

**YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM PROSESİNDE ÜRÜN
KALİTESİNE ETKİ EDEN ÜRETİM
PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU**

Ayberk AYDIN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM PROSESİNDE ÜRÜN KALİTESİNE ETKİ
EDEN ÜRETİM PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU**

Ayberk AYDIN
0000-0001-8375-2731

Doç. Dr. Rukiye ERTAN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2020
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM PROSESİNDE ÜRÜN KALİTESİNE ETKİ EDEN ÜRETİM PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Ayberk AYDIN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Rukiye ERTAN

Müşteri memnuniyetini sağlamak ve üst seviyede tutabilmek için kaliteli ürün üretebilmek ve kaliteli ürün üretiminin sürekliliğini sağlamak bir zorunluluktur. Müşteriye istenilen özelliklere sahip olmayan bir nihai ürünün gönderilmesi, müşterinin gözünde saygınlık kaybına ve ilerleyen dönemde işletmenin para kaybederek kârlılığın azalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple, kaliteli ürün üretmek amacıyla henüz ürün geliştirme aşaması esnasında nihai ürünün kalitesini korumak amacıyla devreye alınan uygulamalar, firmaların rekabet edebilirliklerini korumaları için çok büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, binek araçlarda kullanılan emniyet kemerine ait bileşenlerden birinin sıcak hazneli yüksek basınçlı döküm makinesi ile üretim prosesi ele alınmıştır. Öncelikle sıcak hazneli yüksek basınçlı döküm prosesinde ürün kalitesine doğrudan etkisi bulunan enjeksiyon parametreleri ve bu parametrelerin her birine ait farklı seviyeler belirlenmiştir. Sonrasında bu parametrelerin hangi seviyede ürünün kalite karakteristiklerini en iyiledikleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu amaç doğrultusunda bir eniyileme yöntemi olan Taguchi yöntemi ve kolon bazlı çalışan bir istatistiksel yazılım olan MINITAB v.19.1.1. programı kullanılarak ürünün kalite karakteristiklerinin en iyi halde bulunduğu parametre seviyeleri başta seçilen parametreler için belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek basınçlı döküm, Taguchi metodu, Zamak 5, MINITAB, çekme testi, sertlik testi

2020, vii + 44 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

OPTIMIZATION OF PRODUCTION PARAMETERS AFFECTING PRODUCT QUALITY IN HIGH PRESSURE CASTING PROCESS

Ayberk AYDIN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Assoc. Dr. Rukiye ERTAN

Production of products with high quality standards is highly important for customer satisfaction. Companies, also must maintain their high quality standards to be competitive in the market. Production of parts with quality problems causes customer dissatisfaction and this situation affects companies' reputation in general. Therefore applications and methods to maintain high quality level becomes more popular for companies which want to keep their competitive power.

In this study, production of a component of a seatbelt mechanism with high pressure die casting method is subjected. The material used during production is Zamak 5. Study begins with the determination of three different production parameters which directly effects the quality of products. After the determination of three different parameters, three different levels of those parameters are also determined and parts are produced with determined parameters. After the production of parts, tensile test and hardness test are applied on parts and best parameter levels are chosen to reach the highest mechanic features on parts with using L9 Taguchi's orthogonal array. The software program used during Taguchi analysis is MINITAB 19.1.1.

Key words: High pressure casting process, Taguchi method, Zamak 5, MINITAB, tensile test, hardness test

2020, vii + 44 pages.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Kaynak Araştırması.....	3
2.2. Kapsam ve Amaç	5
2.3. Basınçlı Döküm Prosesinde Kullanılan Malzemeler	6
2.4. Döküm Prosesi	10
2.4.1. Döküm Prosesinin Sınıflandırılması	11
2.4.2. Basınçlı Döküm Prosesi	12
2.4.3. Sıcak Hazneli Basınçlı Döküm Prosesi.....	14
2.5. Basınçlı Döküm Prosesinde Genel Akış Teorisi.....	18
2.6. Sıcak Hazneli Yüksek Basınçlı Döküm Prosesinde Faz Kavramı	20
2.7. Basınçlı Dökümde Parça Kalitesine Etki Eden Parametreler	22
3. MATERYAL VE YÖNTEM	25
3.1. Deneysel Tasarım Yöntemleri.....	25
3.2. Taguchi Yöntemi.....	27
3.3. Çekme Deneyi.....	33
3.4. Sertlik Deneyi.....	34
3.5. Numune Üretiminin Gerçekleştirilmesi	35
3.6. Çekme Deneyi Uygulaması.....	37
3.7. Sertlik Deneyi Uygulaması	39
4. BULGULAR	40
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	47
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	53

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
S	Strok mesafesi (mm)
V	Hız (mm/s)
F	Kuvvet (N)
Δl	Uzama (mm)
A_0	Alan (mm ²)
σ	Çekme mukavemeti (MPa)

Kısaltmalar	Açıklama
HB	Brinell sertlik değeri
S/N	Sinyal / Gürültü oranı
SG_N	Sinyal / Gürültü oranı nominal en iyi
SG_B	Sinyal / Gürültü oranı en büyük en iyi
SG_K	Sinyal / Gürültü oranı en küçük en iyi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Otomobil üzerinde kullanılan ve çinko alaşımlarından üretilmiş parçalar	10
Şekