatımı gösterilmektedir. TEK yönteminde öncelikle uygun toz ve bağlayıcı seçilip

karıştırılır. Bu toz/bağlayıcı karışımlarına besleme stoğu adı verilmektedir. Besleme stoğu oluşturmak için metal ve seramik tozları termoplastik bağlayıcı veya mum esaslı polimerik malzemeler ve yağlayıcılarla homojen bir şekilde karıştırılmaktadır. Reoloji çalışmaları ile istenilen akış tipi sağlandıktan sonra optimum oranlarda toz ve bağlayıcı karıştırılarak granül hale getirilmektedir. Granül haldeki besleme stoğu, enjeksiyon makinesinde uygun sıcaklık ve basınçta boşluğuna enjekte edilir. Besleme stoğunun soğuması sonucunda kalıbın şeklini almış ham parçalar meydana gelir. Kalıp boşluğundan çıkan ham parçalara bağlayıcı giderme işlemleri uygulanır. Bağlayıcı giderme işlemi termal ve kimyasal olmak üzere iki farklı şekilde yapılmaktadır. Bu işlemden sonra parçalar sinterleme işlemine tabi tutulur. Sinterleme işlemi ile tozlar birbirine kaynak olur ve parçanın nihai yoğunluğu elde edilir [64, 65].



Şekil 4.2. TEK işlem basamakları [66]

TEK yöntemi diğer imalat yöntemleri ile karşılaştırıldığında düşük ve orta karmaşıklık derecesine sahip parçaların yaklaşık 10.000 adet üretimlerinde, talaşlı imalat metodu avantajlı görünürken, bu tip parçalarda adedin yükselmesi durumunda ise toz metalurjisi daha avantajlı bir üretim yöntemi olmaktadır. Orta karmaşıklığa sahip parçaların yüksek miktarlardaki üretiminde basınçlı döküm yöntemi de başka bir seçenek olmaktadır. Parça karmaşıklığının artar ise hassas döküm teknolojisine ihtiyaç duyulacaktır. Ancak hassas döküm yöntemi, üretim miktarı açısından yaklaşık 10.000 adete kadar avantajlı olmaktadır ve yüksek üretim hacimlerinde maliyet açısından dezavantajlı bir yöntemdir. Bu bölge için ihtiyaçları yalnızca TEK yöntemi karşılayabilmektedir (Şekil 4.3) [67].



Şekil 4.3. TEK'in imalat yöntemleri ile adet-karmaşıklık derecesi karşılaştırılması [68]

Toz enjeksiyon kalıplama işleminin uygulama alanı oldukça geniştir. Otomotiv sistemleri (direksiyon kolonlar, ateşleme kilit bileşenleri, Sunroof, oturma mekanizmaları, yakıt enjektörleri), ortodonti (diş telleri), tıp ve diş hekimliği cihazları (endoskopik cerrahi aletler), ateşli silah bileşenleri (tetik, güvenlik kilidi, gez, arpacık), donanım ve kilit parçaları (kilit silindirleri, cıvata, kilit dili, kenar çubuğu), bilgisayar ve elektronik (disk bileşenleri), elektrik (bağlayıcılar, anahtarlar) aletleri örnek olarak gösterilebilir. Şekil 4.4'te TEK yöntemi ile üretilmiş çeşitli parçalar görülmektedir. Çizelge 4.1'de TEK yönteminin uygulama alanları özelliklerine göre listelenmiştir [8]. Çizelge 4.2'de ise TEK yönteminin avantajları ve dezavantajları verilmiştir.



Şekil 4.4. TEK yöntemi ile imal edilmiş parçalar [69]

Çizelge 4.1. TEK uygulama alanları [8]

Parça	Uygulama	Özellik	Malzeme
Meme	Su püskürtücü	Aşınma Direnci	Alümina
Manivela	Otomotiv	Mukavemet	Çelik
Turbo değıştircici	Otomotiv	Yüksek sıcaklık dayanımı	Silisyum karbür
Pens	Tıbbi	Korozyon direnci	Paslanmaz çelik
Vidalı conta	Uçak motoru	Mukavemet	Süper alaşım
Kompresör	Roket motoru	Isı etkisi, mukavemet	Silisyum nitrür
Eğimli halka	Daktilo	Mukavemet	Çelik
Halat	Çelik Döküm	Isı, aşındırıcı	Alümina
Sızdırmaz kutu	Mikro elektronik	Termal genleşme	Alaşım (Fe-Co)
Manyetik çekirdek	Kamera motoru	Manyetik	Demir
Rakor	Tüfek namlusu	Estetik, mukavemet	Çelik
Kovan	Kol saati	Estetik, korozyon	Paslanmaz çelik

Çizelge 4.2. TEK yönteminin avantajları ve dezavantajları [70]

TEK Yönteminin Avantajları
Geleneksel toz metalurjisi ile üretilemeyecek karmaşık şekilli parçaların üretimine imkan verir.
Sinterleme sonrası parçanın tümünde homojen yoğunluğa ulaşılır.
Geleneksel toz metalurjisi ile üretimi çok zor olan mikro parçalar üretilir.
Toz boyu 400 nm olan bir tozdan yaklaşık on katı büyüklükte, yani 5 µm büyüklüğünde parça elde etmek mümkündür.
Geleneksel toz metalurjisinden daha hassas toleranslarda çalışılır.
TEK Yönteminin Dezavantajları
Toz boyutunun küçük (<20 µm) ve şeklinin küresel veya küresele yakın olması.
Geleneksel toz metalurjisinde olmayan bağlayıcı giderme işlemi kolay değildir. Bu aşama ek bir maliyet getirir.
Bağlayıcı giderme ve sinterleme aşamalarında beklenmeyen hatalar ön-ürün firesine sebep olur.
Geleneksel toz metalurjisine göre pahalı bir yöntemdir. Kalıp, tezgah ve çeşitli aparatlar maliyeti artırır.

4.1. Tozlar

Boyut olarak 0,2 mm'den küçük numune yığınının toz denir. Parçacık ise, tozun bölünemeyen en küçük birimi olarak tanımlanır. Toz işleme teknolojileri genellikle dumandan daha büyük (0,01-1 µm), fakat kumdan daha küçük (0,1-3 mm) parçacıklarla ilgilenir [14].

TEK'te başarılı bir kalıplamanın yapılabilmesi için tozların özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Sinterlenen parçanın son özelliklerini tozun başlangıç özellikleri belirler. TEK'te kullanılan tozlarda genel olarak aşağıdaki özelliklerin olması istenir [70-72]:

- Yüksek paketleme yoğunluğu ve düşük maliyet için uygun parçacık büyüklüğü dağılımı,
- Topaklanma olmaması,
- Küresel parçacık şekli,
- Bağlayıcının ayrışmasından sonra parçanın bozulmasını önlemek için parçacıklar arasında yeterli sürtünme (55° üstünde şev açısı),
- Hızlı sinterleme için küçük ortalama parçacık büyüklüğü ($20 \mu\text{m}$ altında),
- Kapalı, gözeneksiz yoğun parçacık,
- Temiz parçacık yüzeyi.

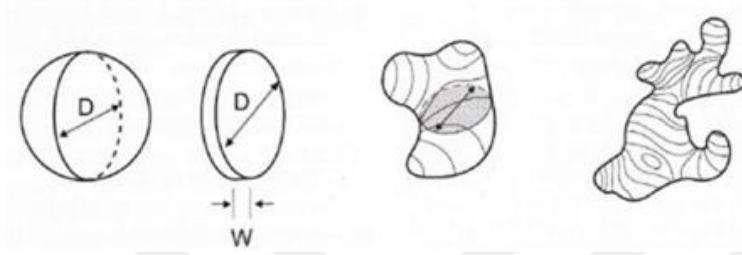
4.1.1. Tozun şekli

Tozun şekli, paketlemeyi, akışı ve sıkıştırılabilirliğini etkiler. Ayrıca bir tozu üretmek için kullanılan şartların belirlenmesine yardımcı olur. Parçacık şeklini sayısal olarak ifade etmek zor olduğundan, şeklin bir anlam ifade etmesi için niteliklerle ilgili tanımlayıcılar kullanılır. Çizelge 4.5'te parçacık şeklini ve uygun niteliksel tanımlamalar gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Parçacık şekilleri ve tanımlamaları [14]

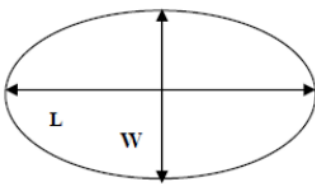
Şekil 4.6’da farklı düzenlerde tozlar gösterilmiştir. Küresel bir parçacık için (Şekil 4.6 a) boyut tek bir parametre olup, çap (D) olarak verilir. Ancak, parçacık şekli daha karmaşık olduğunda, boyutu tek bir parametre ile belirlemek zordur. Yassı veya pul şeklinde bir parçacık göz önüne alındığında (Şekil 4.6 b); boyutu tanımlamak için çap (D) ve genişliğin (W) her ikisi de gereklidir. Şekil daha düzensiz olduğunda, olası boyut parametrelerinin sayısı artar [14].



Şekil 4.6. Farklı karmaşık geometrilerdeki toz örnekleri a) Küre, b) Pul, c) Yuvarlak düzensiz, d) Düzensiz [14]

Toz şeklinin karmaşık olması boyut parametreleri sayısını arttırması dışında paketleme yoğunluğuna ve ham mukavemete de etki eder. Karmaşık tozlar düşük paketleme yoğunluğuna sahip iken küresel geometrili tozların paketleme yoğunluğu yüksektir. Paketleme yoğunluğunun fazla olması sinterleme aşamasında oluşan çekme yüzdesini ve kullanılacak bağlayıcı miktarını azaltır. Ancak küresel geometrili tozların mukavemeti karmaşık yapıdaki tozlara göre daha düşüktür. Bunun nedeni ise özellikle bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemlerinde küresel geometrili tozların şekil kaybının daha fazla olması ve tozlar arasında mekanik bağlılığın olmamasıdır [73].

TEK için ideal toz şekli Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Tozdaki toz boyu (L)/toz genişliği (W) oranı 1,2 ile 1,5 arasında olan toz şekli TEK için optimumdur. Bu şekilde olan tozlar arasında yeterli bağlılık sağlanır ve tozlar daha yüksek paketleme yoğunluğuna sahip olur. Böylece bağlayıcı kullanımı miktarı da minimum olur [71].



Şekil 4.7. TEK için İdeal toz şekli [71]

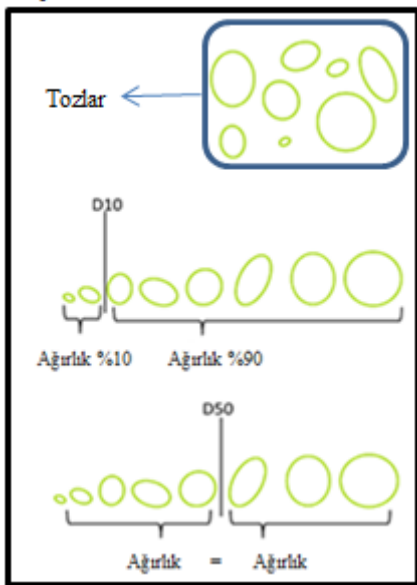
4.1.2. Toz boyutu ve dağılımı

Toz boyutu TEK için önemli faktörlerden birisidir. Parçacık boyutu ölçümü, bir parçacığın boyutlarının belirlenmesidir. Ancak bu belirleme ölçüm tekniğine, ölçülen özgül parametreye ve parçacık şekline bağlıdır. Enjeksiyon kalıplamada ideal tanecik büyüklüğünün 2 ile 8 μm arasında olduğu belirtilmiştir [72].

Toz büyüklük dağılımının genişliği de toz boyutu kadar önem taşımaktadır. Bir tozun boyutunu veya diğer özelliklerini doğru olarak belirlemek için, tozun uygun bir biçimde dağıtılması gerekmektedir. Dağıtma işlemi parçacık boyutu ne kadar küçük olursa o kadar güçleşir. Parçacık dağılımının genişliği, dağılımın ortalama parçacık büyüklüğünden uzaklığının ölçüsüdür. Parçacık büyüklük dağılımının genişliği Eş. 1.1 ile gösterilebilir.

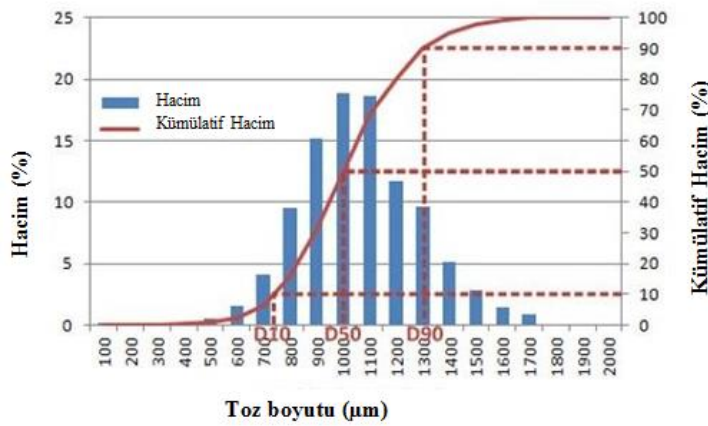
$$S_w = \frac{2,56}{\log_{10} \left(\frac{D_{90}}{D_{10}} \right)} \quad (1.1)$$

Yukarıda verilen eşitlikte S_w parçacık boyut dağılımı, D_{90} toz kütlesinin %90'nın ortalama parçacık boyutu, D_{10} toz kütlesinin %10'unun ortalama parçacık boyutu ve 2,56 sabittir. %10, %50 ve %90 kümülatif yüzdeye karşılık gelen boyutlardır. Bu değerlerin belirlenmesinin şematik olarak anlatımı Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Toz boyut dağılımının belirlenmesinin şematik olarak anlatımı [74]

Toz enjeksiyon kalıplama işleminde kullanılacak tozlar için S_w değerinin ya 2'den küçük ya da 7'den büyük olması gerekmektedir [75]. Farklı toz boyutları ve dağılımları ile TEK'te parça üretiminde meydana gelebilecek avantaj veya dezavantajlar Çizelge 4.3'te verilmiştir. Şekil 4.9'da ise TEK için üretilmiş örnek bir tozun boyut analiz sonucu verilmiştir. Bu analiz eleme işleminden sonra her bir elekte kalan toz ağırlığını veren elek analizi verilerine göre yapılmaktadır. Her bir kademedeki ağırlığı toplam numune ağırlığına bölerek veriler, kademeli yüzdelere çevrilmektedir. Bu veriler için histogram, elek açıklık boyutuna karşı kademeli yüzdelere çizilerek oluşturulmaktadır.



Şekil 4.9. TEK için üretilmiş örnek bir toz için toz boyut analizi [76]

Çizelge 4.3. Tozların özellikleri ve TEK'e etkileri [65]

	Avantaj	Dezavantaj
Küçük Tanecik	Hızlı sinterleme Kusursuz parça şekli	Yavaş bağlayıcı çözümü Yüksek maliyet Daha fazla topaklanma Karışım viskozitesinde yükseklik
Küresel Tanecik	Yüksek paketleme yoğunluğu Düşük karışım viskozitesi	Daha fazla sinterleme firesi Bağlayıcı gidermede çökme Düşük ham mukavemet
Geniş Tanecik Dağılımı	Yüksek paketleme yoğunluğu Daha az sinterleme firesi	Yavaş bağlayıcı giderme Homojen olmayan mikroyapı Daha çok kalite kontrol sorunu

4.2. TEK'te Kullanılan Bağlayıcılar ve Özellikleri

Bağlayıcılar, TEK'te tozların homojenliğini sağlayan ve sinterleme başlangıcına kadar parçayı bir bütün halinde tutan geçici bir araçtır. Büyük ölçüde organik bileşiklerin bir

karışımı olup, ana elemanları doğal mumlar veya sentetik polimerler olmaktadır. Bağlayıcıların öncelikli görevi toz parçacıkları kalıp boşluğuna taşımak ve orada toplanmasını sağlamaktır. Karıştırma ve kalıplamaya yardımcı olması için bağlayıcıların toz yüzeyini ıslatması gerekmektedir. TEK’te etkili olan ıslatıcılara örnek olarak titanlar, silikon hidritler, fosfatlar ve stearatlar verilebilir. Etkili yüzey aktif maddeler toz ve bağlayıcı arasında köprü oluşturarak karışımın viskozitesini azaltmakta ve katı miktarını arttırmaktadır [77, 78]. TEK’te örnek bağlayıcı sistemleri Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.4. TEK’te örnek bağlayıcı sistemleri [65, 72]

Bağlayıcı sistemi 1	Bağlayıcı sistemi 2	Bağlayıcı sistemi 3	Bağlayıcı sistemi 4
%70 parafin mum	%67 polipropilen	%33 parafin mum	%69 parafin mum
%20 mikrokristal mum	%22 mikrokristal mum	%33 polietilen	%20 polipropilen
%10 metil etil keton	%11 stearik asit	%33 bal mumu	%10 carnuaba mum
		%1 stearik asit	
Bağlayıcı sistemi 5	Bağlayıcı sistemi 6	Bağlayıcı sistemi 7	Bağlayıcı sistemi 8
%45 polisitren	%25 polipropilen	%65 epoksi reçine	%4 hint tutkalı
%45 nebati yağ	%75 fıstık yağı	%25 parafi mum	%3 gliserin
%5 polietilen		%10 bütül stearat	%93 su
%5 stearik asit			

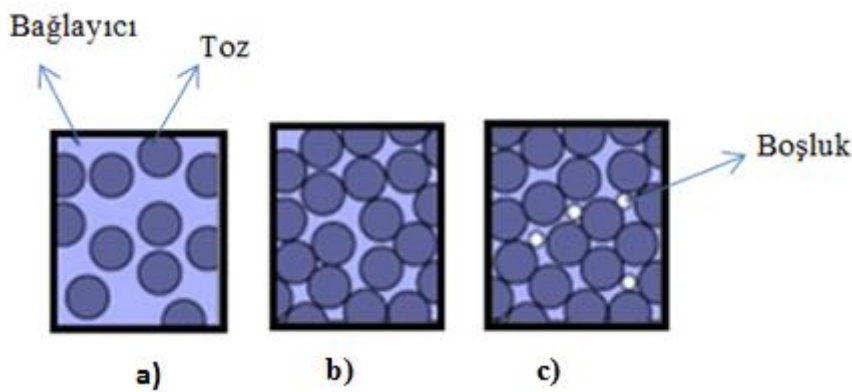
Başarılı bir enjeksiyon kalıplama gerçekleştirmek için besleme stoğunun niteliklerinin ideal olması gerekmektedir. Çizelge 4.5’te TEK için ideal bir bağlayıcının özellikleri verilmektedir. Besleme stoğunun kolay enjekte edilmesi için düşük viskoziteye sahip olmalı, homojen bir besleme stoğu hazırlamak için kalıba yapışmamalı ve uçucu olmamalı, kademe kademe sistemden ayrılmalı, kolayca uzaklaştırılabilmeli, uzun raf ömrüne sahip olmalı, ucuz olmalı, düşük ısı genleşme katsayısına sahip olmalı, kalıplama ve karışım sıcaklığında bozulmamalı ve akış esnasında tozdan ayrılmamalıdır [79, 80].

Çizelge 4.5. TEK yönteminde ideal bağlayıcı özellikleri [65]

Akış özellikleri
Kalıplama sıcaklığında saf bağlayıcı viskozitesi 10 Pa.s'den az olmalıdır.
Kalıplama sırasında, sıcaklıkta yapılan değişime göre viskozitedeki değişim az olmalıdır.
Soğuduktan sonra ham mukavemeti iyi olmalıdır.
Toz tanecikler arasına giren küçük moleküller uyumlu olmalıdır.
Akışta tozdan ayrılmamalıdır.
Tozla etkileşim
Düşük toz temas açısına sahip olmalıdır.
İyi bir yapışma davranışı göstermelidir.
Toza göre kimyasal olarak pasif durumda olmalıdır.
Ayrışma
Farklı özelliklerde birden fazla bileşene sahip olmalıdır.
Aşındırıcı olmamalıdır.
Bozulma sıcaklığı, kalıplama ve karıştırma sıcaklığının üzerinde olmalıdır.
Yaygın olarak bilinen zehirleyici olmayan çözücülerde çözünmelidir.
Termal genleşme ve kristalleşmeden gelen kalıcı gerilmeler düşük olmalıdır.
Üretim
Ucuz olmalıdır.
Güvenli ve çevreci olarak kabul edilen bir ürün olmalıdır.
Uzun raf ömrüne sahip olmalıdır.
Tekrar kullanılabilir özellikte olmalıdır.
Yüksek yağlayıcılık sağlamalıdır.
Bağlayıcılığı ve katılığı fazla olmalıdır.
Termal genleşme katsayısı düşük olmalıdır.
Kolay temizlenmeli ve bilinen çözücülerde çözünmelidir.

Bağlayıcı miktarı ve bileşimi belirlenmesi ise gerekli bir parametredir. Toz miktarının fazla, bağlayıcı miktarının ise az olması durumu viskoziteyi yükseltmektedir ve bu durum kalıplama işleminde zorlanmaya sebep olmaktadır. Ayrıca bağlayıcının az olması, içerideki gaz oluşumundan dolayı bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri sırasında şekil kaybına ve çarpılmaya neden olmaktadır. Bağlayıcıların gereğinden fazla olması da TEK yöntemi için uygun değildir. Çünkü bağlayıcıların fazla olması sonraki prosesleri yavaşlatır ve besleme stoğunun sinterleme aşamasındaki hacimsel çekmesini arttırmaktadır. Bundan dolayı parçada büyük ölçüde küçülme gözlemlenir. Ayrıca fazla bağlayıcı, kalıplama sırasında tozdan ayrılabilir. Bunun sonucunda toz homojensizliği ve parçanın boyutsal kontrolünde sorunlar meydana gelmektedir. Bağlayıcı giderme işleminde çökmeler de oluşabilmektedir.

Toz ve bağlayıcı karışım oranları ile ilgili yukarıda belirtilen sorunların gerçekleşmemesi için bu oran optimum olmalıdır. Optimum durumda toz parçacıklarının temas halinde bulunmakta ve bağlayıcının içinde boşluk meydana gelmemektedir. Optimum oran kullanılan toz ve bağlayıcı sistemlerine göre farklılık göstermektedir [8, 81]. Toz ve bağlayıcı karışımlarındaki farklı durumlar Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Şekil 4.10 a'da fazla bağlayıcı oranı, Şekil 4.10 c'de fazla toz oranı durumu belirtilirken Şekil 4.10 b'de toz ve bağlayıcı karışımı için optimum oran verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.10 c'de bağlayıcıların tozlardan çok az oranda olması nedeniyle besleme stoğunda meydana gelen boşluk gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Farklı toz ve bağlayıcı karışımları a) Fazla bağlayıcı oranı, b) Optimum bağlayıcı oranı, c) Az bağlayıcı oranı [59]

4.3. Karıştırma ve Granülleme

Parça üretiminde kullanılacak toz ve bağlayıcı seçildikten sonra bu maddelerin homojen bir şekilde karıştırılması gerekmektedir. Karıştırma ve granülleme işlemi, kalıplama için besleme stoğunun hazırlanmasında ilk işlemdir. Besleme stoğunda meydana gelebilecek bir hata sonraki prosesler ile düzeltilemeyeceği için besleme stoğunun özellikleri önem taşımaktadır. Bundan dolayı besleme stoğunun yapısını ve bütünlüğünü oluşturan karıştırma işlemi önem arz etmektedir. Karıştırma işleminde amaç, toz parçacıklarını bağlayıcı ile kaplamak, topaklanmaları dağıtmak, besleme stoğunun her yerinde homojen bir dağılım sağlamaktır [82-84].

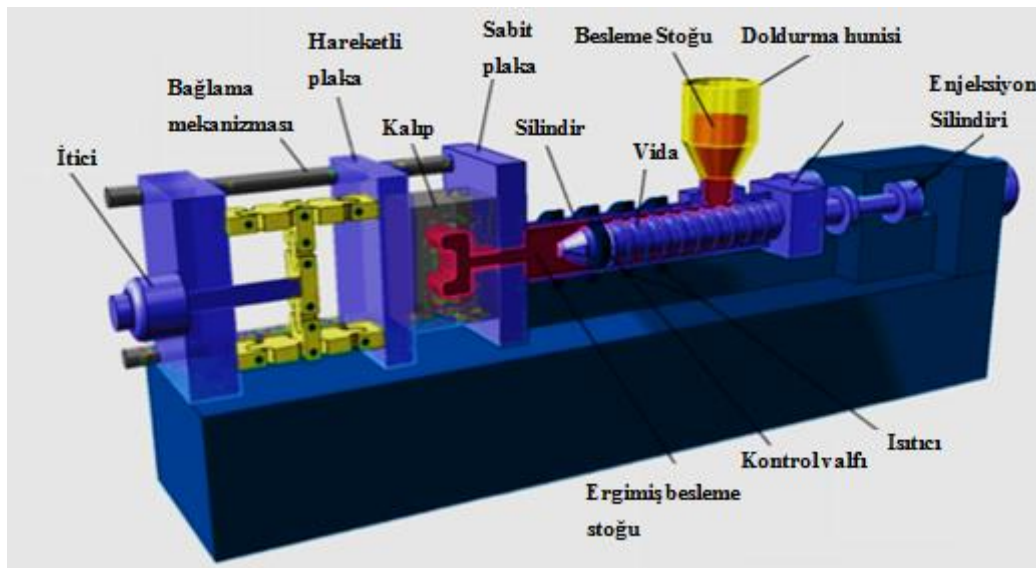
Karıştırma sırasındaki karışımın homojenliği, burulma torkunun kontrolü ile anlaşılmaktadır. Topaklanmış olan kısımlar parçalandıkça ve önceden durağan olan sıvı

karışım içine girdikçe burulma torku azalmaktadır. Homojen bir karışım, düşük burulma torkunda sabit olmaktadır. Karıştırıcı cihazlar kimyasal reaksiyonları engellemek amacıyla düzgün, sert ve kararlı yapıdaki malzemelerden yapılması gerekmektedir ve homojen bir karışma için genelde üç boyutlu karıştırıcılar tercih edilmektedir [14, 85].

Homojen olarak karıştırılmış besleme stoğu, bir taneleme makinesiyle (ekstrüder) granül hale getirilir. Granülleme işlemi kalıplama makinasını otomatik olarak doldurabilecek toz ve bağlayıcı kümelerinin kolayca taşınabilir olmasını sağlamaktadır. Ayrıca kalıplama işlemi için hurda malzeme tekrar kullanılabilir. Hurda malzeme, hatalı kalıplanmış parçalardan, dağıtıcı ve yolluklardan oluşur. Hurda malzemenin tekrar kullanımı TEK'te ekonomik bir avantaj sağlar [65].

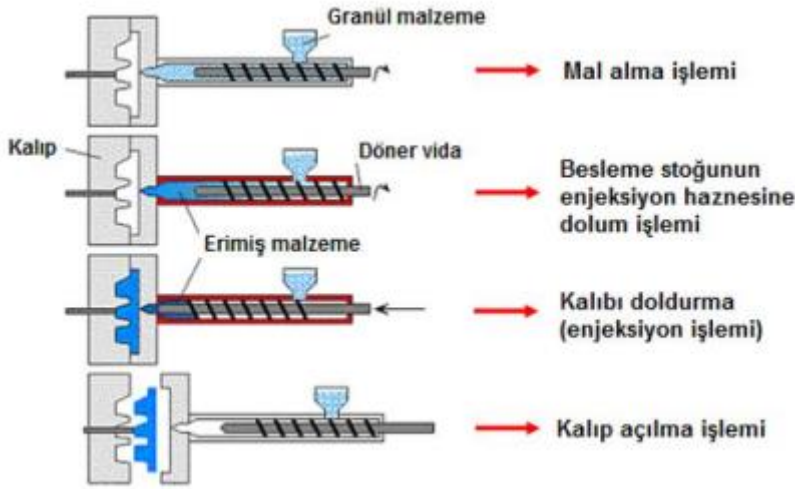
4.4. Kalıplama

Enjeksiyon kalıplama temel olarak besleme stoğunun yeterli bir sıcaklığa kadar ısıtılıp bağlayıcının ergimiş hale getirilmesine ve sonra besleme stoğunun kalıp boşluğunun içine doldurulmasıdır. Kalıplama işlemi sırasında dikkat edilmesi gereken asıl nokta, besleme stoğunun homojen bir şekilde dağılması, gözeneksiz (boşluksuz) ve hatasız parça elde edilmesidir. Bu nedenle besleme stoğu kalıbı sorunsuz dolduracak bir viskoziteye sahip olmalıdır [65]. Şekil 4.11'de bir enjeksiyon kalıplama makinesi ve kalıbın kesit görüntüsü verilmiş, her bir parça açıklanmıştır.



Şekil 4.11. Bir enjeksiyon kalıplama makinesinin kesiti [86]

TEK'te kalıplama işlemi, besleme stoğunun enjeksiyon makinesinin silindrinde ısınması ile başlar. Helisel olan bir vida besleme stoğunun doldurulmasını, sıkıştırılmasını ve homojenliğini sağlamaktadır. Vidanın silindir içerisindeki öne doğru ilerlemesi ile ergimiş besleme stoğunu kalıba enjekte eder. Daha sonra besleme stoğu, yolluk, dağıtıcı ve giriş kanallarından geçerek kalıp boşluğuna ulaşır. Kalıp boşluğunun besleme ergimiş besleme stoğundan daha düşük sıcaklıkta olması, kalıplama işleminde besleme stoğunun kalıp ile ısı transferi gerçekleşmesine yol açmaktadır. Isı transferi sonucunda besleme stoğu ısı kaybeder ve viskozitesi artar. Akış yolu boyunca artan direnci telafi etmek için ise kalıp boşluğu tamamen dolana kadar basınç sürekli artırılır. Kalıp tamamen dolduktan sonra ısı, besleme stoğundan kalıba aktarılır. Son olarak katılaşmış parçanın dışarı çıkarılması için kalıp açılır. Kalıplama sonrası elde edilen ham parçaların mukavemeti düşüktür. Bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemlerinden sonra parçaların mukavemeti iyileşir [8, 65]. Şekil 4.12'de tipik bir TEK işlemi gösterilmiştir.



Şekil 4.12. TEK işlemi [87]

Kalıplama parametreleri, toz karakteristiğine, bağlayıcı formülüne, besleme stoğunun viskozitesine, kalıp tasarımına ve enjeksiyon kalıplama makinesine göre farklılık göstermektedir. Genel olarak bir parçanın oluşması için gereken süre 5-60 saniye olmaktadır. Kalıp doldurma oranı yaklaşık $1,5 \text{ cm}^3/\text{s}$, basınç 60 MPa ve sıcaklık 200°C 'ye kadar olmaktadır [8].

Kalıplama esnasında hatalı dolum gerçekleştiği takdirde, besleme stoğu kalıp içerisine istenilen şekilde enjekte edilemeyecek ve bunun sonucunda sinterleme aşamasında parçada

çarpılmalar gözlenecektir. Uygun bir kalıplama işlemi gerçekleştirebilmek için toz ve bağlayıcı karışımının iyi bir homojenlik sağlanması amacıyla silindir, sürekli karıştırılmalıdır. Aksi takdirde ısı transferinin hızlı olmasından dolayı hızlı soğuma problemleri gerçekleşebilir. Kalıp boşluğu doldururken ise doldurma aşamasında püskürme olmaması için düşük enjeksiyon basıncı seçilmelidir. Püskürmeli bir dolum parça içerisinde hava boşlukları bırakabilir. Püskürme devam ediyorsa enjeksiyon hızı azaltılmalı ya da yolluk girişi büyütülmelidir. Dolum normalden yavaş gerçekleşiyorsa, sıcaklık ve enjeksiyon basıncı arttırılmalıdır [88-90].

4.5. Bağlayıcı Giderme

Bağlayıcı giderme işlemi, besleme stoğuna kalıplama ile istenilen şekil verildikten sonra tozları bir arada tutan bağlayıcının çıkarılmasıdır. Bağlayıcı giderme işleminin hedeflerinden birisi, bağlayıcının en kısa sürede parçadan uzaklaştırılmasıdır. Bu işlem, TEK'in en kritik aşamalarından biridir. Çünkü ayrıştırma sırasında istenilen miktarda bağlayıcının ayrıştırılmaması; Sinterleme sırasında bağlayıcının ani buharlaşması ve sonuçta parçanın çatlaması veya şişmesi, oluşan buharın fırın ve diğer ekipmanlara hasar vermesi, parçanın istenilen kimyasal, fiziksel ve mekaniksel özelliklere sahip olmaması, sinterleme sırasında parçadan ayrılan polimerlerin kirliliğe sebep olması gibi istenmeyen sonuçlara yol açabilir [91, 92]. Bağlayıcı giderme işleminde, parçadaki boşluk yapısı, bağlayıcıların kimyasal özellikleri, bağlayıcı uzaklaştırma koşulları ve işlem süresi parçanın son durumunu ve bağlayıcı uzaklaştırma hızını belirler. Bağlayıcılar genellikle termal, katalitik ve kimyasal olmak üzere üç farklı şekilde parça içerisinde çıkarılmaktadır [59, 72].

Termal bağlayıcı giderme işleminde bağlayıcı içerisindeki termo-plastik maddeler düşük sıcaklıktaki ön sinterleme fırınlarında ortamdan giderilir. Katalitik bağlayıcı giderme işleminde bağlayıcı poliformaldehid ve polietilen olmak üzere iki elemandan oluşmaktadır. Poliformaldehid nitrik asit ortamında 100-140 °C arasında formaldehite dönerek sistemden ayrılır. Oluşan formaldehit zehirlidir ve yanarak sistemden ayrılır. Kimyasal bağlayıcı giderme işlemi ise organik çözücü içerisinde düşük molekül ağırlıklı bağlayıcının yüksek çözünürlüğünden faydalanılır. Bu işlem üründe kanallar veya gözenekler oluşturur. Böylece parçayı termal bağlayıcı ayırma işlemine hazırlar. Termal bağlayıcı ayırma işlemi esnasında, gözenekler indirgenen bağlayıcının daha kolay bir şekilde yüzeye difüzyon olmasını sağlar. Bu nedenle termal bağlayıcı ayrıştırma süresi azalmış olur [8, 65, 93]. Lin ve German

çalışmalarında kimyasal bağlayıcı ayırma işlemi yapılmadığında parçada çatlama, bozulma ve kayma gözlemlenmiştir. Bu hataların bağlayıcının şişmesi ve yumuşamasından kaynaklandığını belirtmişlerdir [94].

Daha önceki çalışmalar kimyasal bağlayıcı ayırma işleminin dört aşamada olduğunu göstermektedir [94]. İlk olarak, çözücü molekülleri jel üreterek bağlayıcıya nüfuz eder. Bağlayıcı-çözücü etkileşimleri yeterince kuvvetli olduğunda jel çözücü içerisinde parçalanır. Daha sonra çözücü yüzeye doğru yayılır ve parçadan uzaklaşır [95]. Ayırıştırma için kullanılan en genel çözücüler, etil alkol, etilen klorür, triklor etilen, pentan gazı, metil klorür, aseton, etanol, hekzan ve heptandır [65].

4.6. Sinterleme

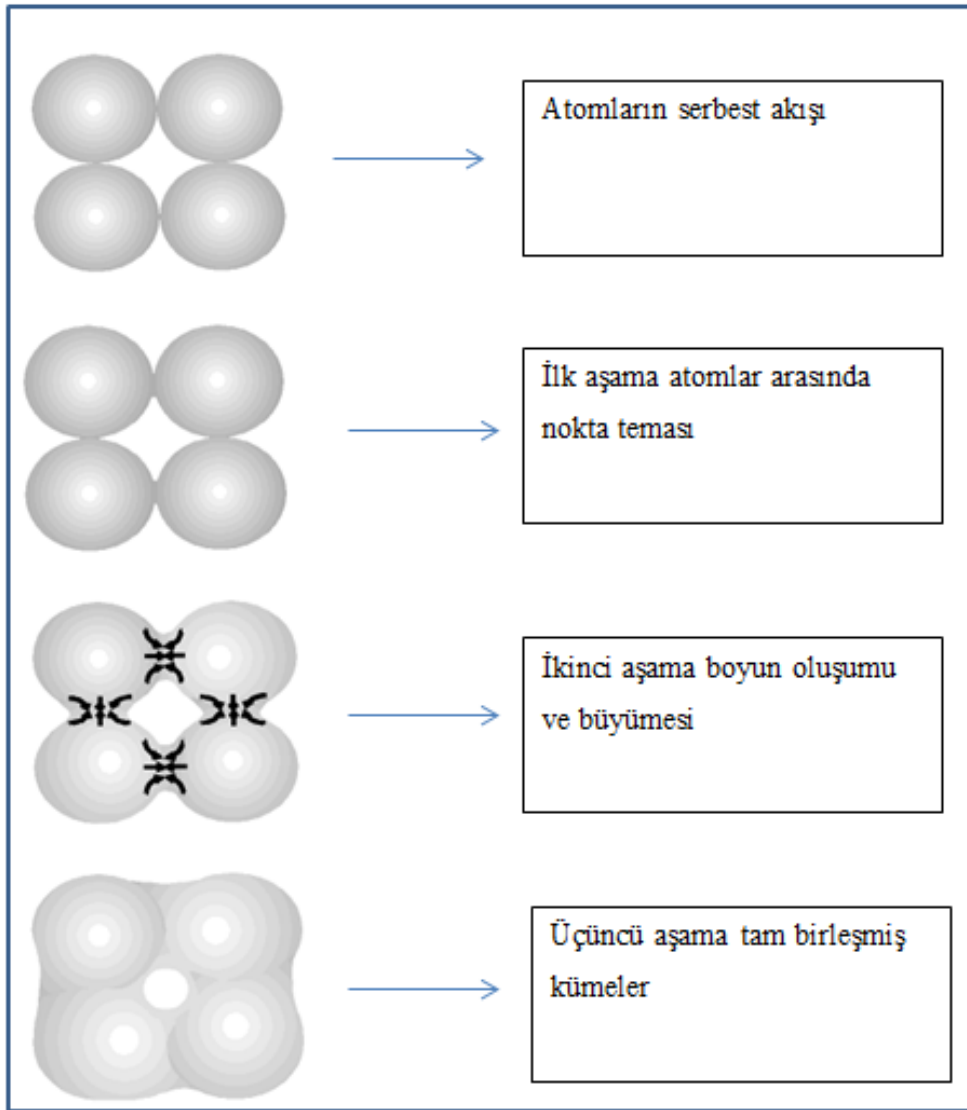
Sinterleme, birbirine temas eden parçacıkların yüksek sıcaklıklarda birbirine bağlanmasını, önemli ölçüde mukavemet artışını ve özelliklerin iyileşmesini sağlayan bir aşamadır. Bu aşamadan sonra ham mukavemetten 100 kat fazla bir mukavemet artışı gözlenir. Sinterleme süresinde bağlanma, ergime sıcaklığının altında katı halde atom hareketleri ile oluşabilmektedir. Fakat çoğu durumda sıvı faz oluşumu ile birlikte gerçekleşmektedir. Mikroyapı ölçeğinde bağlanma temas eden parçacıklar arasında boyunlaşma ile kendini gösterir. Ayrıca sinterleme işlemi yüksek sıcaklıkta atom yayılımı ve küçük parçacıkların yüzey enerjisinin azalmasıyla gerçekleşmektedir. Daha yüksek özgül yüzey alanına sahip olan küçük boyuttaki parçacıklar daha hızlı sinterlenir. Kristal yapıları katılarda hemen hemen bütün parçacık temas noktaları sınırlarını enerjisine sahip olan tane sınırı oluşturur. Böylece boyun büyümesi yüzey enerjisini azaltırken tane sınırı enerjisini artırır [14, 96].

Sinterleme mekanizmaları genellikle yüzey, tane sınırı veya kristal kafesinde oluşan yayılım işlemleridir. Sinterlemedeki geometrik değişimler atomların hareketini sağlayan ısıtmadan kaynaklanır. Yüksek sıcaklıklarda çok sayıda atom, komşuları ile bağlarını koparabilecek ve yeni yerlere gidebilecek düzeyde enerjiye sahiptir. Atomların hareket edebilmesi için gerekli olan en düşük enerjiye aktivasyon enerjisi denir.

Yüksek sıcaklıkta sıçrayan atomlar rastgele gezinirler. Bu rastgele gezinme sırasında atomlar bazen, parçacık birleşme yerlerine giderek yüzey alanını ve yüzey enerjisini azaltır.

Buna göre, sinterleme çok azının sinter bağıını artırdığı ve yüzey enerjisini azalttığı ve çok sayıda atom sıçramalarının toplamıdır [14].

Şekil 4.13'te sinterleme aşamalarının şematik gösterimi verilmiştir. Sinterleme aşamasında birbirini takip eden birkaç aşama mevcuttur. İlk aşamada yağlayıcılar giderilir. İkinci aşamada fırın atmosferi tozların yüzeyindeki oksitleri indirger. Üçüncü aşamada difüzyon ile tozlar arasında atomsal yayınma sonucu kaynaklaşma olur. Yüzey ve hacim difüzyonu sinterlemenin ana mekanizmalarıdır. Dördüncü aşamada serbest enerjiyi en aza indiren kuvvetin etkisi ile gözenekler küreselleşir ve küçük gözenekler kaybolur. Son aşamada ise yoğunlaşma meydana gelir. Sinterleme sonucu parçanın boyutlarında daralma meydana gelir [65].



Şekil 4.13. Sinterleme aşamalarının şematik gösterimi [97]

5. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan malzeme, takım, ekipmanlar ve yöntem açıklanmıştır.

5.1. Malzeme Özellikleri

5.1.1. Besleme stoğunun özellikleri

Deneysel çalışmalarda WC-%9Co besleme stoğu kullanılmıştır. Deneylerde belirtilen besleme stoğunun kullanılmasının nedeni mevcut olmasındandır. Resim 5.1’de kullanılan WC-%9Co besleme stoğunun granül şeklindeki hali gösterilmiştir. Çizelge 5.1’de WC-%9Co besleme stoğunun fiziksel özellikleri verilmiştir. Kullanılan besleme stokundaki WC tozunun karakteristiği ve kimyasal bileşimi Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3’te gösterilmiştir.



Resim 5.1 WC-%9Co besleme stoğu granülü

Çizelge 5.1. WC-%9Co besleme stoğunun fiziksel özellikleri [98]

Young Modülü (GPa)	70
Gerinim (mm/mm)	0,0008
Termal Genleşme Katsayısı ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	5,1

Çizelge 5.2. WC tozun karakteristiği

Besleme Stoğu Türü	Tedarikçi	Toz Şekli	Toz Boyutu (μm)		
			D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀
WC-%9Co	RYER	Karmaşık Şekli	0,15	0,28	0,52

Çizelge 5.3. WC tozun kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri [99, 100]

Elementler	C	Cr	Fe	Mo	Ni	W	Co	O
Kütlece (%)	5,54	0,01	0,01	0,01	0,01	85,4	8,94	0,05
Atom Yarıçapı (nm)	0,077	0,166	0,124	0,140	0,125	0,141	0,125	0,060
Young Modülü (GPa)	700							
Poisson Oranı (mm/mm)	0,31							
Yoğunluk (g/cm ³)	15,63							

5.1.2. İnsört malzemesinin özellikleri

Bu çalışmada insört malzemesi olarak Ck45 çeliği kullanılmıştır. Ø6x20 mm boyutlarındaki insörtün kimyasal bileşimi Çizelge 5.4’te verilmiştir. Ck45 çelik malzemeden talaşlı imalat yöntemiyle hazırlanmış insört Resim 5.2 a’da gösterilmiştir. Resim 5.2 b’de ise küresel mafsallı üretimine geçmeden önce ön deneylerde kullanılmak üzere Ck45 çeliğinden yapılmış insört gösterilmiştir. Sinterleme sonrası hareketli parçalarda elde edilen boşluk, enjeksiyon bölgesinin iç çapı ile insört dış çapı arasındaki farkın ölçülmesiyle tespit edilmiştir. Bu ölçümlerin gerçekleştirilebilmesi amacıyla, ön deneyler için hazırlanmış silindirik başlıklı insörtler kullanılmıştır.

Çizelge 5.4. Ck45 çeliğinden imal edilen insörtün özellikleri [99, 101]

Elementler	C	Si	P	S	Mn	Ni	Mo	Fe
Kütlece (%)	0,42-0,50	≤ 0,40	≤ 0,03	≤ 0,035	0,50-0,80	≤ 0,40	≤ 0,10	Kalan
Atom Yarıçapı (nm)	0,077	0,117	0,100	0,088	0,140	0,125	0,140	0,124
Genleşme Katsayısı ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	11,7							
Young Modülü (GPa)	217							
Dayanım Değeri (MPa)	750							
Poisson Oranı (mm/mm)	0,29							
Yoğunluk (g/cm^3)	7,87							



(a)



(b)

Resim 5.2. a) Küresel başlıklı insört, b) Ön deneyler için hazırlanmış insört

5.1.3. Arayüzey malzemelerinin özellikleri

Hareketli montajlı parçada bileşenler arasındaki hareket, arayüzey kullanımı ile sağlanmıştır. Çalışmada 15 farklı arayüzey malzemesi denenmiştir.

Akrilik Boya

Akrilik boyalar, temel olarak dört bileşen oluşturmaktadır. Bunlar; bağlayıcı, çözücü, pigmentler ve diğer katkı maddeleridir. Bağlayıcının cinsi ve miktarı boyanın silinebilirlik,

sertlik, yapışma, renk dayanıklılığı gibi özelliklerini belirlemektedir. Çözücü, boyanın viskozitesini ayarlamak için kullanılmaktadır. Çözücüler, uçucu olup film tabakasının oluşumuna katkıda bulunmayıp, yüzey yayılımını gerçekleştirmektedir. Pigmentler ise boyaya renk ve örtücülük özelliği vermektedir. Boyalar bağlayıcının cinsine bağlı olarak su bazlı ve solvent bazlı olarak ikiye ayrılmaktadır [102].

Çalışmada kullanılan boya türü çevreye olan etkisine göre su bazlı ve reçinesine göre akrilik esastır. Montajlı parça üretiminde bu arayüzün kullanılma nedeni ise daldırma yöntemiyle istenilen kalınlıkta pratik bir şekilde kaplanmasıdır. Ayrıca boyanın kaybolma sıcaklığının 600 °C civarında olması da bu arayüzün tercih edilmesi için önemlidir.

Poliolefin Daralan Makaron

Isıyla daralan makaron, kabloların yalıtımı için kullanılan, bükümlü ve katı telli iletkenler, bağlantılar, bağlantılar ve elektrik işlerinde terminaller için aşınma direnci ve çevresel koruma sağlayan büzülebilir plastik bir tüptür. Isıyla daralan makaron, ısıtıldığında radyal olarak çapının yarısı ile altıda biri arasında küçülen, naylon veya poliolefinden yapılmaktadır. Daralan makaronlar, elastomer, florlanmış etilenpropilen, PVC, silikon kauçuk, viton, polivinilden florür ve PFTE esaslı olabilmektedir. Yaygın olarak poliolefin esaslı tüpler kullanılmaktadır [103]. Poliolefin esaslı makaronlar, -55 ila 135 °C arasında kullanım sıcaklıklarına sahiptir ve askeri, havacılık ve demiryolu endüstrileri tarafından kullanılmaktadır. Esnek ve hızlı büzülme özelliğindedirler. Poliolefin tüpler, 143 °C'de küçülmeye başlamaktadır [104]. Poliolefin ısıyla daralan makaronlar, genellikle 2:1 oranında küçülmektedir [104, 105].

Çalışmada kullanılan daralan makaron poliolefin esastır. 143 °C'de sıcaklık etkisi ile daralması ve sıcaklığın yükselmesiyle eriyerek ortamdan giderilmesi bu arayüzeyin seçilmesinde en önemli etkidir.

Epoksi Reçine

Epoksi reçineler, normal olarak en az iki epoksit grubu içeren düşük moleküler ağırlıklı pre-polimerler veya daha yüksek molekül ağırlıklı polimerlerdir. Endüstriyel olarak çok çeşitli epoksi reçineler üretilmektedir.

Epoksi esaslı malzemeler için pek çok uygulama alanı vardır. Bu malzeme özellikle kaplamalarda, yapıştırıcılarda ve karbon fiber, cam elyaf takviyelerinde kullanan kompozitlerde yararlanılmaktadır. Epoksiler mükemmel yapışma, kimyasal, ısı direnç, mekanik özellikler ve elektriksel yalıtım özelliklerine sahiptir. Ayrıca elektronik uygulamalar için yüksek ısı yalıtımı veya yüksek elektrik direnci göstermektedir [106].

Epoksi reçine, metal yüzeyler mükemmel sertliğe sahip sert ve koruyucu bir kaplama sağlamaktadır. Bazı epoksi kaplamalar solventsiz olarak temizlenebilmektedir [107]. Epoksi kaplamalar endüstriyel ve otomotiv uygulamalarında sıklıkla kullanılırlar, çünkü lateks bazlı ve alkid bazlı boyalardan daha fazla ısıya dayanıklıdırlar [108].

Epoksi reçinenin metal yüzeylerde kolay kaplanabilir olması, endüstriyel uygulamalarda kaplama malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılması ve ortamdan kolay giderilmesi sebebiyle çalışmada bu arayüzey kullanılmıştır.

Etil Selüloz Çözeltisi

Etil selüloz, tekrarlayan glikoz birimleri üzerindeki bazı hidroksil gruplarının etil eter gruplarına dönüştürüldüğü bir selüloz türevidir. Temel olarak kâğıt, vitamin ve tıbbi hapları kaplamak için ince film kaplama malzemesi olarak, kozmetikte ve endüstriyel proseslerde kalınlaştırıcılar için kullanılmaktadır [109].

Etil selüloz, çalışmada kullanılan arayüzeylerden biridir. Bunun sebebi, etil selüloz çözeltisinin kolay kaplanabilir olması, yaygın kullanılan bir kaplama malzemesi olması ve ortamdan sıcaklık ile kolay uzaklaştırılabilmesidir.

Nişasta Çözeltisi

Nişasta, glikozidik bağlarla birleştirilen çok sayıda glikoz ünitesinden oluşan polimerik bir karbonhidrattır [110]. Nişasta, kitap ciltlemede, duvar kağıdı yapıştırıcılarında, yapışkan kağıtlarda, zarf yapıştırıcılarında ve şişe etiketlemelerinde yapıştırıcı olarak kullanılmaktadır [111].

Bu çalışmada nişasta çözeltisi bir arayüzey malzemesi olarak kullanılmıştır. Daldırma yöntemiyle kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede arayüzeyin kolay ve homojen kaplanması hedeflenmiştir.

Parafin+Alümina Tozu

Parafin mumu, bir hidrokarbon molekülü karışımından oluşmaktadır. Petrol, kömür veya yağ şistlerinden elde edilen beyaz veya renksiz yumuşak bir katıdır. Oda sıcaklığında katı haldedir ve yaklaşık 37 °C üzerinde erimeye başlamaktadır. Parafin, çeşitli sanayi dallarında kimyevi ve elektrik yalıtım maddesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca tekstilde, eczacılıkta, kozmetik sanayisinde ve mum imalatında da önemli bir malzemedir [112].

Parafinin kolay kaplanılabilmekte olup aynı zamanda sıcaklık ile ortamdan eriyerek uzaklaşabilmektedir. Bu sebeple parafin arayüzey malzemesi olarak kullanılmıştır. Ancak 37 °C gibi çok düşük bir erime sıcaklığı olduğundan parafin çözeltisine alümina tozu da eklenmiştir. Alüminanın yüksek erime noktası (2.072 °C), karışımın ergime noktasının daha yüksek olmasını ve sinterleme sıcaklığında ortamdan giderilmesini engellemiştir.

Poliamid

Poliamid, amid bağları ile birbirine bağlanan tekrar birimlerine sahip bir makromoleküldür. Yüksek mukavemet ve dayanıklılıklarından dolayı tekstil, otomotiv, halı ve spor giyiminde yaygın olarak kullanılmaktadır [113].

Çalışmada poliamid arayüzey kullanılmasının başlıca nedeni malzemenin yüksek çalışma sıcaklığına sahip olmasıdır. Böylece arayüzeyin sinterleme sıcaklığına kadar deforme olmadan dayanabileceği düşünülmüştür. Poliamid malzeme şeritler halinde kaplanmıştır. Çalışmada kullanılan şerit poliamid malzemenin üretici firmadan temin edilen özelliklere göre malzemenin çekme dayanımı 140 MPa ve sıcaklık dayanımı ise 260 °C'dir.

Polietilen glikol çözeltisi

Polietilen glikol (PEG), endüstriyel imalattan ilaca kadar birçok uygulama alanı olan bir polieter bileşiğidir. PEG genellikle biyolojik olarak güvenli kabul edilmektedir. Bu özellik

arayüzeyin ortamdan giderilmesinde önemlidir. PEG arayüzey ortamdan kimyasal reaksiyon göstermeden ayrılabilir [114]. Bu özellik çalışmada PEG arayüzeyin seçiminde önemli bir parametre olmaktadır.

Poliüretan

Poliüretan, karbamat (üretan) bağları ile birleştirilen, organik birimlerden oluşan bir polimerdir. Çoğu poliüretan ısındığında erimeyen termoset polimerler iken, termoplastik poliüretanlar da mevcuttur. Poliüretanlar, köpük yalıtım panellerinde, mikroselüler köpük contalarda, dayanıklı elastomerik lastiklerde (roller coaster, yürüyen merdiven, alışveriş sepeti, asansör ve kaykay tekerlekleri gibi), otomotiv süspansiyon burçları üretiminde kullanılmaktadır [115].

Poliüretan yüzey kaplama işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Daldırma yöntemi ile her geometri kaplanmaktadır. Polimerin erime sıcaklığı yaklaşık 225 °C olmaktadır [116]. Polimerin belirtilen bu özellikleri çalışmada arayüzey olarak seçilmesine neden olmuştur.

Polivinil alkol çözeltisi

Polivinil alkol suda çözüneabilen sentetik polimerdir. Beyaz (renksiz) ve kokusuzdur. Kağıt yapımında, tekstilde ve çeşitli kaplamalarda kullanılmaktadır [117]. Polivinil alkol çözeltisinin kolay hazırlanabilmesi, kaplanabilmesi ve ortamdan kolay giderilebilmesi nedeniyle çalışmada arayüzey olarak kullanılmıştır.

Polivinil klorür

Polivinil klorür, monomer haldeki vinil kloridin polimerizasyonu ile üretilmektedir. Geniş kullanım alanı olan bir plastik polimerdir. Polietilen ve polipropilenden sonra dünyada en çok üretilen üçüncü sentetik plastik polimerdir [118].

Polimerin yüksek erime sıcaklığı (212 °C), kimyasallara karşı dirençli olması, kaplama malzemesi olarak yaygın kullanılması, yüksek sertlik ve mekanik özelliklere sahip olmasından dolayı [119] çalışmada arayüzey olarak tercih edilmiştir.

Polimetilsiloksan+silica+ asetoksilan

Polimetilsiloksan, silica, asetoksilan polimerlerini içeren sıvı conta çalışmada arayüzey malzemesi olarak kullanılmıştır. Sıvı contanın çalışma sıcaklığının 300 °C'ye kadar olması nedeniyle tercih edilmiştir.

Teflon bant

Teflon, florlanmış etilen polimeri olan bir politetrafloroetilendir. Teflon, ısıya, kimyasal maddelere, neme, elektrik atlamasına (dielektrik), sürtünmeye karşı dayanıklıdır. Teflon 260 °C üzerindeki sıcaklıklarda bozulmaya başlamaktadır. Ultraviyole ışınlarına, ozon, nem, sıcaklık, tuz ve benzeri maddelere dayanıklıdır. Metal, plastik, ağaç, seramik gibi maddeleri kaplamak için uygundur [120].

En çok kullanıldığı yerler yüksek ısıya dayanıklı conta, keçe, bant, vana seti, taşıyıcı bantlar, merdaneler, kimyasal maddelere dayanıklı borular, laboratuvar cihazları, diyafram, elektrik gerilimlerine dayanıklı kablo yalıtkanlardır [121].

Teflonun sıcaklığa ve kimyasallara karşı dayanıklı olması ve ortamdan kolay giderilmesi nedeniyle çalışmada arayüzey olarak kullanılmıştır.

Sıvı plastik

Sıvı plastik kaplama malzemesi, sentetik kauçuk bir yapay elastomerdir. Bu malzemeler ağırlıklı olarak petrol yan ürünlerinden sentezlenen polimerlerdir [122]. Sıvı plastik kaplama malzemesinin kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 5.5'te belirtilmiştir.

Çizelge 5.5. Sıvı plastik kaplamasının fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal içerik	Petrolyum	Hekzan	Ksilen	Metil Etil Keton	Etilbenzen
Kütlece (%)	33,5-33,6	14,5-15,1	12,5-13	7,5-8,3	3-3,2
Özellik	Değer		Standart		
Çekme	3740 psi		ASTM D-638		
Uzama	%430		ASTM D-638		
Kesme ve Aşınma Dayanımı	Çok iyi		ASTM D-1044		
Sıcaklık Aralığı	-30 – 200 F°		-		
Kaybolma Sıcaklığı	500°C		-		
Viskozite	80-100 K.U.		-		
Yalıtkanlık	1400 v/mil		ASTM D-149		

Krom arayüzey

Krom arayüzey, sıvı plastik arayüzeyden farklı olarak sinterleme aşamasında difüzyonu engelleyici bir tabaka olarak işlev görmektedir. Difüzyonun gerçekleşebilmesi için Hume–Rothery kurallarının sağlanması gerekmektedir [123]. Bu kurallar:

- Metal atomlarının yarıçapları farkı %15’ten büyük olmamalıdır.
- Aynı kristal kafes yapısına sahip olmalıdır.
- Atomlar aynı valans elektron sayısına sahip olmalıdır. Farklı valansa sahip olanlar bileşik oluşturabilir.
- Metal atomları aynı elektronegativiteye sahip olmalıdır.

Difüzyon, yer alan ve arayer difüzyon mekanizmaları olmak üzere iki farklı şekilde meydana gelebilmektedir. Yeralan difüzyon mekanizmasında difüzyon atomları için çap farkı %15’i geçmemelidir [124]. Arayer difüzyon mekanizmasında ise küçük çaplı atomlar, büyük çaplı atomların arasına difüzyon olmaktadır.

Mafsal hareketi krom difüzyonunun gerçeklememesi ile sağlanmıştır. Kromun difüzyon karakteristiği Çizelge 5.6’da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Kromun difüzyon karakteristiği [125-127]

Erime sıcaklığı (°C)	Tungsten içerisinde		Demir içerisinde		Kobalt içerisinde	
	Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)	Difüzyon katsayısı (cm ² /s)	Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)	Difüzyon katsayısı (cm ² /s)	Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)	Difüzyon katsayısı (cm ² /s)
1907	547	10 ⁻¹⁰	291,8	10,8	70	7,3x10 ⁻³
Atom yarıçapı (nm)	0,166					

5.2. Yöntem ve Deney Tasarımı

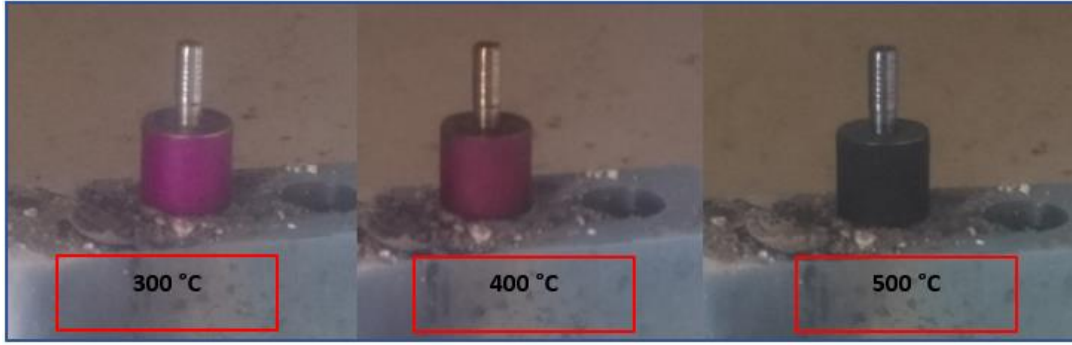
Montajlı parça imalatı farklı arayüzeyler kullanılarak araştırılmıştır. Hareketli, montajlı parçanın üretiminde arayüzeylerin sinterleme sıcaklığına kadar ortamdan giderilmemesi gerekmektedir. Bu sebeple öncelikle arayüzey malzemelerinin kaybolma sıcaklıklarının tespit edilmesi gerekmektedir.

Arayüzeylerin kaybolma sıcaklıkları, Protherm marka PLF 110/30 ısıtma işlem fırınında belirlenmiştir. Resim 5.3'te kullanılan ısıtma işlem fırınında örnek bir kaybolma sıcaklığı tespiti deneyi gösterilmektedir. Isıtma işlem fırınının teknik özellikleri ise Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Protherm PLF 110/30 ısıtma işlem fırını özellikleri

Özellikler	Değerler
Model PLF	110/30
En Büyük Sıcaklık (°C)	1100
En Büyük Sıcaklığa Çıkış Zamanı (dk)	45
Hacim (L)	28
İç Ölçüleri (cm)	25x28x35
Dış Ölçüleri (cm)	79x55x70
Güç (kW)	4
Sıcaklık Sapması (°C)	±2
Faz adedi	1

Resim 5.3'te örnek olarak sıvı plastik arayüzeyin kaybolma sıcaklığı tayini verilmiştir. Sıvı plastik arayüzeye sahip insörtlerin 300 °C, 400 °C ve 500 °C'deki erime davranışları incelenmiştir. Yapılan ön deneylerde malzemenin 500 °C'ye kadar olan sıcaklıklara kadar ortamdan kaybolmadığı gözlemlenmiştir. 500 °C'den sonra ise arayüzey insört üzerinde eriyerek ortamdan uzaklaşmıştır.



Resim 5.3. Sıvı plastik malzemenin kaybolma sıcaklığı tayini

Daha sonra insörtlerin Resim 5.2’de gösterilen şekilde hazırlanmasından sonra, insörtler kaplanarak arayüzey oluşturulmuştur. Akrilik boya, epoksi reçine, etil selüloz, nişasta, parafin+alümina, polietilen glikol, poliüretan, polivinil alkol, polimetilsiloksan+silica+asetoksilan (sıvı conta), sıvı plastik daldırma yöntemiyle, poliolefin daralan makaron, poliamid, polivinil klorür, teflon şerit halinde bantlama ile krom ise elektroliz yöntemiyle kaplanmıştır.

Farklı bekleme süreleri sonucunda farklı kaplama kalınlıkları elde edilmiştir. Sıvı plastik arayüzey daldırma yöntemi ile oluşturulurken aşağıdaki basamaklara dikkat edilmiştir:

- Önerilen inceltme ile seyreltilmiştir (%25'e kadar).
- Her kullanımdan önce hafifçe karıştırılmıştır.
- Her 5 saniyede bir inçlik bir yüzey kaplanmıştır.
- İstenilen kalınlığa ilave kat uygulamadan önce 30-40 dk beklenmiştir.

Sıvı plastik arayüzeye sahip insört Resim 5.4 a’da gösterilmiştir. Resim 5.4 b’de ise ön deneylerde kullanılmak üzere fazlalıklar temizlenerek hazırlanmış sıvı plastik arayüzeyli insört gösterilmiştir.



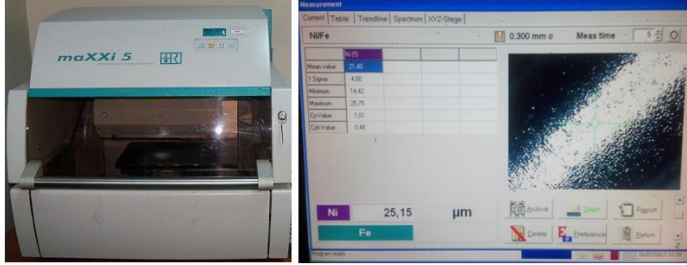
(a)



(b)

Resim 5.4. a) Sıvı plastik arayüzeye sahip küresel başlıklı insört, b) Sıvı plastik arayüzeye sahip ön deneyler için çapakları temizlenmiş insört

Sert kromlama işlemi kullanılarak “Ce-Ka Sert Krom Kaplama” firmasından hizmet alımı ile krom arayüzey oluşturulmuştur. Kaplama kalınlıkları, X-ray ölçüm cihazında ölçülmüştür (Resim 5.5).



Resim 5.5. Kaplama kalınlığı ölçüm cihazı

Arayüzeyler insört üzerine kaplandıktan sonra parçalar TEK yöntemi ile üretilmeye hazır hale gelmiştir. TEK yöntemiyle hareketli arayüzeye sahip montajlı parça üretiminde önem taşıyan parametreler şunlardır:

- Arayüzeyin cinsi,
- Arayüzey kalınlığı,
- Sinterleme sıcaklığı.

TEK işlemi öncesinde yapılan deney tasarımında bu parametreler dikkate alınmıştır. Arayüzey cinsi parça üretilebilirliğini etkileyen en önemli parametredir. Montajlı parçada arzu edilen hareketin sağlanması için ise bileşenler arasında yeterli miktarda boşluk olmalıdır. Kaplama kalınlığının boşluğa etkisini incelemek amacıyla deney tasarımına bu parametre eklenmiştir. Böylece kaplama kalınlığının montajlı parça bileşenleri arasındaki boşluğa etkisi incelenmiş olacaktır.

Bileşenler arası boşluğa etki eden bir diğer parametre de sinterleme sıcaklığıdır. WC-%9Co malzemesi için, sinterleme sıcaklığı 1100, 1200, 1300 ve 1400 °C olarak belirlenmiştir.

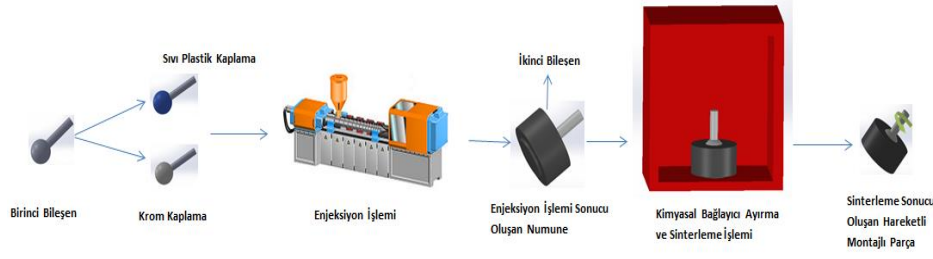
Sonuç olarak belirlenen bu parametrelere göre Çizelge 5.8’de gösterilen deney tasarımı oluşturulmuştur. Bu deney tasarımı ile hareketli arayüzeye sahip montajlı parçanın bileşenler arası optimum düzeyde boşluk miktarı ile üretilebilirliği araştırılmıştır.

Çizelge 5.8. Deney tasarımı

Arayüzey cinsi	Sinterleme sıcaklığı (°C)	Kaplama kalınlığı (µm)
Akrilik boya Epoksi reçine Etil selüloz Nişasta Parafin+alümina Polietilen glikol Poliüretan Polivinil alkol Polimetilsiloksan+silica+ asetoksilan (sıvı conta), Poliölefin daralan makaron Poliamid Polivinil klorür Teflon Sıvı plastik Krom	1100	20
		50
		100
		150
	1200	20
		50
		100
		150
	1300	20
		50
		100
		150
	1400	20
		50
		100
		150

Şekil 5.1’de, hareketli arayüzeye sahip montajlı parçanın imal edilebilmesi için kullanılacak tekniğin şematik gösterimi bulunmaktadır. Parça imalatında kullanılan bu yöntem kısaca özetlenecek olursa;

- Birinci bileşen (insört) torna tezgahında belirlenen ölçülerde yapılmıştır.
- Yapılan insört üzerine arayüzey oluşturulmuştur.
- Arayüzeye sahip insört kalıp boşluğuna yerleştirildikten sonra enjeksiyon kalıplama işlemi gerçekleştirilmiştir. TEK işlemi sonucu insört üzerine ikinci bileşen (enjekte bölge) oluşturulmuştur.
- Enjeksiyon kalıplama işlemi sonucu oluşan numuneye sırasıyla bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri uygulanmıştır.
- Sinterleme sonucunda hareketli arayüzeye sahip kendiliğinden montajlı parça elde edilmiştir.



Şekil 5.1. Hareketli yüzeye sahip ve montajlı parçanın üretim yöntemi

5.3. Enjeksiyon Kalıplama İşlemi

5.3.1. Enjeksiyon kalıbı ve analizleri

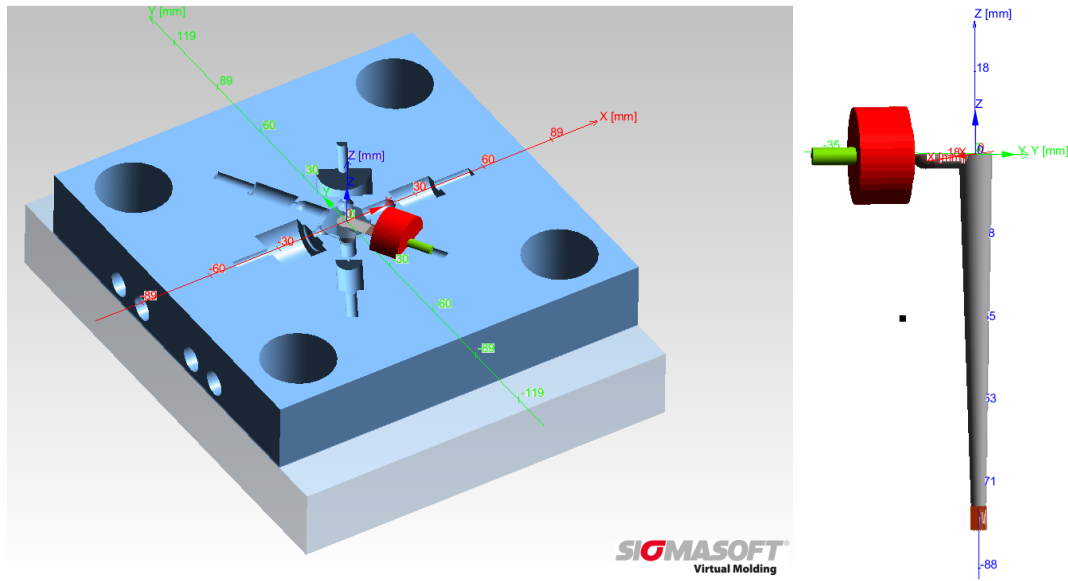
CNC tezgahında işlenerek oluşturulan enjeksiyon kalıbı Resim 5.6’da gösterilmiştir.



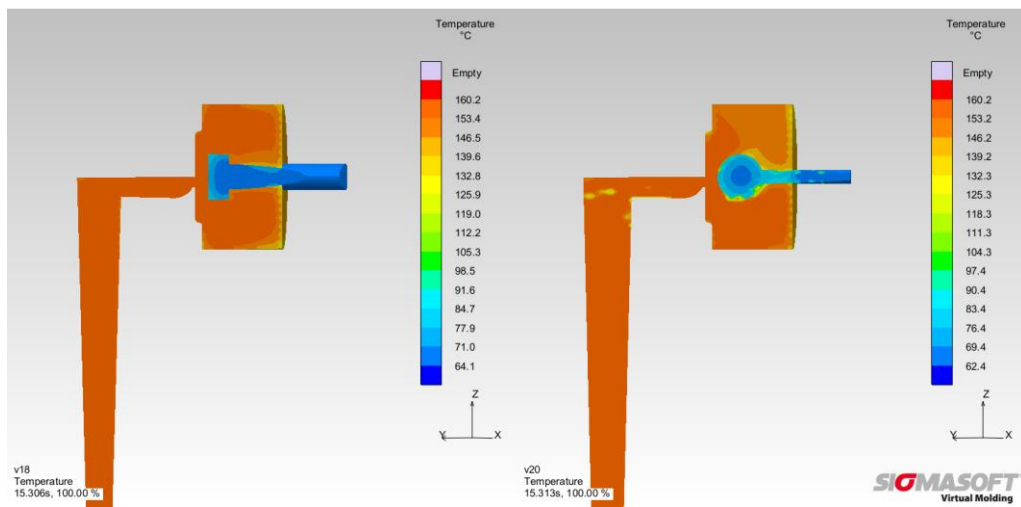
Resim 5.6. Numunelerin üretildiği toz enjeksiyon kalıbı

Belirtilen kalıpta enjeksiyon kalıplama işlemi öncesinde dolumun hatasız gerçekleştiğini belirlemek için kalıp analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece deneysel çalışmalar öncesinde yapılan analizler ile enjeksiyonda olabilecek hatalar gözlemlenebilmiştir. Dolum analizleri SİGMASOFT yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Bu program TEK analizleri ile ilgili en kapsamlı programdır ve İTEK analiz paket programını da içermektedir. İlk aşamada Şekil 5.2’de gösterilen şekilde programa kalıp, yolluk, enjekte bölge ve insörtler programda tanımlanmıştır. Daha sonra besleme stoğu, insört malzemeleri ve proses parametreleri programa girilerek analizler başlatılmıştır. Analizler sonucunda, silindir ve küresel insörtler ile gerçekleştirilen enjeksiyon işlemlerinde kalıp dolumu sorunsuz bir şekilde (%100 dolum oranı ile) gerçekleşmiştir (Şekil 5.3). Kalıplama işlemindeki sıcaklık dağılımları Şekil 5.3’te görülmektedir. Enjekte bölge maksimum 160,2 °C sıcaklığa ulaşmıştır. Silindir insörtlerin

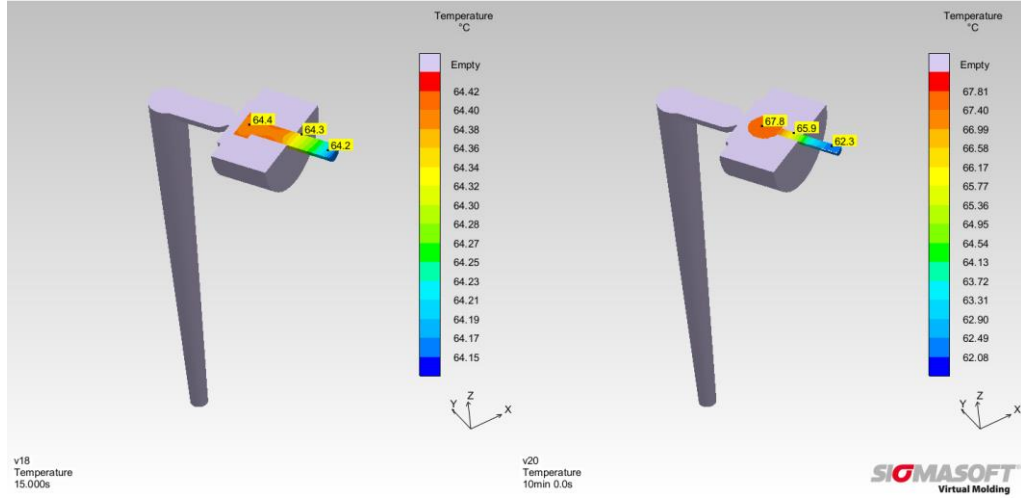
sıcaklığı enjeksiyon işleminde maksimum 64,4 °C'ye ulaşırken bu değer küresel insörtlerde 67,8 °C olmuştur (Şekil 5.4). Şekil 5.5'te kalıplama işleminde oluşan basınçlar verilmiştir. Bu analize göre kalıplama, silindir insörtler ile yapıldığında, kalıp dolumu için 152,8 bar gerekmektedir. Bu değer küresel insörtler için 96,94 bar olmuştur. Elde edilen basınç değerleri İTEK için idealdir. Şekil 5.6'da enjeksiyonda oluşan kaynak hatlarının oluşmadığı görülmektedir. Ayrıca analizler enjeksiyon işleminde kalıp içerisinde sıkışan havanın olmadığı da görülmüştür (Şekil 5.7).



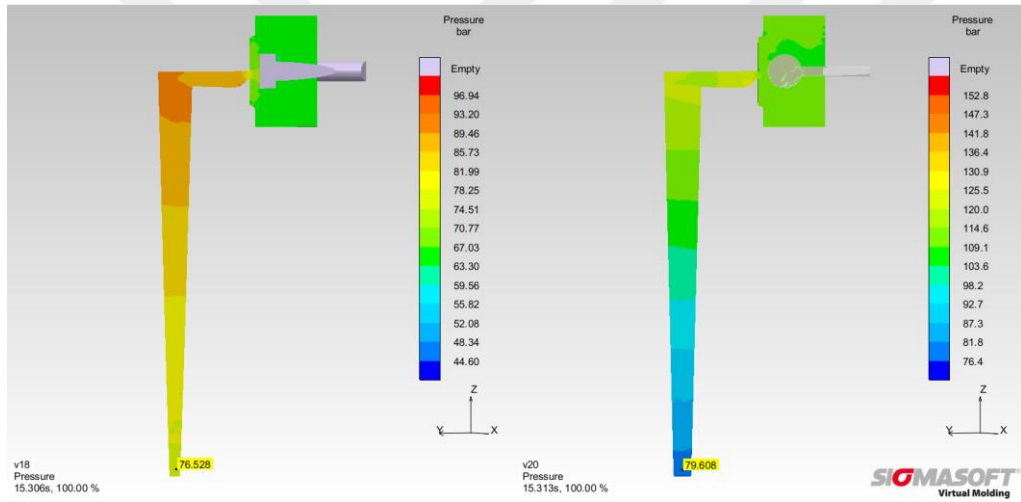
Şekil 5.2. Kalıp, yolluk, enjekte bölge ve insörtlerin programda tanımlanması



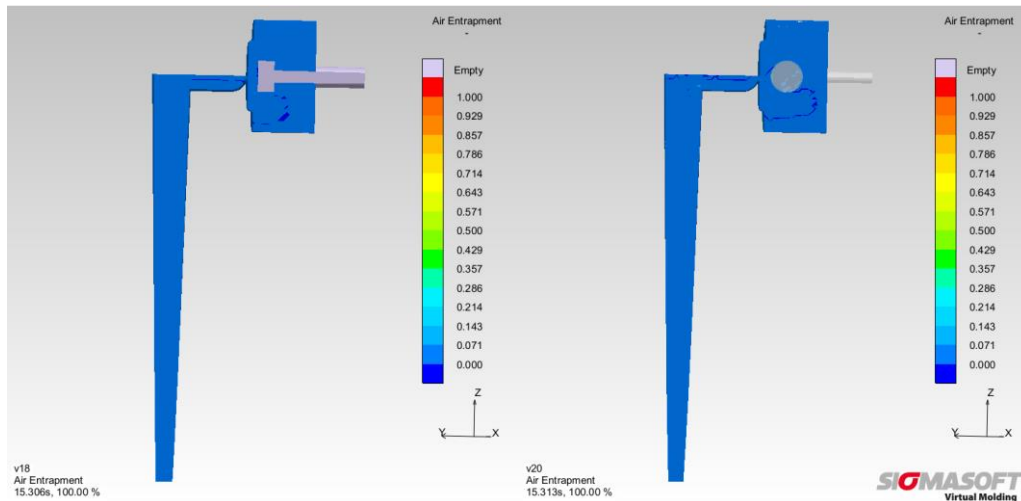
Şekil 5.3. Kalıp dolumu ve enjeksiyon işleminde sıcaklık dağılımı



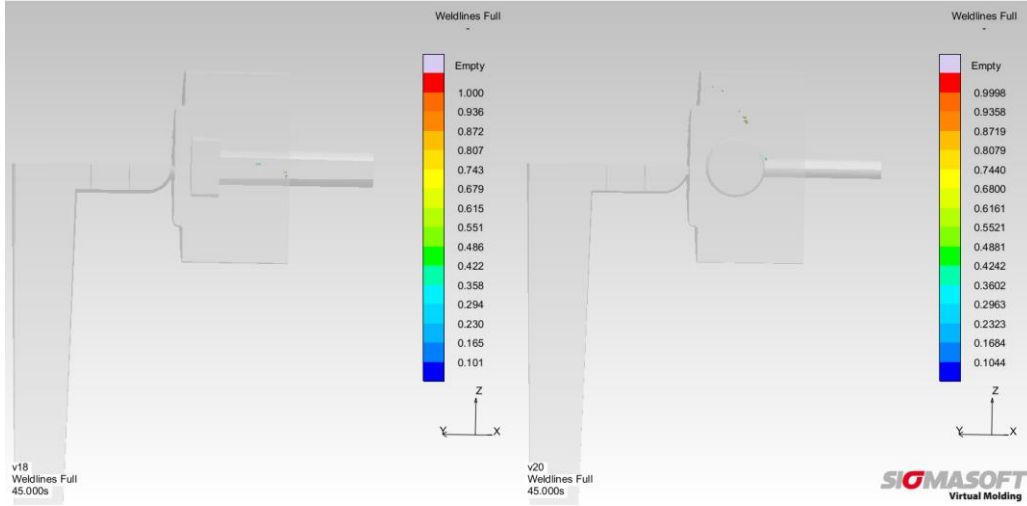
Şekil 5.4. Enjeksiyon işleminde insört bölgesinin sıcaklık dağılımı



Şekil 5.5. Kalıp dolumu için gerekli olan basınç değerleri



Şekil 5.6. Kalıp içerisinde sıkışan hava



Şekil 5.7. Enjeksiyon işleminde oluşan kaynak hatları

5.3.2. Enjeksiyon işlemi

Enjeksiyon kalıplama işlemi, Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Toz Metalurjisi laboratuvarında Resim 5.7’de verilen ARBURG Allrounder 220S marka enjeksiyon kalıplama makinasıyla Çizelge 5.9’da verilen enjeksiyon parametreleri ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan toz enjeksiyon tezgahının teknik özellikleri Çizelge 5.10’da verilmiştir. Resim 5.8’de ise belirtilen enjeksiyon parametrelerinde enjeksiyon kalıplama yapılması sırasında enjeksiyon makinesi panelinden elde edilen grafik ekranı gösterilmektedir.



Resim 5.7. ARBURG Allrounder 220S toz enjeksiyon kalıplama makinası

Çizelge 5.9. TEK Parametreleri

Enjeksiyon hızı (rpm)	50
Enjeksiyon basıncı (bar)	1000
Enjeksiyon süresi (s)	3
Ütüleme basıncı (bar)	50
Enjeksiyon Sıcaklığı (°C)	200
Kalıp sıcaklığı (°C)	45
Soğuma süresi (s)	5

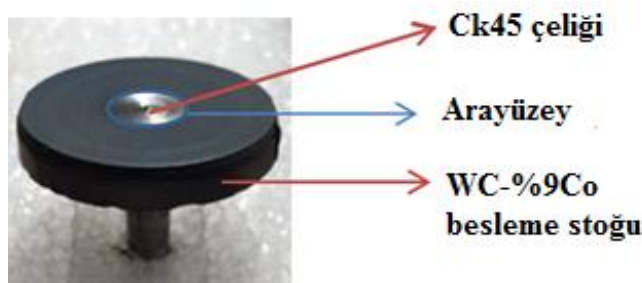


Resim 5.8. Arburg 220S enjeksiyon makinesi grafik ekran

Çizelge 5.10. Arburg Allrounder 220S enjeksiyon makinesinin teknik özellikleri

Özellik	Değer
Hidrolik yağ (l)	120
Makine net ağırlığı (kg)	1900
Mengene kilitleme kuvveti (kN)	250
Mengene kapama kuvveti (kN)	20
Mengene açılma kuvveti (kN)	14
Maksimum mengene açılma mesafesi (mm)	275
Minimum mengene kapanma mesafesi (mm)	150
Mengene ebatları (mm)	400x400
Kolon genişlikleri (mm)	221x211
Hareketli mengene taşıma kapasitesi (kg)	300
Hidrolik pompa motoru (kW)	5,5
Vida uzunluğu (mm)	24,5
Vida çapı (mm)	18
Maksimum enjeksiyon basıncı (bar)	2500
Maksimum vida kursu (mm)	80
Maksimum baskı hacmi (cm ³)	20
Maksimum enjeksiyon ağırlığı (g/PS)	17
Maksimum vida torku (Nm)	147
Vida dairesel hızı (m/d)	27
Besleme hunisi kapasitesi (l)	25

Sıvı plastik ve krom kaplı arayüzeye sahip insörtler İTEK prosesi ile kalıplanmıştır. Resim 5.6'da belirtilen kalıp ve kalıp boşluğunda, Resim 5.7'de gösterilen ARBURG Allrounder 220S marka enjeksiyon kalıplama makinasında Çizelge 5.9'da verilen enjeksiyon parametreleri ile kalıplanan numune örneği Resim 5.9'da verilmiştir. İTEK yöntemi ile kalıplanmış parçalar rijit yapıdadır ve insört ile besleme stoğu arasındaki arayüzey herhangi bir deformasyona uğramamıştır.



Resim 5.9. WC-%9Co besleme stoğu enjeksiyonu yapılmış insörtlü numune

5.4. Bağlayıcı Giderme İşlemi

Enjeksiyon kalıplama işleminden sonra numunelere sırasıyla kimyasal ve termal olmak üzere iki bağlayıcı giderme işlemi uygulanmıştır. Kimyasal bağlayıcı giderme işleminde numuneler etanol ortamında 60 °C sıcaklıkta 48 saat bekletilmişlerdir (Resim 5.10).

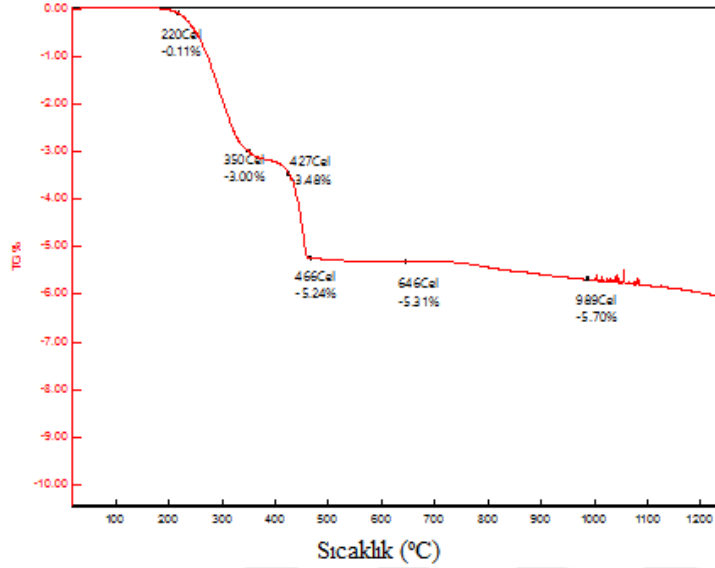


Resim 5.10. Kimyasal bağlayıcı giderme işlemine tabi tutulan numuneler

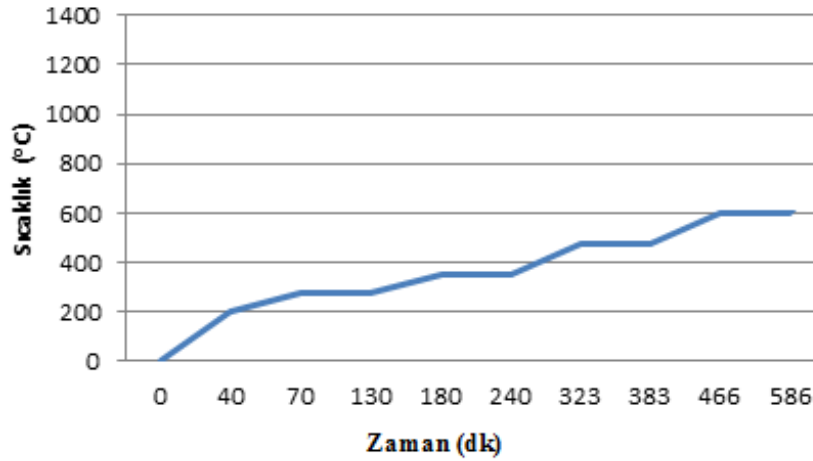
Bu aşamadan sonra numuneler 60 °C’de 12 saat kurutma işlemine tabi tutulmuşlardır. Kurutma işlemi sonrası numuneler 0,001 g hassasiyete sahip terazi ile tartılarak ağırlıkça % malzeme kaybı hesaplanmıştır. Kimyasal bağlayıcı giderme ve kurutma işlemlerinden sonra numunelere termal bağlayıcı giderme işlemi uygulanmıştır.

Termal bağlayıcı giderme işlemlerinin bütün aşamalarında belirlenen parametreler, bağlayıcı sistemleri üzerine yapılan termogravimetrik (TG) analizleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Şekil 5.8’de WC-%9Co besleme stoğunun TG analizi gösterilmektedir. Bu grafiğe göre sıcaklıkla beraber besleme stoğunda meydana gelen kütle kayıpları gösterilmiştir. Kütle kayıplarının fazla olduğu sıcaklıklar kritik sıcaklıklardır. Bu sıcaklıklar yavaş geçilmesi gerekmektedir. Aksi halde numuneler çatlayacaktır. Bundan dolayı bağlayıcıların giderildiği sıcaklıklara duraklar eklenerek termal bağlayıcı giderme işlemi gerçekleştirilmiştir. TG analizine göre bağlayıcıların önemli bir kısmı (%5,24) 175-475 °C sıcaklıklarda numuneden ayrılmaktadır. 475 °C sıcaklıktan sonra sinterleme sıcaklığına kadar önemli bir kayıp olmamıştır.

TG analizi sonucuna göre termal bağlayıcı giderme ve sinterleme aşamaları için sıcaklık-zaman Şekil 5.9’da belirtilen döngüsü verilmiştir. Termal bağlayıcı giderme işlemi atmosfer kontrollü sinterleme fırınında %95 azot (N_2) ve %5 hidrojen (H_2) içeren karışım gazı atmosferinde yapılmıştır.



Şekil 5.8. WC-%9Co besleme stoğunun TG analizi



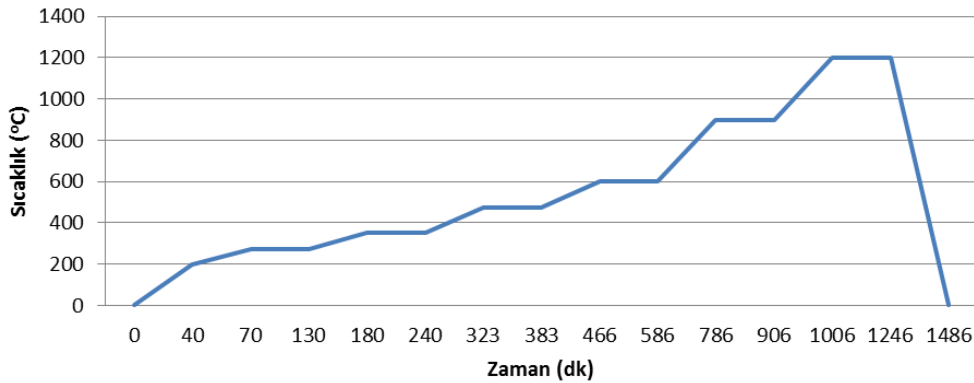
Şekil 5.9. Termal bağlayıcı giderme işleminin grafiksel gösterimi

5.5. Sinterleme İşlemi

Şekil 5.8’de gösterilen TG analizi sonucuna göre bağlayıcıların giderildiği sıcaklıklara duraklar eklenerek sinterleme şartları için sıcaklık-zaman döngüsü belirlenmiştir. Sinterleme esnasında parçada oluşabilecek çatlama ve kirlilik gibi problemlerin önüne geçilmiştir.

Termal bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemi art arda gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemi, karışım gaz atmosferinde (%5H₂+%95N₂) gerçekleştirilmiştir. Sinterleme aşaması atmosfer kontrollü fırında yapıldığı için deneylerde oksitlenme ve kirliliği önlemek amacıyla bu karışım gazı kullanılmıştır.

Sinterleme sıcaklıkları 1100-1200-1300-1400 °C olurken sinterleme süresi 240 dk olmuştur. Sinterleme işleminden sonra fırın 5 °C/dk soğutma hızında soğutulmuştur. 5.10’da sinterlemenin yapıldığı 1200 °C sıcaklık için döngü gösterilmiştir.



5.10. WC-%9Co besleme stoğunun 1200 °C sinterleme için sıcaklık-zaman döngüsü

6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde sinterleme sıcaklığı parametrelerinin, insört çapı/enjeksiyon bölgesi çapı (D_i/D_e) oranının, sinterleme sıcaklığının ve arayüzey kalınlığının hareketli montajlı parçanın üretimi üzerine etkileri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar verilmiştir.

6.1. Bağlayıcı Giderme İşlemi Parametrelerinin Parçaya Etkisi

6.1.1. Bağlayıcı giderme işleminde kullanılan kimyasalın parçaya etkisi

Bağlayıcı giderme sıvısının tespiti için farklı kimyasallardaki WC-%9Co besleme stoğunun kütle kayıpları incelenmiştir. Bu kayıplar hesaplanırken besleme stoğunun kimyasal içerisinde bekletilmeye başlamadan önceki kütlesi ve kimyasal içerisinden çıkartılıp kurutulduktan sonra ölçülen kütleleri kullanılmıştır. Kimyasal bağlayıcı giderme aşamasında kullanılmak üzere literatür araştırması sonucu elde edilen bilgiler doğrultusunda 13 farklı kimyasal ile bağlayıcı giderme deney tasarımı gerçekleştirilmiştir [15, 73, 128]. Bu kimyasallar ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Kimyasal bağlayıcı giderme işleminde kullanılan kimyasallar ve elde edilen sonuçlar

Kullanılan kimyasal	Sonuç
Toulen	%3,24’lük ağırlık kaybı elde edildi.
Benzen	%3,2’lik ağırlık kaybı elde edildi.
Heptan	%3,63’lük ağırlık kaybı elde edildi.
Aseton	Kütle kaybı olmadı
Etanol	%2,04’lük kütle kaybı elde edildi.
Karbon tetra klorür (CCl_4)	%3,4’lik ağırlık kaybı elde edildi.
Etanol+ Karbon tetra klorür (CCl_4)	%7,7’lik ağırlık kaybı elde edildi.
Metanol	Kütle kaybı olmadı
Nitrik asit	Numune parçalandı.
Hidroklorik asit	Numune parçalandı.
Sülfürik asit	Numune parçalandı.
Kloroform	%2,02’lik ağırlık kaybı elde edildi.
Dikloroetan	%1,1’lik ağırlık kaybı elde edildi.

Besleme stoğunun tedarik edildiği firma verilerine göre, besleme stoğu içerisindeki bağlayıcı yüzdesi ağırlıkça %3,05’tir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde etanol ve

kloroform kimyasalındaki kaybı %2,04 ve %2,02 olarak tespit edilmiştir. Bu değerler besleme stoğunun içerisinde bulunan toplam bağlayıcı yüzdesinin yaklaşık %66'sının ayrıştırıldığını göstermektedir. Literatürde ise kimyasal bağlayıcı giderme işleminde bağlayıcının %60-%70 oranında giderilmesi gerektiği belirtilmektedir [8]. Deney sonuçlarında bu kimyasallar için elde edilen ağırlıkça bağlayıcı yüzdesi kaybının literatür açısından uygun olduğu görülmektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde ulaşılabilirlik ve maliyet göz önünde bulundurularak, bağlayıcı giderme sıvısı olarak etanol çözeltisinin kullanılmasına karar verilmiştir.

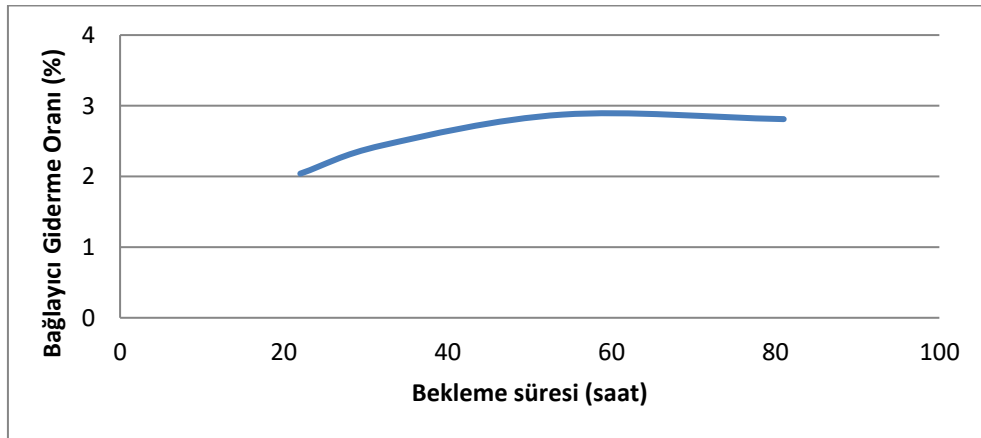
6.1.2. Bağlayıcı giderme işleminde bekleme süresinin parçaya etkisi

Bağlayıcı gidermede kimyasal olarak etanolün belirlenmesinden sonra bağlayıcı giderme sürenin tespiti için deneyler gerçekleştirilmiştir. Farklı sürelerde etanol içerisinde bekletilen numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Bekleme süresinin bağlayıcı giderme oranı üzerine etkisi

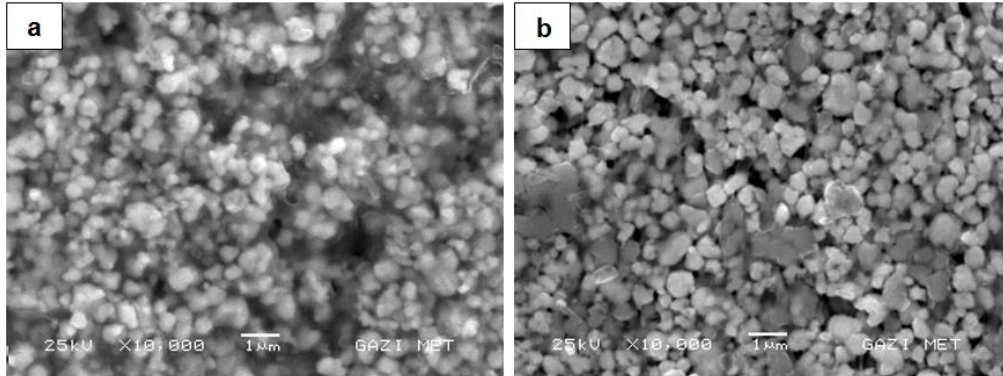
Bekleme süresi (saat)	Bağlayıcı Giderme Oranı (%)
22	2,041
32	2,439
54	2,875
81	2,811

Bağlayıcı gidermede en uygun aralığın bağlayıcı miktarının %60-%70 arasında giderilmesi gerektiğinden en uygun bekleme süresi 48 saat olarak belirlenmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Bekleme süresinin bağlayıcı giderme oranı üzerine etkisi

Etanol ortamında 48 saat bekletilme süresi kullanılarak gerçekleştirilen bağlayıcı giderme deneyleri sonrası mikroyapıdaki değişim de incelenmiştir. Buna göre Resim 6.1’de bağlayıcı giderme işlemi öncesi ve sonrası besleme stoğunun mikroyapısı gösterilmektedir. Resim 6.1 a’da bağlayıcı giderme işlemi öncesinde jelsi bir yapının (bağlayıcıların tozları sardığı), Resim 6.1 b’de ise bağlayıcı giderme işleminden sonra bu yapının ortamdaki kaybolduğu görülmektedir.



Resim 6.1. a) Test numunelerinin bağlayıcı giderme işlemi öncesi SEM görüntüsü, b) Test numunelerinin bağlayıcı giderme işlemi sonrası SEM görüntüsü

6.1. Optimum İnsört Çapı/Enjeksiyon Bölgesi Çapının (D_i/D_e) Tayini

Bu başlıkta Ck45 çelik insört üzerine WC-%9Co besleme stoğu enjeksiyonu gerçekleştirilerek insört çapı/enjeksiyon çapı (D_i/D_e) oranı etkisi anlatılmıştır. Parçanın dış çapı sabit tutularak, insört çap değerleri 8, 9, 10, 12, 14, 16 mm olarak değiştirilmiştir. Sırasıyla %40, %45, %50, %60, %70, %80 D_i/D_e oranları incelenmiştir. Başlık dört kısımdan oluşmaktadır:

6.2.1 Dilatometre analizi ile besleme stoğunun termal özelliklerinin tespiti

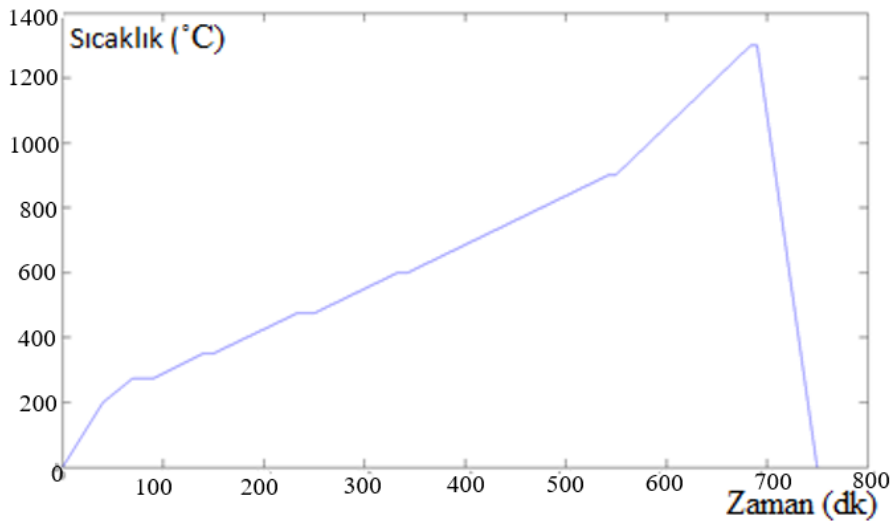
Genleşme katsayısı, termal gerilme değerlerini bulmak için gerekmektedir. Parça üzerindeki termal gerilme değerleri bulunarak optimum insört çapı/enjeksiyon çapı (D_i/D_e) oranı tespit edilecektir. Çatlak oluşumu olmadan parça üretimi için bu optimizasyon gerekmektedir. Bundan dolayı besleme stoğu ve çeliğin genleşme katsayılarının tespit edilmesi gerekir. Besleme stoğunun genleşme katsayısı içerdiği bağlayıcılar sebebiyle sabit değildir. Bu nedenle sinterleme parametreleri esas alınarak dilatometre (boyut değişimi) analizi gerçekleştirilmiştir.

Bu deneye göre ilk boyu 14,1 mm olan WC-%9Co besleme stoğundan hazırlanmış numune Resim 6.2’de verilen geometride hazırlanmıştır. Analiz, Şekil 6.2’de belirtilen sıcaklık-zaman döngüsü ile yapılmıştır. Şekil 6.3’te gösterilen analiz sonucuna göre 0-800 °C arasında genleşme meydana geldiği daha sonra kullanılan numune boyutunun artan sıcaklık ile küçüldüğü görülmektedir.

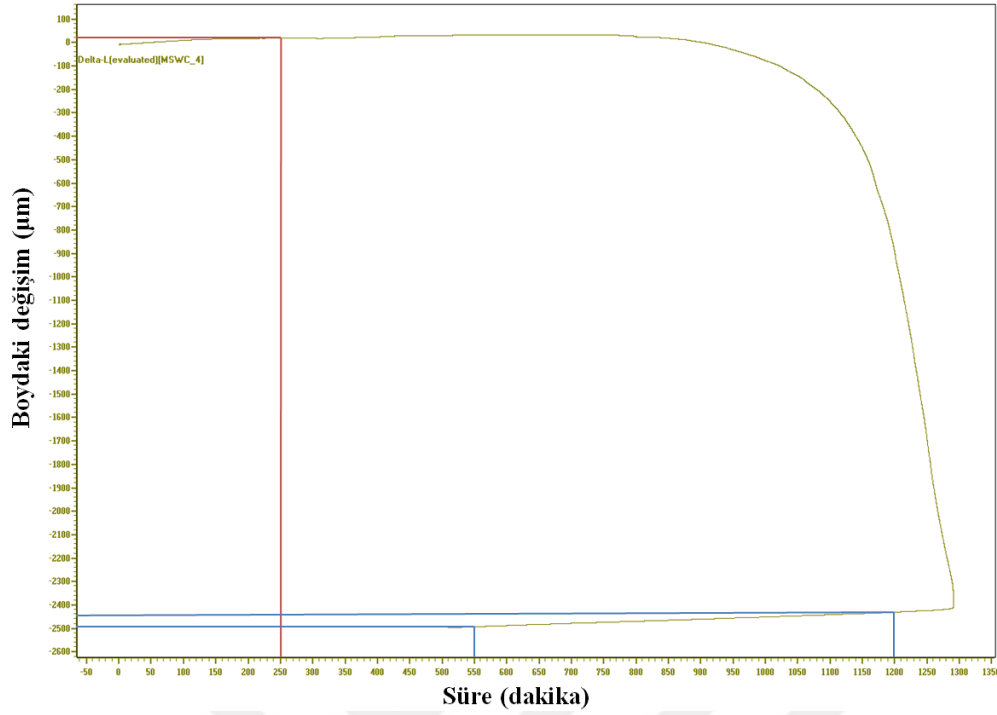
0-800 °C arasındaki genleşmenin nedeni, polimer esaslı bağlayıcıların henüz kaybolmamış olmasıdır. Bağlayıcıların giderilmesinin ardından sinterleme başlamış ve numune boyutu küçülmüştür. 1300 °C sıcaklığa gelindiğinde boyut değişimi (çekme oranı) elde edilmiştir. Daha sonra numune soğumaya bırakılarak son boyu 11,5 mm, çekme oranı %18,43 olmuştur.



Resim 6.2. Dilatometre analizi için hazırlanan numuneler

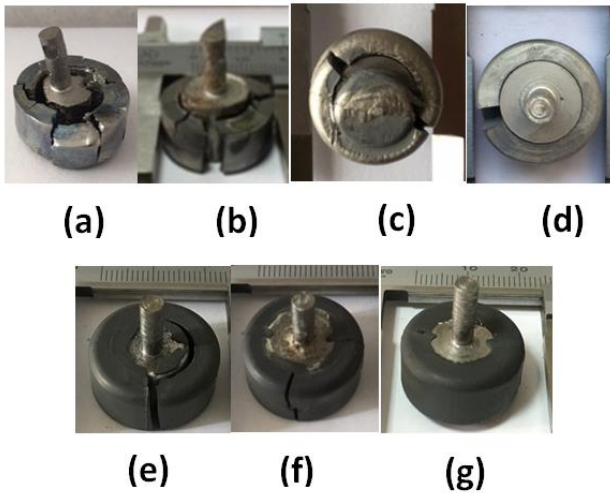


Şekil 6.2. Dilatometre cihazına girilen sıcaklık-zaman döngüsü



Şekil 6.3. WC-%9Co besleme stoğundan üretilen numunelerin dilatometre analizinde ölçülen sıcaklığa göre boyut değişimi

Besleme stoğunun genleşme katsayısı, dilatometre analizi sonucu elde edilen grafikten faydalanılarak hesaplanmıştır. 250 °C'ye kadar olan genleşme katsayısı tespit edilerek, analizlerde kullanılmıştır. Bu sıcaklık değerinin alınmasının nedeni kimyasal bağlayıcı giderme işleminden sonra çatlamanın bu sıcaklık değerinde gerçekleşmesidir. Bu sıcaklık değerinin tespiti yapılırken, D_i/D_e oranı %60 olan numune, 1340, 1300, 1250, 1200, 600, 300 ve 250 °C sıcaklıklarda test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Resim 6. 3'te verilmiştir.



Resim 6. 3. a) 1340, b) 1300, c) 1250, d) 1200, e) 600, f) 300, g) 250 °C'ye çıkılmış numuneler

Sinterleme işleminde çatlama, 0-250 °C arasında gerçekleşmektedir. 0-250 °C arasındaki WC-%9Co besleme stoğunun termal genleşme katsayısı Eş. 6.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu eşitlikte numunenin ilk boyu L, sıcaklıkla beraber boydaki değişim ΔL ve sıcaklık farkı ΔT olarak ifade edilmiştir. Şekil 6.3'te gösterilen dilatometre analiz grafiğine göre 250 °C'de boydaki değişim yaklaşık olarak 0,018 mm olmaktadır.

$$L \alpha \Delta T = \Delta L \implies \alpha = \frac{\Delta L}{\Delta T L} = \frac{0,018}{250 \cdot 14,1} = 5,1 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \quad (6.1)$$

6.2.2. WC-%9Co besleme stoğunun ham mukavemetinin hesaplanması

Hesaplanması gereken diğer bir parametre ise enjeksiyon bölgesinin dayanım değeridir. Dayanımın tespiti (σ) için Young modülü (E) ve gerinim (ϵ) değerlerinin bilinmesi gerekmektedir [129]. Analiz için gereken dayanım değeri, çatlamanın 250 °C sıcaklıkta gerçekleşmesi sebebiyle besleme stoğunun ham haldeki (sinterlenmemiş) dayanım değeridir. Literatür taraması sonucunda ham haldeki besleme stoğunun mukavemet değerine ulaşılamamıştır. Deneysel olarak bulunamayan dayanım değeri teorik hesaplamalar sonucunda elde edilmiştir. Hooke Kanunu'na (Eş. 6.2) göre dayanım değeri hesaplanmıştır.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \implies \sigma = E \epsilon \quad (6.2)$$

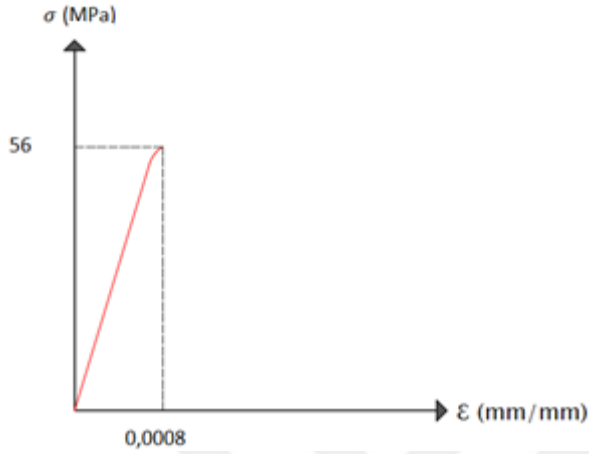
Bu verilere literatür taraması sonucunda ulaşılmıştır. Kalpakjian, toz metalürjisinde kullanılan besleme stoklarının özelliklerini kitabında belirtmiştir [98]. Bu kaynaktan faydalanılarak elde edilen Young modülü ve gerinim değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Eş. 6.2 bu verilere göre çözülürse;

$$\sigma = E \epsilon = 70 \times 0,0008 = 56 \text{ MPa}$$

Ham besleme stoğunun kopma dayanımı değeri **56 MPa** olarak belirlenmiştir.

Literatürden elde edilen veriler sonucu, seramik esaslı besleme stoğunun gerilme-gerinim diyagramı oluşturulmuştur. Ham haldeki parçanın gerilme-gerinim eğrisinin Şekil 6.4'teki gibi olduğu kabul edilmiştir.

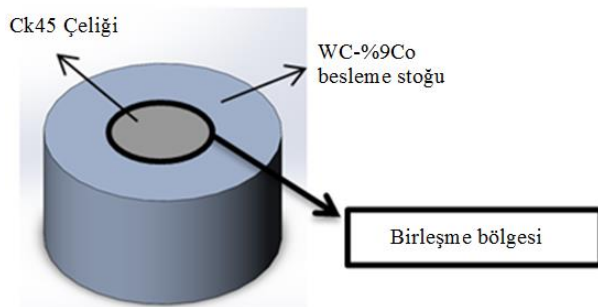


Şekil 6.4. Yaklaşımlar sonucu bulunan gerilim-gerinim eğrisi

Belirtilen hesaplamalara göre teorik sonuçlar ve analizlerde kullanılan malzeme özellikleri, Çizelge 5.1'de ve Çizelge 5.4'te verilmiştir. Ck45 çeliğinin özellikleri tedarik edilen firma verilerinden alınmıştır.

6.2.3. Matematiksel hesaplamalar ile optimum insört çapı/enjeksiyon bölgesi çapının (D_i/D_e) tayini

İTEK ile üretilmesi hedeflenen numune tasarımı Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Bu tasarıma göre parça iki farklı malzemeden oluşmaktadır. Termal genleşme katsayısı farklılığı, sıcaklık artışıyla birlikte temas bölgesinde gerilmelere sebep olacaktır. Çap oranının değişmesi, oluşan bu gerilmeyi değiştirecektir.



Şekil 6.5. Tasarlanan numune ve birleşme bölgesinin gösterimi

20 mm olan kalıp boşluğunun çapı (D_e) sabit tutularak insörtün çapı (D_i) değiştirilmiştir. Ortaya çıkan farklı çap oranları (D_i/D_e) hesaplanmıştır. Temas bölgesinde meydana gelecek termal gerilme, süperpozisyon yöntemiyle hesaplanmıştır.

Buna göre matematiksel model, sabit iki sabit mesnet arasındaki çubuk modeline benzetilmiştir (Şekil 6.6).



Şekil 6.6. Tasarlanan geometrinin modellenmesi [130]

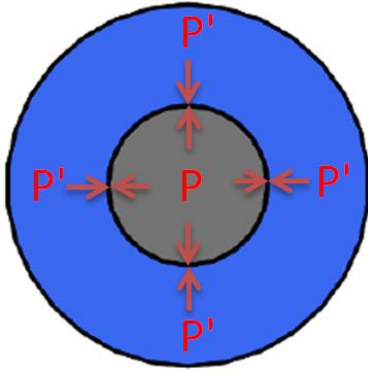
İlk durumda şekil değiştirme ve gerilme yoktur ancak çubuğun sıcaklığı ΔT kadar yükselirse, sabit mesnetler uzamaya izin vermeyecektir. Şekil değiştirme mesnetler tarafından engellenmesi nedeniyle çubuğun mesnetlerinde eşit ve zıt yönlü P ve P' kuvvetleri ortaya çıkar. Böylece çubukta bir gerilme oluşur.

ΔT sıcaklık değişiminden dolayı temas bölgesinde meydana gelecek termal gerilme Eş. 6.3 kullanılarak hesaplanır:

$$\sigma = \frac{P}{A} = -E \alpha \Delta T \quad (6.3)$$

σ : Gerilme (MPa), ΔT : Sıcaklık farkı ($^{\circ}\text{C}$), L : Çubuk boyu (mm), P : Çubuğun mesnete uyguladığı kuvvet (N), E : Young modülü (GPa), A : Çubuğun kesit alanı (mm^2), α : Termal genleşme katsayısı ($1/^{\circ}\text{C}$)

Bu model, oluşturulan geometriye uyarlanmıştır. İnsört ve enjeksiyon bölgesi sıcaklık arttıkça genleşecek ve insört, enjeksiyon bölgesine kuvvet uygulayacaktır. Diğer taraftan enjeksiyon bölgesi, genleşmeden dolayı oluşacak kuvvete tepki olarak eşit ve zıt yönlü bir kuvvet oluşturacaktır (Şekil 6.7). Oluşan kuvvetin temas alanına bölünmesiyle gerilmeler hesaplanmıştır.



Şekil 6.7. Sıcaklıkla birlikte temas bölgesinde meydana gelen iç kuvvetler

Temas bölgesinde meydana gelen termal gerilmeler deneysel çalışmalar öncesinde teorik hesaplamalarla bulunmuştur. Eş. 6.3, tek bir malzeme için meydana gelen gerilmeyi vermektedir. Bu model Şekil 6.7'ye uyarlanırsa, iki farklı malzemenin genleşmesi sonucu temas bölgesinde meydana gelen gerilme hesaplanabilir.

Buna göre, temas bölgesinde oluşacak kuvvet P ile gösterilirse çeliğin gerinimi (Eş. 6.4):

$$\delta_{\text{ç}} = -\frac{P L_{\text{ç}}}{A_{\text{ç}} E_{\text{ç}}} + L_{\text{ç}} \alpha_{\text{ç}} (\Delta T) \implies \epsilon_{\text{ç}} = -\frac{P}{A_{\text{ç}} E_{\text{ç}}} + \alpha_{\text{ç}} (\Delta T) \quad (6.4)$$

Enjeksiyon bölgesinin gerinimi (Eş. 6.5):

$$\delta_{\text{e}} = \frac{P L_{\text{e}}}{A_{\text{e}} E_{\text{e}}} + L_{\text{e}} \alpha_{\text{e}} (\Delta T) \implies \epsilon_{\text{e}} = \frac{P}{A_{\text{e}} E_{\text{e}}} + \alpha_{\text{e}} (\Delta T) \quad (6.5)$$

Malzemelerin sıcaklıkla beraber meydana gelen uzamalarının toplamı 0 olması gerektiğinden ($\epsilon_{\text{ç}} = \epsilon_{\text{e}}$) Eş. 6.6 elde edilir:

$$-\frac{P}{A_{\text{ç}} E_{\text{ç}}} + \alpha_{\text{ç}} (\Delta T) = \frac{P}{A_{\text{e}} E_{\text{e}}} + \alpha_{\text{e}} (\Delta T) \quad (6.6)$$

Eş. 6.6 düzenlenmesi ile Eş. 6.7 elde edilmiştir:

$$\left(\frac{1}{A_{\text{ç}} E_{\text{ç}}} + \frac{1}{A_{\text{e}} E_{\text{e}}} \right) P = (\alpha_{\text{ç}} - \alpha_{\text{e}}) (\Delta T) \quad (6.7)$$

Burada, $A_{\text{ç}}$ ve A_e değerleri farklı çap oranlarına göre Eş. 6.8 ve Eş. 6.9 kullanılarak hesaplanır:

$$A_{\text{ç}} = \frac{\pi}{4} d_d^2 \quad (6.8)$$

$$A_e = \frac{\pi}{4} (d_d^2 - d_i^2) \quad (6.9)$$

Eş. 6.7 kullanılarak temas bölgesinde meydana gelen P_t kuvveti hesaplanabilir. P_t kuvvetinin çelik üzerinde oluşturduğu gerilme (Eş. 6.10):

$$\sigma_{\text{ç}} = \frac{P_t}{A_{\text{ç}}} \quad (6.10)$$

Enjeksiyon bölgesinde oluşturduğu kuvvet ise Eş. 6.11 kullanılarak hesaplanır:

$$\sigma_e = \frac{P_t}{A_e} \quad (6.11)$$

δ_e : Sıcaklık nedeniyle enjeksiyon bölgesinin boyunda meydana gelen değişim (mm), $L_{\text{ç}}$: Çeliğin boyu (mm), L_e : Enjeksiyon bölgesinin boyu (mm), $A_{\text{ç}}$: Çeliğin kesit alanı (mm²), A_e : Enjeksiyon bölgesinin kesit alanı (mm²), $E_{\text{ç}}$: Çeliğin Young modülü (GPa), E_e : Enjeksiyon bölgesinin Young modülü (GPa), ε_e : Enjeksiyon bölgesinin gerinimi (mm/mm), $\alpha_{\text{ç}}$: Çeliğin termal genleşme katsayısı (1/°C), α_e : Enjeksiyon bölgesinin termal genleşme katsayısı (1/°C), P_t : Temas bölgesinde çelik ve enjeksiyon bölgesine uygulanan kuvvet (N), d_d : Dış çap (mm), d_i : İç çap (mm), $\sigma_{\text{ç}}$: Çelikte oluşan gerilme (MPa), σ_e : Enjeksiyon bölgesinde oluşan gerilme (MPa)

Temas bölgesinde meydana gelen termal gerilmeler deneysel çalışmalar öncesinde teorik hesaplamalarla bulunmuştur. Eş. 6.11 kullanılarak elde edilen enjeksiyon bölgesindeki gerilme değerleri, Çizelge 6.3'te gösterilmiştir. En yüksek gerilme değeri D_i/D_e oranının maksimum olduğu değerde elde edilmiştir. Enjeksiyon bölgesinin kalınlığı arttıkça oluşan gerilme değeri azalmıştır. Çünkü kullanılan insört kalınlığı düşmüş genleşme az olacağı için gerilme de daha az olacaktır.

Çizelge 6.3. Farklı D_i/D_e oranlarına sahip numuneler için enjeksiyon bölgesinde meydana gelen gerilmeler

D_i/D_e (%)	40	45	50	60	70	80
Gerilme (MPa)	40,6063	48,26285	55,78698	70,00316	82,7122	93,760

Enjeksiyon bölgesinin dayanım değeri 56 MPa olduğu düşünüldüğünde çatlamların D_i/D_e oranının, %50'den büyük olması durumunda meydana geleceği Çizelge 6.3'te görülmektedir.

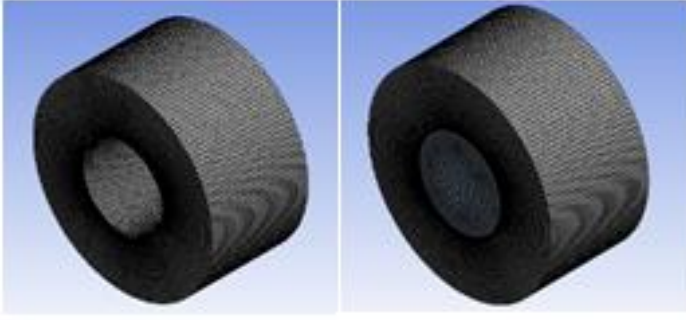
Schaub ve arkadaşları, İTEK'te enjeksiyon bölgesinde birbirine yakın termal genleşme katsayısına sahip malzemelerin seçilmesinin önemli olduğunu belirtmiştir [131].

Choi ve arkadaşları çalışmasında, sinterleme aşamasında insörtün, enjeksiyon bölgesinden daha fazla genleşmesi durumunda, kalıcı deformasyon ve çatlaklar meydana gelebileceğinden bahsetmiştir [132].

Çalışmamızda da termal genleşmenin, malzeme seçimi ve parça üretimi konusunda önemli olduğu görülmüştür.

6.2.4. Sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel çalışmalar ile optimum insört çapı/enjeksiyon bölgesi çapının (D_i/D_e) tayini

Matematiksel hesaplamalar, kesin bir yorum yapabilmek için yeterli değildir. Deneysel yöntemlerle doğrulamak gerekir. Matematiksel hesaplamalara ek olarak ANSYS programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle analiz gerçekleştirilmiştir. Programa çelik ve enjeksiyon bölgesi için malzeme özellikleri girilmiştir. Sonraki adımda, numune üzerinde Şekil 6.8'de gösterildiği gibi mesh yapısı oluşturulmuştur. Analizler için programa ilk sıcaklık 15 °C ve son sıcaklık 250 °C olarak girilmiştir.

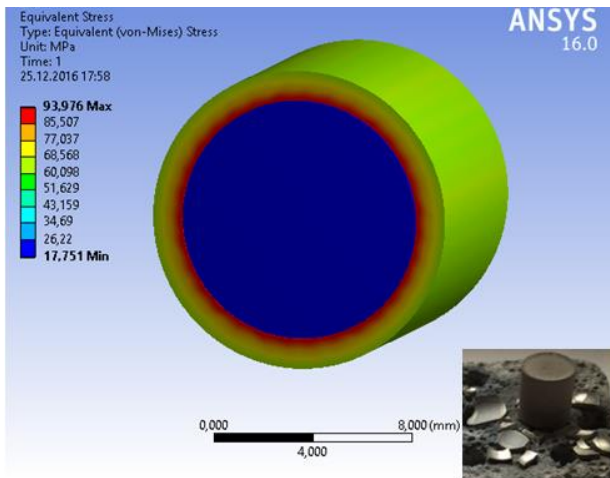


Şekil 6.8. ANSYS programında modellenen numunenin mesh yapısı

Numunelerin tam yoğunluktaki çatlama-çatlamama durumlarını görebilmek için 1200 °C sıcaklıkta sinterlenerek elde edilen analiz sonuçları ve deneysel sonuçlar aşağıda karşılaştırılmıştır:

- $D_i/D_e = 0,8$ için;

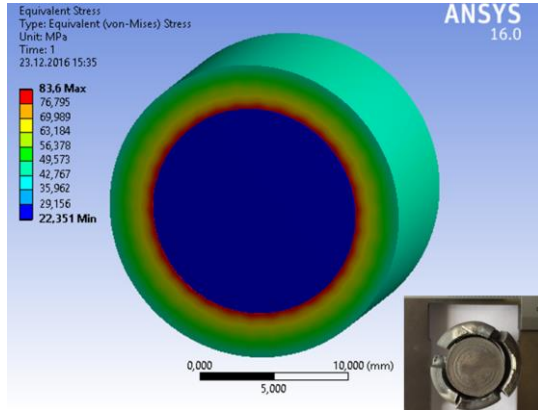
Çelik çapı 9,6 mm ve enjeksiyon çapı 12 mm olan numune ANSYS programında tasarlanarak daha önce belirtilen şartlarda analiz gerçekleştirilmiştir. Buna göre maksimum gerilme Şekil 6.9’da görüldüğü gibi enjeksiyon bölgesinde meydana gelmiştir. ANSYS analizine göre maksimum gerilme daha önceki çalışmalarda da gözlemlendiği gibi birleşme bölgesinde meydana gelmiştir [133] ve değeri 93,976 MPa’dır. Matematiksel hesaplamalar sonucunda bu değer 93,76031 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.9. $D_i/D_e = 0,8$ olan numunenin ANSYS analizi sonucu oluşan gerilmeler ve sinterleme deneyi sonucu

- $D_i/D_e = 0,7$ için;

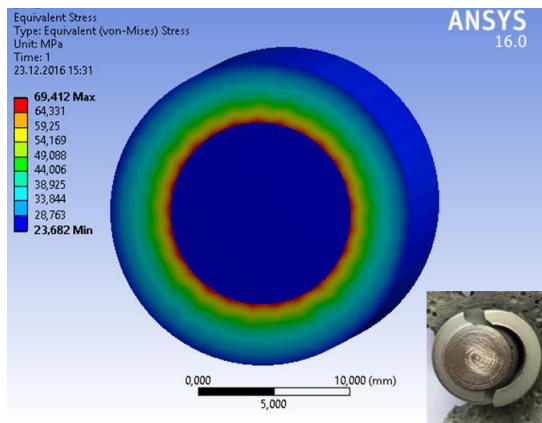
Çelik çapı 14 mm olan numune için gerçekleştirilen analiz ve deneysel çalışma sonuçları Şekil 6.10'da verilmiştir. Birleşme bölgesinde oluşan gerilme matematiksel hesaplamalar sonucu 82,71224 MPa bulunurken ANSYS programında gerçekleştirilen analiz sonucunda maksimum gerilme değeri 83,6 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.10. $D_i/D_e = 0,7$ olan numunenin ANSYS analizi sonucu oluşan gerilmeleri ve sinterleme deneyi sonucu

- $D_i/D_e = 0,6$ için;

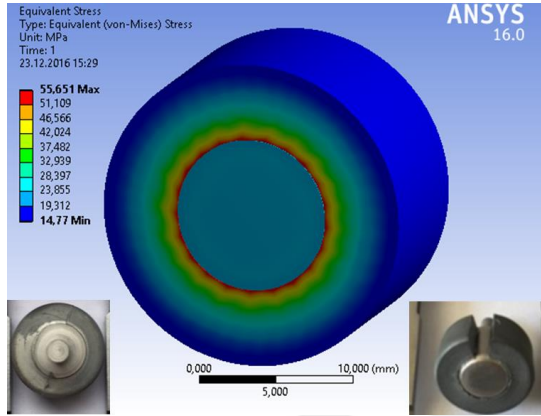
Çelik çapı 12 mm olan numune için gerçekleştirilen analiz ve deneysel çalışma sonuçları Şekil 6.11'de verilmiştir. Birleşme bölgesinde oluşan gerilme matematiksel hesaplamalar sonucu 70,00316 MPa bulunurken ANSYS programında gerçekleştirilen analiz sonucunda maksimum gerilme değeri, 69,412 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.11. $D_i/D_e = 0,6$ olan numunenin ANSYS analizi sonucu oluşan gerilmeleri ve sinterleme deneyi sonucu

- $D_i/D_m = 0,5$ için;

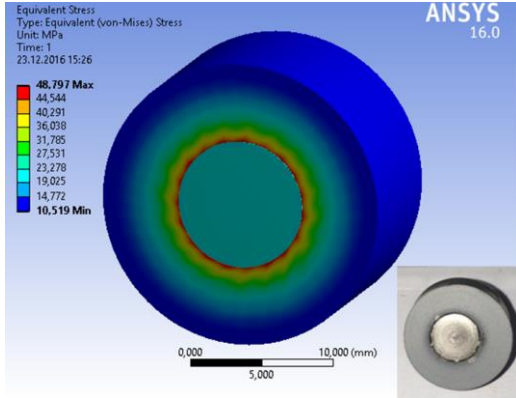
Çelik çapı 10 mm olan numune için gerçekleştirilen analiz ve deneysel çalışma sonuçları Şekil 6.12’de verilmiştir. Meydana gelen gerilme matematiksel yöntemlerle 55,78698 MPa hesaplanırken, ANSYS programında gerçekleştirilen analiz sonucu 55,651 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler enjeksiyon bölgesinin dayanım değerine (56 MPa) yakındır.



Şekil 6.12. $D_i/D_e = 0,5$ olan numunenin sinterleme deneyi sonuçları ve ANSYS analizi sonucu oluşan gerilmeler

- $D_i/D_m = 0,45$ için;

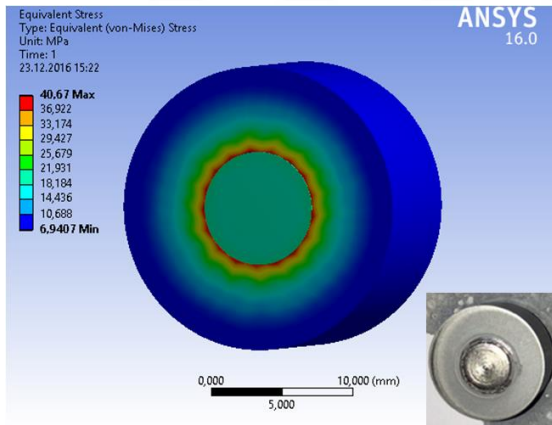
Çelik çapı 9 mm olan numune için gerçekleştirilen analiz ve deneysel çalışma sonuçları Şekil 6.13’te verilmiştir. Oluşan gerilme değeri matematiksel yöntemlerle 48,2628 MPa olarak hesaplanmıştır. ANSYS programında gerçekleştirilen analiz sonucunda maksimum gerilme 48,797 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değerler enjeksiyon bölgesinin dayanım değerinin (56 MPa) altındadır.



Şekil 6.13. $D_i/D_m = 0,45$ olan numunenin ANSYS analizi sonucu oluşan gerilmeleri ve sinterleme deneyi sonucu

- $D_i/D_e = 0,4$ için;

Çelik çapı 8 mm olan numune için gerçekleştirilen analiz ve deneysel çalışma sonuçları Şekil 6.14'te verilmiştir. Oluşan gerilme değeri matematiksel yöntemlerle 40,60631 MPa olarak hesaplanmıştır. ANSYS programında gerçekleştirilen analiz sonucunda ise maksimum gerilme 40,67 MPa olarak bulunmuştur.

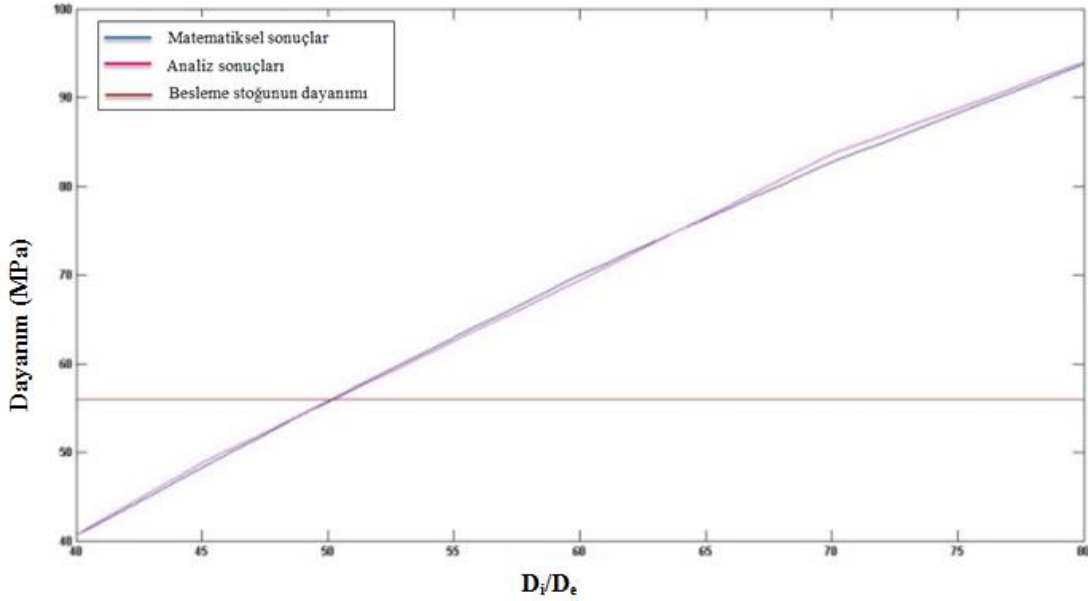


Şekil 6.14. $D_i/D_m = 0,4$ olan numunenin ANSYS analizi sonucu oluşan gerilmeleri ve sinterleme deneyi sonucu

Bu sonuçlara göre kritik D_i/D_e oranı 0,5 olup, enjeksiyon bölgesinde çatlak oluşma ihtimali vardır. Kritik değerden daha düşük D_i/D_e oranlarında çatlama oluşmayacağı belirlenmiştir. İnsörtler, 0,45 D_i/D_e oranı ile imal edilmişlerdir.

Şekil 6.15'te matematiksel hesaplamalar ile ANSYS analizi sonuçları, besleme stoğunun dayanımı ile karşılaştırılmıştır. Birleşme bölgesinde meydana gelen gerilme, D_i/D_e oranıyla

birlikte artmaktadır ve matematiksel modelden elde edilen sonuçlar ile ANSYS analizi sonuçları birbirine yakındır. WC-%9Co besleme stoğu ve Ck45 çeliğinden oluşan malzeme çifti için 0,5 D_i/D_e oranı kritik değerdir. Bu değerden daha yüksek D_i/D_e oranına sahip numunelerde oluşan gerilme besleme stoğunun dayanımından daha fazla olduğu için çatlak oluşumu gözlenecektir.



Şekil 6.15. Matematiksel model ve ANSYS analizi sonuçlarının malzeme dayanımı ile karşılaştırılması

6.3. İTEK Yöntemi Sonucunda Hareketli ve Montajlı Parçanın Meydana Gelmesi

Hareketli montajlı parça üretiminde farklı arayüze sahip insörtler, İTEK prosesi doğrultusunda enjeksiyon kalıplama ve bağlayıcı giderme işlemlerine tabi tutulmuştur.

Çalışmada farklı arayüzey malzemeleri denenmiş ancak yalnızca iki tanesinden olumlu sonuç alınmıştır. Olumlu sonuç veren arayüzey malzemeleri sıvı plastik ve krom olmuştur. Diğer arayüzeyler homojen kaplanamaması, istenilen sıcaklıklara dayanamaması ve her insört geometrisine uygun olmaması vb. nedeniyle sonuç alınamamıştır (Çizelge 6.4). Resim 6.4'te olumlu ve olumsuz sonuç veren arayüzeyler gösterilmiştir.

Çizelge 6.4. Arayüzey türleri ve sonuçları

No.	Arayüzey Türü	Açıkama
1	Boya	Homojen kaplama yapılamamıştır. Taban kısmı kalın olmuştur.
2	Poliolefin daralan makaron	Her şekle uygun olarak kaplama yapılamamıştır. Sadece silindirik insörtlerde olduğu için vazgeçilmiştir.
3	Epoksi reçine	Homojen olarak yüzey kaplanamamıştır.
4	Etil selüloz çözeltisi	Kimyasal bağlayıcı giderme işleminde çözünmüştür ve homojen kaplama yapılamamıştır.
5	Nişasta çözeltisi	Kimyasal bağlayıcı giderme işleminde çözünmüştür ve homojen kaplama yapılamamıştır.
6	Parafin+Alümina tozu	Düşük kaybolma sıcaklığına sahiptir, arayüzey erimiştir ve homojen kaplama yapılamamıştır.
7	Poliamid bant	Yüksek sıcaklıklara dayanması sebebiyle tercih edilmemiştir. Çünkü sinterlemede bağlayıcının tamamen giderildiği sıcaklıkta ortamdan uzaklaştırılamamıştır. Homojen kaplama yapılamamıştır. Genleşme sonucu şişme ve çatlama meydana gelmiştir.
8	Polietilen glikol çözeltisi	Kimyasal bağlayıcı giderme işleminde çözünmüştür ve homojen kaplama yapılamamıştır.
9	Poliüretan	İstenen kaplama kalınlığı elde edilememiştir. Kalın bulunmuştur.
10	Polivinil alkol çözeltisi	Kimyasal bağlayıcı giderme işleminde çözünmüştür ve homojen kaplama yapılamamıştır.
11	Polivinil klorür bant	Homojen kaplama yapılamamıştır. Genleşme sonucu şişme ve çatlama meydana gelmiştir.
12	Polimetilsiloksan+silica+asetoksilan (sıvı conta)	Kaplamanın kimyasal içeriği sıcaklık ile yanma reaksiyonu göstermiştir ve homojen kaplama yapılamamıştır.
13	Teflon bant	Her geometriye uygun kaplama yapılamamıştır.
14	Krom	Difüzyonu engellemesinden dolayı boşluk oluşumu sağlanmış, hareketli parça elde edilmiştir.
15	Sıvı plastik (Plastidip)	Arayüzeyin, sinterleme aşamasında buharlaşması ile boşluk oluşumu sağlanmış, hareketli parça elde edilmiştir.



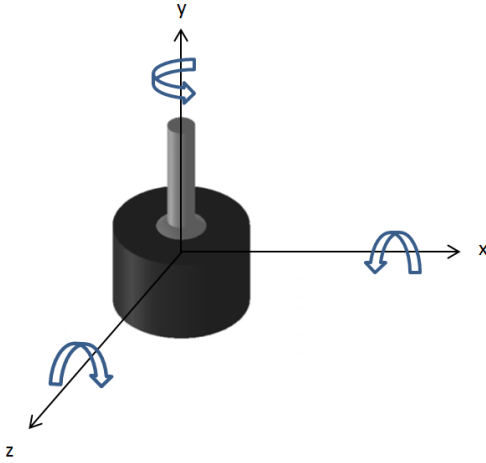
Resim 6.4. Olumlu ve olumsuz sonuç veren arayüzeyler; a) Boya, b) Poliolefin daralan makaron, c) Epoksi reçine, d) Etil selüloz çözeltisi, e) Nişasta çözeltisi, f) Parafin+Alümina tozu, g) Poliamid, h) Polietilen glikol çözeltisi, ı) Poliüretan, j) Polivinil alkol çözeltisi, k) Polivinil klorür, l) Polimetilsiloksan+silica+asetoksilan, m) Teflon bant n) Krom o) Sıvı plastik

Krom ve sıvı plastik arayüzeylere sahip parçalar, 5.10'daki sıcaklık-zaman döngüsüne göre sinterlenmiş, Resim 6.5'te gösterildiği gibi hareketli hale gelmiştir.



Resim 6.5. Hareketli mafsallı

Şekil 6.16’da sinterleme sonucu elde edilen mafsallın, hareket eksenleri gösterilmiştir. Mafsal x, y ve z eksenlerinde dönme hareketi yapabilmektedir. Enjeksiyon sonrası hareketsiz bir yapıya sahip olan parça, sinterleme sonucunda boşluk oluşumu sayesinde 3 serbestlik derecesi kazanmıştır.



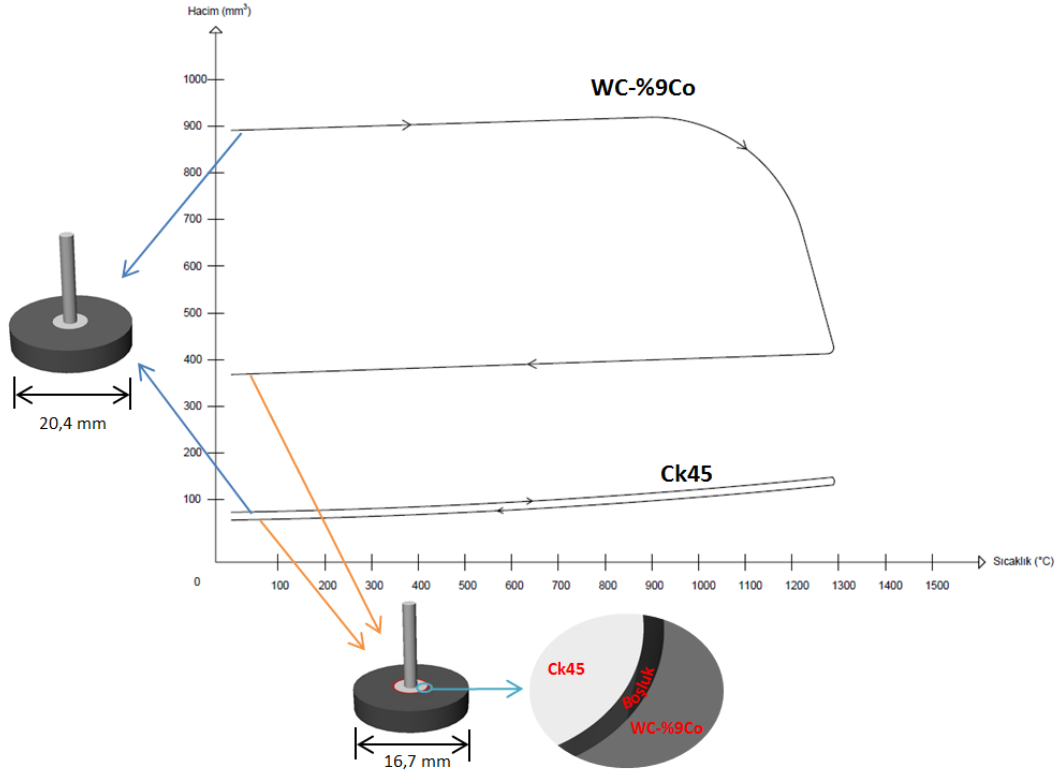
Şekil 6.16. Küresel mafsallın hareket eksenleri

Bileşenler arasında elde edilen boşluğa, arayüzey kullanımının yanı sıra besleme stoğunun hacimsel çekme miktarı da etki etmektedir. Sinterleme esnasında besleme stoğu içerisindeki bağlayıcıların sıcaklıkla beraber ortamdan giderilmesi ve sıvı sinterleme ile parçada bir miktar hacimce küçülme meydana gelmektedir.

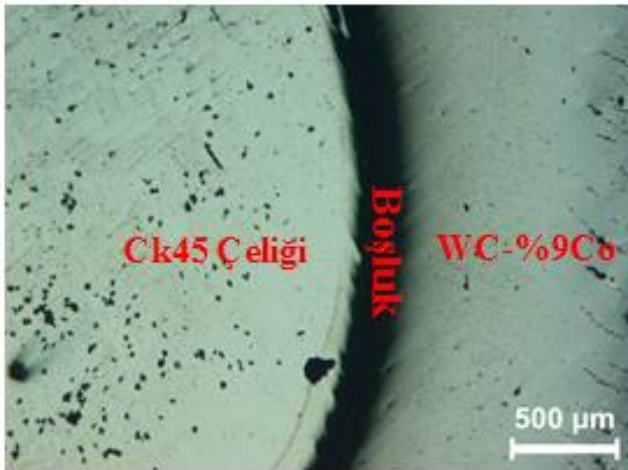
WC-%9Co besleme stoğunun dilatometre analizi yapılarak sıcaklığa bağlı boyutsal değişimi belirlenmiştir. Şekil 6.3’te belirtilen dilatometre analizine göre besleme stoğunun 800 °C sıcaklığa kadar genişlediği ve bu sıcaklıktan sonra sürekli hacimsel küçülme meydana geldiği görülmektedir. Deney sonucunda 1300 °C sıcaklıktaki sinterleme için toplam küçülme oranı %16 olarak hesaplanmıştır.

Dilatometre analizinden elde edilen verilere göre Şekil 6.17’de WC-%9Co besleme stoğu ve Ck45 çeliğinin hacimsel davranışları gösterilmiştir. Enjeksiyon bölgesi dilatometre analizine paralel şekilde boyut değiştirirken Ck45 çeliğinde önemli bir boyut değişimi meydana gelmemiştir. Parçalardaki boşluk, soğuma ile giderek artmış ve insörtün enjeksiyon içerisinde hareket edebileceği tolerans meydana gelmiştir. Resim 6.6’da 1300 °C sıcaklıkta

sinterlenmiş bir parçada meydana gelen bu boşluğun optik mikroskoptaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.17. Malzemelerin hacimsel davranışı sonucu oluşan boşluğun şematik anlatımı

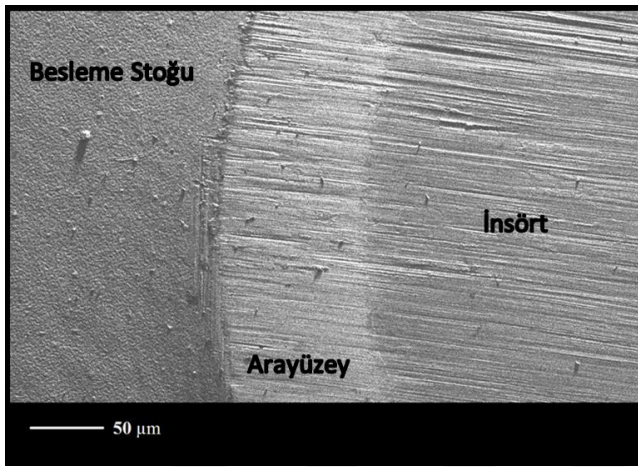


Resim 6.6. 1300 °C'de sinterlenmiş parçada boşluğun optik mikroskoptaki görüntüsü

6.4. Montajlı Parça Üretiminde Sinterleme Sıcaklığının ve Arayüzey Kalınlığının Bileşenler Arası Boşluğa Etkisi

6.4.1 Krom arayüzeye sahip parçalarda

Enjeksiyon sonrası ortaya çıkan rijit yapının kesiti Resim 6.7’de gösterilmektedir. Resimde kalınlığı yaklaşık 100 μm olan krom tabakasının, WC-%9Co besleme stoğu ile Ck45 insört arasına simetrik olarak dağıldığı görülmektedir.



Resim 6.7. Enjeksiyon sonrası parçanın kesit görüntüsü

Krom arayüzeyi ise, sinterleme aşamasında sahip olduğu yüksek aktivasyon enerjisi (547 kJ/mol), yüksek difüzyon katsayısı ($10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$), atom çapı (0,166 nm) ve yüksek erime sıcaklığı (1907 °C) özellikleri sebebiyle WC-%9Co malzeme ile Ck45 çeliğinin birbirine difüzyon olmasını engellemiştir. Böylece montajlı parça hareket edebilme özelliği kazanmıştır.

Arayüzey malzemesi seçilirken her iki mekanizma da göz önünde bulundurulmuştur. Çizelge 5.3, Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.6’da da belirtildiği gibi insört ve besleme stoğunda bulunan yüksek atom yarıçapı, yüksek aktivasyon enerjisi olan krom arayüzey seçilmiştir. Böylece arayüzeyin difüzyonu gerçekleşmemiştir.

Deneylerde krom tabakasının kalınlığı 20, 50, 100 ve 150 μm olarak belirlenmiştir. Böylece farklı arayüzey kalınlıklarının bileşenler arasındaki oluşacak boşluğa etkisi incelenmiştir.

Keinonen ve arkadaşları kromun tungstene difüzyonunu araştırmış, aktivasyon enerjisinin fazla olmasından dolayı yüksek sıcaklık ve süre gerektirdiğini belirtmiştir.

Bu çalışmada kullanılan 1300 °C sinterleme sıcaklığı ve 4 saat sinterleme süresi bileşenlerin birbirleri arasındaki difüzyonu gerçekleştirmek için yeterli olmamıştır. Difüzyonun gerçekleşmediği bu malzeme kombinasyonu boşluğun oluşumunda etkili rol oynamıştır. Difüzyonun gerçekleşmemesine ek olarak besleme stoğunun sinterleme esansında hacimsel çekmesi bileşenler arasında mikron seviyesinde boşluk oluşturmuştur. Bu sayede sinterleme sonucunda küresel mafsallarda elde edilmiştir.

Ruh ve arkadaşları, Piotter ve arkadaşları, Merz ve arkadaşları çalışmalarında difüzyon olmadan montajlı parça üretiminin araştırmışlardır. Besleme stokları sinterleme aşamasında difüzyon olmadığından birbirinden bağımsız şekilde sinterlenmiş ve soğumuştur. Çalışmalar sonucunda boşluğun, hacimsel büzülme ve termal genleşme davranışlarından dolayı oluşacağından bahsedilmiştir [9, 136, 137].

Bu çalışma, literatür çalışmalarına paralellik göstermektedir. Difüzyon olmadan sinterlenen parçalarda boşluk oluşumu gözlenmiştir. Boşluk oluşumu, literatürde açıklandığı gibi malzemelerin farklı termal genleşme katsayılarına ve besleme stoğunun çekme özelliğinden kaynaklanmaktadır.

6.4.1. Sıvı plastik arayüzeye sahip parçalarda

Sıvı plastik arayüzeyin buharlaşma sıcaklığı sinterleme sıcaklığından daha düşük olduğu için arayüzey, sinterleme aşamasında buharlaşarak ortamdan giderilmiştir. Bu sayede bileşenler arası boşluk oluşmuştur ve küresel mafsallarda hareketi elde edilmiştir.

Sinterleme sıcaklığı ve arayüzey kalınlığı bileşenler arasındaki boşluk miktarına etkisi Çizelge 6.6'da gösterilmektedir. En düşük sıcaklık (1100 °C) ile sinterlenen ve en yüksek arayüzey kalınlığındaki (700 µm) parçalarda en fazla boşluk miktarı elde edildiği görülmüştür.

En yüksek sıcaklıkta (1300 °C) sinterlenmiş ve arayüzey kalınlığı en az (500 µm) olan parçalarda ise boşluk miktarı minimum olduğu sonucuna varılmıştır. Arayüzey kalınlığının

400 μm olduğu sinterleme sıcaklıklarında ise mafsall hareketini meydana getirecek boşluk oluşmamıştır. 1400 °C’de ise Ck45 çeliğinin erimesi sebebiyle sonuç alınamamıştır (Resim 6.9).

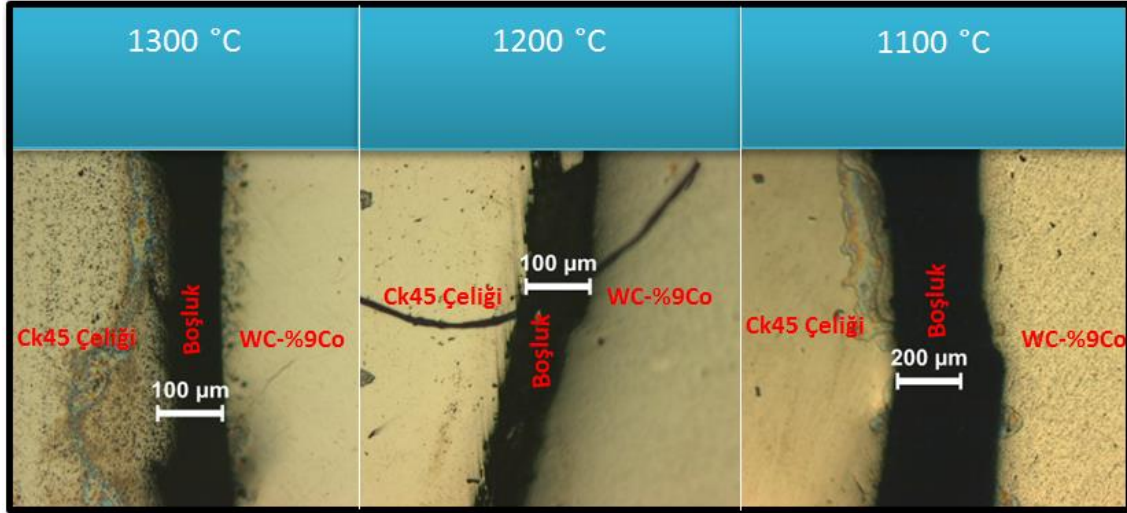
Çizelge 6.6. Sıvı plastik arayüzeye sahip parçalarda sinterleme sıcaklığı ve arayüzey kalınlığının boşluk miktarına etkisi

Sinterleme sıcaklığı (°C)	Kaplama kalınlığı (μm)	Boşluk miktarı (μm)
1100	400	-
	500	120
	600	250
	700	300
1200	400	-
	500	50
	600	100
	700	150
1300	400	-
	500	20
	600	80
	700	130
1400	400	Sonuç alınamamıştır.
	500	
	600	
	700	



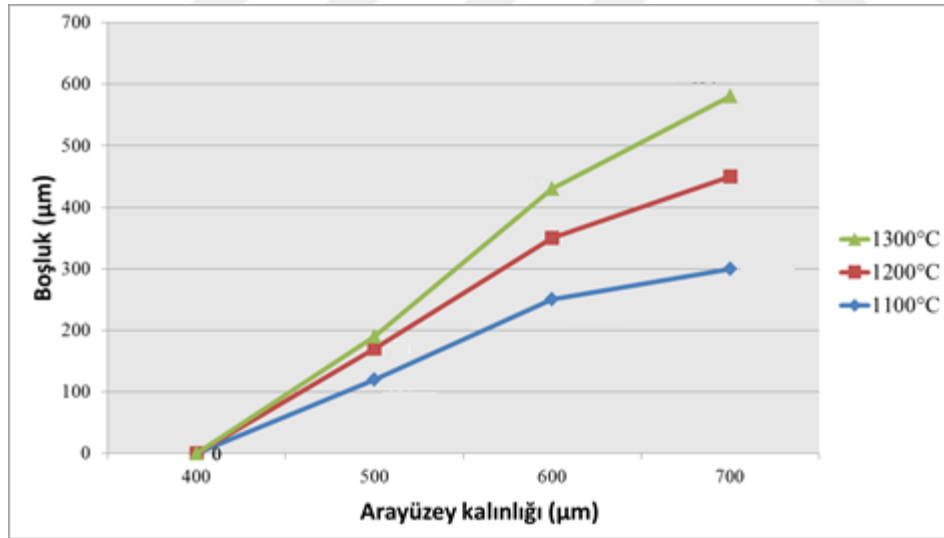
Resim 6.9. 1400 °C sıcaklıkta sinterlenmiş sıvı plastik arayüzeye sahip numune

Farklı sinterleme sıcaklıklarında, aynı arayüzey kalınlıkları için boşluk miktarlarının optik mikroskoptaki görüntüsü Resim 6.10’da verilmiştir. Arayüzey kalınlığı sabit olduğunda sinterleme sıcaklığı arttıkça boşluk miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni sinterleme aşamasında besleme stoğu ve insört arasındaki hacimsel çekme farkındandır.



Resim 6.10. 600 µm arayüzey kalınlığına sahip numunelerde sıcaklığın boşluğa etkisinin optik mikroskopta incelenmesi

Sinterleme sıcaklığında da arayüzey kalınlığı arttıkça bileşenler arası boşluk ölçüsünün arttığı görülmektedir (Şekil 6.18). Arayüzey, sinterleme aşamasında buharlaşarak kaybolduğu için arayüzey kalınlığının artması bileşenler arası boşluk oluşumunu arttırmıştır.



Şekil 6.18. Arayüzey kalınlığının boşluk miktarına etkisi

Deneyler sonucunda bileşenler arasında meydana gelen boşluk miktarı, arayüzey kalınlığından daha az olmuştur. Bunun sebebi enjekte bölgenin hacimsel çekme farkındandır. 400 µm veya daha az kalınlıklarda oluşturulmuş arayüzeylerde, sinterleme sonrası boşluk oluşmamıştır. 400 µm veya daha az arayüzey kalınlıkları, mafsal hareketinin gerçekleşmesi için yeterli olmamıştır.

Attia ve arkadaşları [13], TEK yöntemi ile hareketli parmak eklemi üretimi üzerine çalışmışlardır. Sinterlemedeki hacimsel çekmeden dolayı, bileşenler arasında oluşan boşluk miktarı, arayüzey kalınlığından daha az olmuştur. Boşluk miktarı arayüzey kalınlığından yaklaşık olarak %11 daha az meydana geldiğini belirtmişlerdir. Montajlı parça üretiminde, arayüzey kalınlığının yanı sıra sinterlemedeki besleme stoğunun hacimsel çekmesinin, arayüzey cinsinin, besleme stoğu ve sinterleme parametrelerinin, malzeme özelliklerinin de etkili olduğu belirtilmiştir.

Attia ve arkadaşları [7], 316L besleme stoğu kullanılarak montajlı parça imalatı gerçekleştirmişlerdir. 246 µm kalınlığında kullanılan POM, 218 µm boşluk oluşumunu sağlamıştır.

Çalışmamızda, WC-%9Co besleme stoğu ve sıvı plastik arayüzey kullanımı ile montajlı parça üretimi araştırılmıştır. Çalışmamız, farklı besleme stoğu ve arayüzey kullanılmasına rağmen literatür ile benzerlik göstermiştir. Boşluk miktarı, arayüzey kalınlığından daha az olmuştur.

6.5. Hareketli ve Montajlı Parçada Bileşenler Arası Oluşan Boşluğun Matematiksel Hesaplamalar ve Sonlu Elemanlar Analizi ile İfade Edilmesi

Sinterleme sıcaklığının düşük olması Şekil 6.3'teki dilatometre analizinden de görüleceği üzere besleme stoğunun bu aşamada hacimsel çekme miktarını azalttığı görülmektedir. Daha düşük sıcaklıkta sinterlenen besleme stoğu, soğuma aşamasına daha büyük bir hacim ile başlamaktadır. Soğuma anında besleme stoğu ve Ck45 çeliğinin termal çekme davranışları Eş. 6.12'ye göre hesaplandığında sinterleme sıcaklığı azaldıkça iki malzeme arasında hacimsel çekme farkının arttığı tespit edilmiştir. Her bir sinterleme sıcaklığı için hacimsel çekme farkı Çizelge 6.7'de gösterilmiştir.

$$\Delta V = V_0 \cdot 3\alpha \cdot \Delta T \quad [138] \quad (6.12)$$

Eşitlik 6.12'de kullanılan V_0 ifadesi Ck45 çeliği için Eş. 6.13 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$V_{0s} = \left(\frac{\pi}{4} d_s^2 \right) \cdot t_s \quad (6.13)$$

Eş. 6.12’de kullanılan V_0 ifadesi WC-%9 Co besleme stoğu için Eş. 6.14 ile bulunmuştur:

$$V_{of} = \frac{\pi}{4} (d_{fo}^2 - d_{fi}^2) \cdot t_f \quad (6.14)$$

Hacimsel çekme farkı hesaplanırken ise, termal genleşme katsayısı değeri Ck45 çeliği için tedarik edilen firmadan alınmıştır. WC-%9Co besleme stoğunda bu değer Şekil 6.3’teki dilatometre analizinden Eş. 6.15 ile hesaplanarak her bir sinterleme sıcaklığı için bulunmuştur.

$$L_i \propto \Delta T = \Delta L_i \implies \alpha = \frac{\Delta L_i}{\Delta T L_i} \quad (6.15)$$

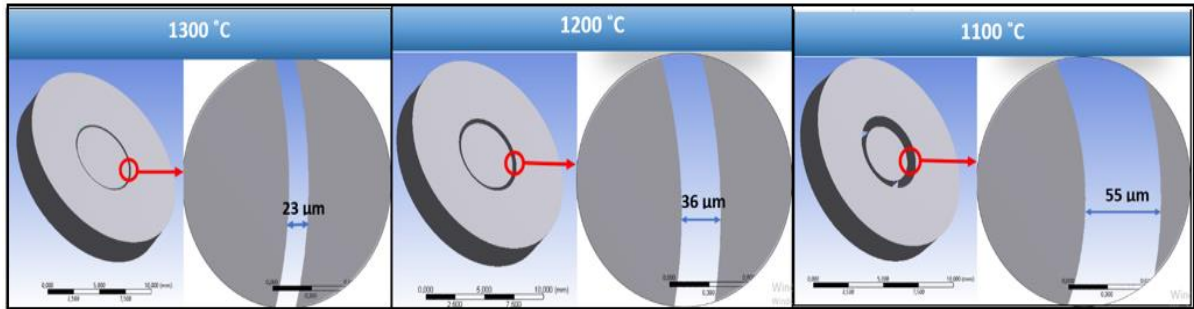
Çizelge 6.7. Farklı sıcaklıklardaki hacimsel çekme farkının hesaplanması

1300 °C			
Ck45 çeliğinin ilk hacmi (V_{0s})	105,36 mm ³	Besleme stoğunun ilk hacmi (V_{of})	421,75 mm ³
Ck45 çeliğinin genleşme katsayısı (α)	15 x 10 ⁻⁶ / °C	Besleme stoğunun genleşme katsayısı (α)	7,5 x 10 ⁻⁶ / °C
Sıcaklık farkı (ΔT)	1300 °C	Sıcaklık farkı (ΔT)	1300 °C
Ck 45 çeliğinin hacimsel çekmesi (ΔV)	6,15 mm ³	Besleme stoğunun hacimsel çekmesi (ΔV)	8,97 mm ³
Hacimsel çekme farkı: 2,82 mm ³			
1200 °C			
Ck45 çeliğinin ilk hacmi (V_0)	104,91 mm ³	Besleme stoğunun ilk hacmi (V_0)	693,54 mm ³
Ck45 çeliğinin genleşme katsayısı (α)	15 x 10 ⁻⁶ / °C	Besleme stoğunun genleşme katsayısı (α)	7,5 x 10 ⁻⁶ / °C
Sıcaklık farkı (ΔT)	1300 °C	Sıcaklık farkı (ΔT)	1300 °C
Ck 45 çeliğinin hacimsel çekmesi (ΔV)	5,66 mm ³	Besleme stoğunun hacimsel çekmesi (ΔV)	14,75 mm ³
Hacimsel çekme farkı: 9,09 mm ³			
1100 °C			
Ck45 çeliğinin ilk hacmi (V_0)	104,46 mm ³	Besleme stoğunun ilk hacmi (V_0)	224,77 mm ³
Ck45 çeliğinin genleşme katsayısı (α)	15 x 10 ⁻⁶ / °C	Besleme stoğunun genleşme katsayısı (α)	7,5 x 10 ⁻⁶ / °C
Sıcaklık farkı (ΔT)	1300 °C	Sıcaklık farkı (ΔT)	1300 °C
Ck 45 çeliğinin hacimsel çekmesi (ΔV)	5,15 mm ³	Besleme stoğunun hacimsel çekmesi (ΔV)	17,54 mm ³
Hacimsel çekme farkı: 12,39 mm ³			

ΔV : Hacimsel büzülme (mm³), ΔT : Sıcaklık farkı (°C), t_s : Ck45 çeliğinin kalınlığı (mm), d_{fi} : Besleme stoğunun iç çapı (mm), ΔL : Sıcaklık boyunca numune boyundaki değişim (mm), V_0 : İlk hacim (mm³), V_{0s} : Ck45 çeliğinin ilk hacmi (mm³), V_{of} : Besleme stoğunun ilk hacmi (mm³), t_f : Besleme stoğunun kalınlığı (mm), α : Termal genleşme katsayısı (1/°C), d_s : Ck45 çeliğinin çapı (mm), d_{fo} : Besleme stoğunun dış çapı (mm), L_i : Numune ilk boyu (mm)

Matematiksel hesaplamalar sonucunda sinterleme sıcaklığı arttıkça boşluk miktarının azaldığı görülmektedir. Deneysel ve matematiksel olarak gözlemlenen bu sonucu desteklemek için sonlu elemanlar analizi ANSYS yazılımı ile yapılmıştır. Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4’da verilen termal genleşme katsayısı değerleri, malzeme özellikleri programa girilmiştir. Sinterleme sıcaklığından sonra analiz yapılacağı için WC-%9Co malzemesinin özellikleri alınmıştır.

Malzeme özellikleri programa girildikten sonra mesh yapısı oluşturulmuş ve termal koşullar eklenmiştir. Yapılan analizler sonucunda parçanın soğuma aşamasında yüksek sıcaklıkta hacimsel çekme farkından dolayı daha fazla boşluk meydana geldiği görülmüştür (Şekil 6.19). Matematiksel ve analiz ile elde edilen teorik sonuçlar deneysel sonuçlar ile yakınlık göstermiştir. Malzemelerin farklı termal genleşme katsayılarından, malzeme boyutlarından ve besleme stoğunun çekme özelliklerinden kaynaklandığı görülmüş ve ispatlanmıştır [9, 136, 137, 139, 140].



Şekil 6.19. Sinterleme sıcaklığının boşluk oluşumuna etkisinin sonlu elemanlar analizi

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Bu çalışma bileşenler arası mikro boşluklu kendiliğinden montajlı küresel mafsalları üretimi için yeni bir yöntem sunmaktadır. Bu yöntem insört hazırlanması, arayüzey oluşturulması enjeksiyon işlemi, bağlayıcı giderme ve sinterleme aşamalarını kapsamaktadır.

- TEK’te hareketli montajlı parça üretimi tek aşamada gerçekleştirilmiştir.
- TEK’te montajlı parça üretiminin araştırılmasında, sıvı plastik, krom, akrilik esaslı boya, poliolefin daralan makaron, epoksi reçine, etil selüloz çözeltisi, nişasta çözeltisi, parafin-alümina tozu, poliamid, polietilen glikol çözeltisi, poliüretan, polivinil alkol çözeltisi, polivinil klorür, polimetilsiloksan-silica-asetoksilan ve teflon bant arayüzeyleri denenmiştir. Yalnızca krom ve sıvı plastik arayüzeylerden olumlu sonuç alınmıştır.
- Sıvı plastik kaplamanın sinterleme aşamasında yüksek sıcaklık ile buharlaşarak ortamdan giderilebilme özelliği, mafsallara hareketine olanak sağlamıştır.
- Küresel mafsallara hareketi için sıvı plastik arayüzey kalınlığının 500 µm veya daha fazla olması gerekmektedir.
- Krom arayüzeyin yüksek aktivasyon enerjisi, yüksek difüzyon katsayısı ve yüksek erime sıcaklığına sahip olması bileşenler arası boşluk oluşturarak, mafsallara hareketine olanak sağlamıştır.
- Sıvı plastik arayüzey kalınlığının artması boşluk miktarını arttırmıştır. Krom arayüzey kalınlığı ise boşluk oluşumuna etki etmemiştir.
- Sinterleme sıcaklığı arttıkça kullanılan enjeksiyon malzemesinin çekme miktarı arttığı için bileşenler arasındaki boşluk miktarının azaldığı görülmüştür.
- Deneysel çalışmalar gerçekleştirilmeden uygun D_i/D_e oranı belirlenebilmektedir. WC-%9Co besleme stoğunun termal genişleme katsayısı $5.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ bulunmuştur.
- D_i/D_e oranının 0,5 olduğu değerin kritik değer olduğu tespit edilmiştir. Daha düşük D_i/D_e oranlarında numunelerde hata gözlemlenmeyeceği sonucuna ulaşılmıştır. Deneysel çalışmalar, matematiksel hesaplamalar ve ANSYS sonuçları ile yakınlık göstermiştir. 0,45 ve 0,4 D_i/D_e oranına sahip numunelerde çatlama oluşmamıştır.
- D_i/D_e oranının artması birleşme bölgesindeki termal gerilme değerini arttırmıştır. D_i/D_e oranı 0,80 iken parçalarda, birleşme bölgesinde oluşan gerilme değeri maksimuma

ulaşmış (93,76031 MPa), D_i/D_e oranı 0,4 olduğunda ise termal gerilme minimum değerde olmuştur (40,60631 MPa).

- WC-%9Co besleme stoğunun enjeksiyon kalıplama işlemi sonrası dayanımı 56 MPa olarak hesaplanmıştır.

7.2. Öneriler

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda;

- Boşluk toleransının daha hassas ayarlanması konusunda geliştirmeler yapılabilir.
- Elde edilen parçanın mekanik testleri yapılarak sektörde kullanılan parçalar ile kıyaslanabilir.
- Sinterleme, vakum ortamında yapılarak kirlilik minimuma indirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Akkoyunlu, S., *Küresel mafsallarda aşınma dayanımının incelenmesi ve iyileştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2008. s. 18-25.
2. Bosscher, P. and I. Ebert-Uphoff. *A novel mechanism for implementing multiple collocated spherical joints in Robotics and Automation*, Paper presented at the ICRA'03 IEEE International Conference, Canada, 2003. p. 336-341.
3. İnternet: *Hareket Kontrol Sistemleri*. URL: <http://paskokusu.com/wp-content/uploads/2016/05/hareket-kontrol-sistemleri.pdf>, Son Erişim Tarihi: 24.05.2019.
4. Platzer, W., *Locomotor system*. Vol. 1. 2009: Thieme. p. 98.
5. Yang, Y.-q., et al., *Rapid fabrication of metallic mechanism joints by selective laser melting*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011: p. 0954405411407997.
6. Piotter, V., et al., *Metal and ceramic parts fabricated by microminiature powder injection molding*. International Journal of Powder Metallurgy, 2010. 46(2): p. 21.
7. Attia, U.M. and J.R. Alcock, *A review of micro-powder injection moulding as a microfabrication technique*. Journal of Micromechanics and microengineering, 2011. 21(4): p. 043001.
8. German, R.M., *Powder injection molding*. 1990: Cambridge Univ Press. p. 12.
9. Ruh, A., et al., *Production of two-material micro-assemblies by two-component powder injection molding and sinter-joining*. Microsystem Technologies, 2008. 14(12): p. 1805.
10. Chartier, T., et al., *Injection moulding of hollow silicon nitride parts using fusible alloy cores*. Ceramics international, 2001. 27(7): p. 821-827.
11. Zhang, S.X., et al. *Feasibility study on producing components with embedded channel by powder injection moulding*. in *Key Engineering Materials*. 2010. Trans Tech Publ, p. 401-405.
12. Williams, N. and P. Whittaker, *PM2010: Case studies highlight global success of Metal and Ceramic Injection Moulding*. Powder Injection Moulding International, 2010. 4(4): p. 48-54.
13. Attia, U., et al., *Creating movable interfaces by micro-powder injection moulding*. Journal of Materials Processing Technology, 2014. 214(2): p. 295-303.
14. German, R.M., *Powder metallurgy and particulate materials processing: the processes, materials, products, properties, and applications*. 2005: Metal powder industries federation Princeton, NJ, USA, p.231-232.

15. Baojun, Z., Q. Xuanhui, and T. Ying, *Powder injection molding of WC–8% Co tungsten cemented carbide*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2002. 20(5): p. 389-394.
16. Cheng, J., et al., *Fabrication of W–20wt.% Cu alloys by powder injection molding*. Journal of Materials Processing Technology, 2010. 210(1): p. 137-142.
17. Heng, S.Y., et al., *Effect of sintering temperature on the mechanical and physical properties of WC–10% Co through micro-powder injection molding (μ PIM)*. Ceramics International, 2013. 39(4): p. 4457-4464.
18. Heng, S., et al., *Micro-powder injection molding (μ PIM) of tungsten carbide*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014. 45: p. 189-195.
19. Fayyaz, A., et al., *Micro-powder injection molding of cemented tungsten carbide: feedstock preparation and properties*. Ceramics International, 2015. 41(3): p. 3605-3612.
20. Chen, G., et al., *Debinding behaviour of a water soluble PEG/PMMA binder for Ti metal injection moulding*. Materials Chemistry and Physics, 2013. 139(2): p. 557-565.
21. Samet, K., et al., *Toz enjeksiyon kalıplama ile üretilmiş tungsten karbür parçalarda bağlayıcı giderme süresinin ve parça boyutlarının ağırlık kaybına etkisinin araştırılması*. Anadolu Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi-B Teorik Bilimler. 6(1): p. 75-83.
22. Luo, T., et al., *Dimension precision of metal injection molded pure tungsten*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2009. 27(3): p. 615-620.
23. Zu, Y. and S. Lin, *Optimizing the mechanical properties of injection molded W4.9% Ni2.1% Fe in debinding*. Journal of Materials Processing Technology, 1997. 71(2): p. 337-342.
24. Mamen, B., et al., *Experimental and numerical analysis of the particle size effect on the densification behaviour of metal injection moulded tungsten parts during sintering*. Powder Technology, 2015. 270: p. 230-243.
25. Qu, X., et al., *Application of a wax-based binder in PIM of WC–TiC–Co cemented carbides*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2005. 23(4): p. 273-277.
26. Fayyaz, A., et al., *Fabrication of cemented tungsten carbide components by micro-powder injection moulding*. Journal of Materials Processing Technology, 2014. 214(7): p. 1436-1444.
27. Chang, R.-Y., et al. *Three-dimensional insert molding simulation in injection molding*. Paper presented at the Antec-conference, Detroit, 2004. p. 496-500.
28. Kim, S.H., et al., *Robust fabrication and evaluation of nanopattern insert molded parts*. European Polymer Journal, 2013. 49(6): p. 1437-1445.

29. Ananthanarayanan, A., et al. *Design of revolute joints for insert molding: A step towards realizing low cost highly articulated robot structures*. Paper presented at the International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, USA, 2010. p. 253-264.
30. Wang, J. and D. Chen, *Microcellular polypropylene single-polymer composites prepared by insert-microcellular injection molding*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016. 90: p. 567-576.
31. Liou, A., et al., *Development of a heat-generable mold insert and its application to the injection molding of microstructures*. Microelectronic Engineering, 2014. 117: p. 41-47.
32. Mao, Q., et al., *Insert injection molding of polypropylene single-polymer composites*. Composites Science and Technology, 2015. 106: p. 47-54.
33. Safarian, A., M. Subaşı, and Ç. Karataş, *Reducing debinding time in thick components fabricated by powder injection molding: Paper presented at "7th International Powder Metallurgy Conference and Exhibition"(TPM-7), 24–28 June 2014, Gazi University, Ankara, Turkey*. International Journal of Materials Research, 2015. 106(5): p. 527-531.
34. Shin, D., C. Han, and Y.S. Moon, *Ball stud inspection system using machine vision*. ISA transactions, 2002. 41(1): p. 3-11.
35. İnternet: *Motorlu Taşıtlar Mekaniği Ders Notu*. URL: http://hilmi.trakya.edu.tr/ders_notlari/mtm/MTM_Ders_norlari.pdf. Son Erişim Tarihi: 24.05.2019.
36. Park, J., et al., *Application of FE analysis for optimal design of caulking process*. Journal of materials processing technology, 2008. 198(1): p. 471-477.
37. Im, C., et al., *Computer aided process design in cold-former forging using a forging simulator and a commercial CAD software*. Journal of Materials Processing Technology, 1999. 95(1): p. 155-163.
38. Lee, Y.-S., et al., *Experimental and analytical evaluation for elastic deformation behaviors of cold forging tool*. Journal of Materials Processing Technology, 2002. 127(1): p. 73-82.
39. İnternet: *Malzeme Özellikleri*. URL: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9153>. Son Erişim Tarihi: 24.05.2019.
40. Ehrig, R.M., et al., *A survey of formal methods for determining the centre of rotation of ball joints*. Journal of biomechanics, 2006. 39(15): p. 2798-2809.
41. Erik, L. and S. Wolf-Dieter, *Tungsten: properties, chemistry, technology of the element, alloys, and chemical compounds*. New York. Plenum Publishers, 1999. p. 124-125.
42. Lassner, E. and W.-D. Schubert, *The element tungsten*, Tungsten. 1999, Springer. p. 1-59.

43. Erdoğan, M., A. Erol, and A. Yönetken, *WC-Co Esaslı Çizici Kalem Karakterizasyonu ve Mekaniksel Özellikleri*. Afyon Kocatepe University Journal of Science & Engineering, 2013. 13(2).
44. Li, T., et al., *Effects of lower cobalt binder concentrations in sintering of tungsten carbide*. Materials Science and Engineering: A, 2006. 430(1): p. 113-119.
45. Xiong, Y., et al., *A streamlined life cycle assessment on the fabrication of WC-Co cermets*. Journal of Cleaner Production, 2008. 16(10): p. 1118-1126.
46. Taheri-Nassaj, E. and S. Mirhosseini, *An in situ WC-Ni composite fabricated by the SHS method*. Journal of materials processing technology, 2003. 142(2): p. 422-426.
47. Upadhyaya, G. and S. Bhaumik, *Sintering of submicron WC-10wt.% Co hard metals containing nickel and iron*. Materials Science and Engineering: A, 1988. 105: p. 249-256.
48. Yonetken, A. and A. Erol, *Production and characterization of Ni-Co (WC) composites materials*. Agronomy Research, 2016. 14(Special Issue I): p. 1130-1137.
49. İnternet: *Tungsten Karbür Kesici Takımlar*. URL: <http://www.ttn-tateno.com/tr/urun-detay-tungsten-karbur-10.html>. Son Erişim Tarihi: 04.05.2019.
50. Ryu, T., et al., *Nanograined WC-Co composite powders by chemical vapor synthesis*. Metallurgical and Materials Transactions B, 2008. 39(1): p. 1-6.
51. Zhu, Y. and A. Manthiram, *Influence of processing parameters on the formation of WC-Co nanocomposite powder using a polymer as carbon source*. Composites Part B: Engineering, 1996. 27(5): p. 407-413.
52. Upadhaya, G., *Cemented tungsten carbide*. Noyes Publications, 1998. p. 12.
53. Mannesson, K., et al., *Analysis of WC grain growth during sintering using electron backscatter diffraction and image analysis*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2008. 26(5): p. 449-455.
54. Ban, Z.-G. and L. Shaw, *Synthesis and processing of nanostructured WC-Co materials*. Journal of Materials Science, 2002. 37(16): p. 3397-3403.
55. Wang, X., et al., *Mechanical properties and wear resistance of functionally graded WC-Co*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2013. 36: p. 46-51.
56. Pan, Y., D. Li, and H. Zhang, *Enhancing the wear resistance of sintered WC-Co composite by adding pseudo-elastic TiNi constituent*. Wear, 2011. 271(9): p. 1916-1921.
57. Krakhmalev, P., T.A. Rodil, and J. Bergström, *Influence of microstructure on the abrasive edge wear of WC-Co hardmetals*. Wear, 2007. 263(1): p. 240-245.
58. Saito, H., A. Iwabuchi, and T. Shimizu, *Effects of Co content and WC grain size on wear of WC cemented carbide*. Wear, 2006. 261(2): p. 126-132.

59. Karataş, Ç., *Toz Enjeksiyon Kalıplamada Karışımın Reolojisi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara, 1997: p. 30-85.
60. Schwartzwalder, K. *Injection molding of ceramic materials*. Paper presented at the Electrical Insulation, 1948 Conference, USA, 1948. p. 26-30.
61. Whalen, T. and C. Johnson, *Injection Molding of Ceramics*, in *Ceramics for High-Performance Applications III*. 1983, Springer. p. 293-307.
62. Hunold, K., J. Greim, and A. Lipp, *Injection-molded ceramic rotors--comparison of SiC and Si sub 3 N sub 4*. Powder Metallurgy International, 1989. 21(4): p. 17-23.
63. Matula, G., *Carbide alloyed composite manufactured with the Powder Injection Moulding method and sinterhardened*. ISSUES, 2010. 1: p. 2.
64. Merhar, J., *Overview of metal injection moulding*. Metal Powder Report, 1990. 45(5): p. 339-342.
65. Karataş, Ç. and S. Sarıtaş, *Toz Enjeksiyon Kalıplama: Bir Yüksek Teknoloji İmalat Metodu*. Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 1998. 13(2): p. 193.
66. İnternet: *TEK İşlem Basamakları*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Metal_injection_molding. Son Erişim Tarihi: 24.05.2019
67. Sarıtaş, S., M. Türker, and N. Durlu, *Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri*. Türk Toz Metalurjisi Deneği Yayınları, 2007. p. 5.
68. İnternet: *TEK'in Bazı İmalat Yöntemleri İle Adet-Karmaşıklık Derecesi Karşılaştırılması*. URL: http://ryamanoglu.com/index_htm_files/TMM_slayt1.pdf. Son Erişim Tarihi: 24.05.2019
69. İnternet: *TEK Yöntemi İle İmal Edilmiş Parçalar*. URL: <http://schwegmanindustrialsales.com/powderedmetals.html>. Son Erişim Tarihi: 24.05.2019
70. KARATAŞ, Ç., *Toz enjeksiyon kalıplama: bir yüksek teknoloji imalat metodu*, Gazi Üniversitesi, 1998. p. 1-100.
71. Iacocca, R., *A critical assessment of characterization tests needed to support powder injection molding component fabrication*. Rev. Part. Mater., 1994. 2: p. 269-313.
72. German, R.M., K.F. Hens, and S.P. Lin, *Key issues in powder injection molding*. American Ceramic Society Bulletin, 1991. 70(8): p. 1294-1302.
73. German, R.M. and A. Bose, *Injection molding of metals and ceramics*. 1997: Metal Powder Industries Federation. p. 120.

74. İnternet: *Toz Boyut Dağılımının Belirlenmesinin Şematik Olarak Anlatımı*. URL: <https://www.innopharmalabs.com/tech/applications-and-processes/particle-size-distribution>. Son Erişim Tarihi: 24.05.2019.
75. Sotomayor, M., A. Várez, and B. Levenfeld, *Influence of powder particle size distribution on rheological properties of 316L powder injection moulding feedstocks*. Powder Technology, 2010. 200(1): p. 30-36.
76. İnternet: *TEK İçin Üretilmiş Örnek Bir Toz İçin Toz Boyut Analizi*. URL: <https://www.innopharmalabs.com/tech/applications-and-processes/particle-size-distribution>. Son Erişim Tarihi: 24.05.2019.
77. Messier, R.W., *An industrially sponsored research programme in PIM*. Metal Powder Report, 1990. 45(5): p. 363-370.
78. Oliveira, R.V., et al., *Ceramic injection moulding: influence of specimen dimensions and temperature on solvent debinding kinetics*. Journal of materials processing technology, 2005. 160(2): p. 213-220.
79. German, R., *Optimization of the powder-binder mixture for powder injection molding*. 1989 Advances in Powder Metallurgy., 1989. 3: p. 51-65.
80. Monte, S.J. and G. Sugerman, *Processing of composites with titanate coupling agents—a review*. Polymer Engineering & Science, 1984. 24(18): p. 1369-1382.
81. MANGELS, J.A., *Development of injection molded reaction bonded Si₃N₄*. Ceramics for high performance applications- II, 1978: p. 113-130.
82. Raman, R., et al. *Experimental evaluation of the mixing process for the preparation of feedstock for powder injection molding*. Paper presented at the Ceramic Engineering and Science Proceedings, Ohio, 1993. p. 166-186.
83. Hens, K. and D. Kupp, *Advanced production methods for different PIM feedstocks*. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials--1995., 1995. 2: p. 6.
84. Kwon, T. and S. Ahn, *Slip characterization of powder/binder mixtures and its significance in the filling process analysis of powder injection molding*. Powder technology, 1995. 85(1): p. 45-55.
85. Hunt, K., J.R. Evans, and J. Woodthorpe, *The influence of mixing route on the properties of ceramic injection moulding blends*. British ceramic. Transactions and journal, 1988. 87(1): p. 17-21.
86. İnternet: *Bir Enjeksiyon Kalıplama Makinesinin Kesiti*. URL: <http://hassanplas.com/injection-molding-machine/>. Son Erişim Tarihi: 24.05.2019.
87. Urtekin, L., *Toz enjeksiyon kalıplanmış steatit seramiklerin özelliklerine kalıplama ve sinterleme parametrelerinin etkisinin incelenmesi*, Doktor Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008. s. 30-50.

88. Hens, K.F., L. Daeyong, and R. German, *Processing conditions and tooling for powder injection molding*. International journal of powder metallurgy, 1991. 27(2): p. 141-153.
89. Hens, K. *Tooling and injection moulding powder injection moulding*. Paper presented at the Proceedings of the International Powder Injection Moulding Symposium. 1995. p. 25-50.
90. Erickson, A. and R. Wiech Jr, *Injection Molding*. Metals Handbook, 1984. 7: p. 495-500.
91. Heaney, D.F., *Handbook of metal injection molding*. 2012: Elsevier. p.100-150.
92. Liu, W., et al., *Fabrication of 93W–Ni–Fe alloy large-diameter rods by powder extrusion molding*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014. 42: p. 233-239.
93. Hwang, K.-S., *Fundamentals of debinding processes in powder injection molding*. Reviews in particulate Materials, 1996. 4: p. 71-104.
94. Lin, S. and R.M. German, *Extraction debinding of injection molded parts by condensed solvent*. Powder Metall. Int., 1989. 21(5): p. 19-24.
95. Billmeyer, F.W., *Textbook of Polymer Science*, John Wiley & Sons. INC, New York, 1971. p. 35-50.
96. Karatas, C., *Tozların Sıkıştırma (Biçimlendirme) Methodları ve Toz Metalurjisi Uygulamaları*, Makina Tasarım Teorisi ve Modern İmalat Yöntemleri Konferansında sunuldu, Ankara, 1997. p. 50-60.
97. Dopfer, D., et al., *Adhesion mechanisms between water soluble particles*. Powder technology, 2013. 238: p. 35-49.
98. Kalpakjian, S., *Manufacturing engineering and technology*. 2001: Pearson Education India. p.22-25.
99. Savaşkan, T., *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*. 1999: Derya Kitabevi. p. 15-30.
100. Fang, Z.Z., et al., *Synthesis, sintering, and mechanical properties of nanocrystalline cemented tungsten carbide—a review*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2009. 27(2): p. 288-299.
101. Özel, T. and E. Zeren. *Finite element method simulation of machining of AISI 1045 steel with a round edge cutting tool*. Paper presented at the 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, Germany, 2005. p. 533-542.
102. İnternet: *Polymer Systems and Film formation Mechanisms in High Solids, Powder, and UV Cure Systems*. URL: <http://www.swst.org/wp/meetings/AM04/Baghdachi.pdf>. Son Erişim Tarihi: 24.05.2019.

103. White, J.L. and D. Choi, *Polyolefins: processing, structure development and properties*. 2005: Hanser Verlag. p. 120-130.
104. Mortier, R.M., S.T. Orszulik, and M.F. Fox, *Chemistry and technology of lubricants*. Vol. 107115. 2010: Springer. p. 56-75.
105. Needham, D.E., I.C. Wei, and P.G. Seybold, *Molecular modeling of the physical properties of alkanes*. Journal of the American Chemical Society, 1988. 110(13): p. 4186-4194.
106. George, C.A., W.J. Schultz, and W.L. Thompson, *High temperature epoxy adhesive films*. 2003, Google Patents.
107. Hakiki, F., et al., *Preliminary Study on Epoxy-Based Polymer for Water Shut-off Application*. Paper presented at the Thirty-Ninth Annual Convention & Exhibition, Indonesia, 2015. p. 26-28
108. May, C., *Epoxy resins: chemistry and technology*. 2018: Routledge. p. 150-180.
109. Feller, R.L. and M.H. Wilt, *Evaluation of cellulose ethers for conservation*. 1991: Getty Publications. p. 122-132.
110. Brown, W.H., T. Poon, and T. Poon, *Introduction to organic chemistry*. 2014: John Wiley & Sons. p. 225-228.
111. Panichnava, S. and P. Nimityongskul, *Development of Particle Boards from Vetiver Grass*. 2002, Master dissertation, Asian Institute of Technology, 2002. p. 160-170.
112. Freund, M., *Paraffin products: properties, technologies, applications*. Vol. 14. 1982: Elsevier Science Limited. p. 120-125.
113. Palmer, R.J., *Polyamides, plastics*. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 2005.
114. Kahovec, J.a., R. Fox, and K. Hatada, *Nomenclature of regular single-strand organic polymers (IUPAC Recommendations 2002)*. Pure and Applied Chemistry, 2002. 74(10): p. 1921-1956.
115. Bayer, O., *Das di-isocyanat-polyadditionsverfahren (polyurethane)*. Angewandte Chemie, 1947. 59(9): p. 257-272.
116. Seymour, R.B. and G.B. Kauffman, *Polyurethanes: a class of modern versatile materials*. Journal of chemical education, 1992. 69(11): p. 909.
117. Schnepf, M.J., et al., *Nanorattles with tailored electric field enhancement*. Nanoscale, 2017. 9(27): p. 9376-9385.
118. Tahira, B.E., et al., *A Review: Thermal Degradation and Stabilization of Poly (Vinyl Chloride)*. International Journal of Research, 2014. 1(6): p. 732-750.

119. Wilkes, C.E., et al., *PVC Handbook*. 2005: Hanser. p.180-188.
120. Munekata, S., *Fluoropolymers as coating material*. Progress in Organic Coatings, 1988. 16(2): p. 113-134.
121. Carraher Jr, C.E., *Introduction to polymer chemistry*. 2017: CRC press. p. 300-302
122. Brandrup, J., et al., *Polymer handbook*. Vol. 7. 1989: Wiley New York etc. p. 250-288.
123. Mizutani, U., *Hume-Rothery rules for structurally complex alloy phases*. 2016: CRC Press. p.125-130.
124. Mehrer, H., *Diffusion in solids: fundamentals, methods, materials, diffusion-controlled processes*. Vol. 155. 2007: Springer Science & Business Media. p. 227-228.
125. Sun, R., *Diffusion of cobalt and chromium in chromite spinel*. The Journal of Chemical Physics, 1958. 28(2): p. 290-293.
126. Gale, W.F. and T.C. Totemeier, *Smithells metals reference book*. 2003: Butterworth-Heinemann. p.450-465.
127. Takasawa, K., et al., *Diffusion of Cr and Fe in a high-purity Fe-50 mass% Cr-8 mass% W alloy*. Materials Transactions, 2002. 43(2): p. 178-181.
128. Ani, S.M., et al., *Binder removal via a two-stage debinding process for ceramic injection molding parts*. Ceramics International, 2014. 40(2): p. 2819-2824.
129. Tepperneegg, T., et al., *High temperature mechanical properties of WC–Co hard metals*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2016. 56: p. 139-144.
130. Beer, F.P., et al., *Mechanics of Materials*, McGraw-Hill. 2006, Boston. p. 322-335.
131. Schaub, M., et al., *Molded Optics: Design and Manufacture*. 2016: CRC press. p.126-129.
132. Choi, S., H. Cho, and S. Kumai, *Influence of precipitation on the coefficient of thermal expansion of Al–Si–Mg–Cu–(Ti) alloys*. Journal of Alloys and Compounds, 2016. 655: p. 6-10.
133. Sen, F., Y. Pekbey, and O. Sayman, *Elastic-plastic stress analysis of a thermoplastic composite disc under parabolic temperature distribution*. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, 2007. 14: p. 282-288.
134. Park, M., K.C. Alexander, and C.A. Schuh, *Diffusion of tungsten in chromium: Experiments and atomistic modeling*. Journal of Alloys and Compounds, 2014. 611: p. 433-439.
135. Keinonen, J., J. Räisänen, and A. Anttila, *Diffusion of nitrogen in ion-implanted chromium and tungsten*. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 1984. 35(4): p. 227-232.

136. Piotter, V., et al., *Powder injection moulding of metallic and ceramic micro parts*. Microsystem Technologies, 2011. 17(2): p. 251.
137. Merz, L., et al., *Powder injection molding of metallic and ceramic microparts*. Microsystem Technologies, 2004. 10(3): p. 202-204.
138. Beer, F.P., et al., *Mechanics of materials*. MacGraw-Hill Engineering Series, 1992. p. 30-40.
139. Samet, K., et al., *Toz enjeksiyon kalıplamada krom arayüzeyi kullanılarak montajlı parça imalatının araştırılması*. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2018. 2018(2018). p.18-1.
140. Ruh, A., et al., *The development of two-component micro powder injection moulding and sinter joining*. Microsystem technologies, 2011. 17(10-11): p. 1547.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YILMAZ, Oğuz
 Uyuğu : TÜRKİYE
 Doğum tarihi ve yeri : 06.07.1993, İzmir
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : +90 5382427770
 e-mail : oguz.yilmaz2@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / İmalat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Manisa Celal Bayar Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2015
Lise	Yunus Emre Anadolu Lisesi	2011

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Bozok Savunma Medikal ve Mühendislik San. Tic. Ltd. Şti.	Tasarım Mühendisi
2016-2017	Gazi Üniversitesi	Proje Asistanı

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

Yayınlar

Konferans:

1. Yılmaz, O., Samet K., Koçak H., Karataş, Ç. (2017, April). *An investigation of the optimum insert diameter/molding diameter ratio by inserted powder injection molding*, Paper presented at the 3rd International Iron & Steel Symposium, Karabük.

2. Yılmaz, O., Samet K., Koçak H., Karataş, Ç. (2017, April). *The investigation of producibility of assembled parts with spherical shaped and movable interface by powder injection molding method*, Paper presented at the 2nd International Defense Industry Symposium, Kırıkkale

ISI (WOS):

1. Samet, K , Yılmaz, O , Koçak, H , Safarian, A , Karataş, Ç . (2018). Toz Enjeksiyon Kalıplama İle Üretilmiş Tungsten Karbür Parçalarda Bağlayıcı Giderme Süresinin Ve Parça Boyutlarının Ağırlık Kaybına Etkisinin Araştırılması. *Anadolu Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi - B Teorik Bilimler*, 6(1), 75-83.
2. Samet, K. , Yılmaz, O. , Kocak, H., Karatas, C. (2018). Toz Enjeksiyon Kalıplamada Krom Arayüzeyi Kullanılarak Montajlı Parça İmalatının Araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 621-634

Hobiler

Mühendislik dergileri okumak, Basketbol, Film izlemek, Kitap okumak, Müzik dinlemek

DİZİN

A

ABSTRACT · vii
ANSYS · xiii, 52, 59, 60, 61, 62, 63, 77, 78
arayüzey · iv, x, xv, 2, 9, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38,
39, 40, 46, 49, 63, 67, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 78

B

bağlayıcı giderme · iv, x, xiii, xv, 1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 13,
16, 18, 20, 22, 26, 41, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 54, 63,
65, 78
besleme stoğu · x, 5, 13, 57, 72
boşluk · iv, x, xiv, 1, 9, 10, 23, 26, 30, 39, 40, 65, 67,
69, 70, 71, 72, 73, 75, 77, 78

C

Ck45 · iv, v, x, xvii, 30, 52, 53, 56, 57, 63, 67, 69, 72,
73, 75, 76, 77

Ç

Çizelge · x, xi, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 29, 30, 36,
37, 40, 44, 45, 46, 50, 51, 56, 57, 58, 64, 65, 69, 73,
74, 75, 76, 77, 90

D

D₁/D_e · viii, x, xiii, xviii, 49, 52, 53, 54, 57, 58, 59, 60,
61, 62, 63, 78, 79
difüzyon · x, 26, 28, 37, 72, 74, 75, 78
dilatometre · viii, xiii, xv, 52, 53, 54, 67

G

gerilme · xviii, 53, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 79
GİRİŞ · vii, 1

H

hacimsel çekme · xi, 2, 9, 67, 70, 71, 75, 76, 77

İ

insört · iv, viii, xii, xv, 5, 6, 30, 31, 37, 38, 39, 40, 42,
43, 46, 49, 52, 53, 57, 58, 59, 64, 70, 72, 74, 78

K

Kalıp · xii, xiii, 13, 16, 25, 26, 42, 43, 44, 45
kaplama kalınlığı · xv, 39, 40, 69, 73
kaybolma sıcaklığı · xv, 37, 38, 72
krom · iv, xvi, 38, 39, 46, 63, 72, 74, 78, 86
küresel · iv, xii, xv, 1, 2, 7, 8, 9, 16, 18, 30, 39, 42, 69,
75, 78, 79

M

Mafsal · 1, 7, 36, 67
montajlı parça · iv, 1, 2, 39, 40, 41, 63, 72, 78, 86

R

Resim · xv, xvi, 29, 30, 31, 37, 38, 39, 41, 44, 45, 46,
47, 51, 52, 53, 54, 55, 64, 66, 67, 68, 69, 70, 72, 73,
74

S

sıvı plastik · iv, xv, 36, 37, 38, 63, 66, 70, 72, 78
SİMGELER · vii, xvii
Sinterleme · iv, vii, viii, xii, xiv, 3, 5, 9, 13, 16, 26, 27,
28, 30, 39, 40, 41, 49, 67, 69, 73, 75, 77, 78, 79

Ş

Şekil · xii, xiii, xiv, 7, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19,
20, 23, 24, 25, 28, 40, 41, 42, 43, 44, 47, 48, 49, 51,
53, 54, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 67, 68, 71, 75,
76, 77, 91

T

TEK · iv, vii, x, xii, 1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 12, 13, 14, 15,
16, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 39, 40, 41, 45, 71,
78, 83
termal genleşme · xviii, 52, 55, 75, 76, 77, 78
TEŞEKKÜR · vi, vii
Toz · iv, vi, vii, xii, xvii, xviii, 2, 5, 12, 14, 16, 18, 19,
22, 23, 29, 44, 83, 84, 86, 88
Toz enjeksiyon kalıplama · iv, 14, 19
tungsten · xii, xviii, 10, 11, 12, 37, 82, 88

W

WC-%9Co · iv, v, viii, xiii, xv, 3, 29, 40, 46, 47, 48,
49, 50, 52, 53, 54, 55, 63, 67, 72, 76, 77, 78, 79



GAZİ GELECEKTİR..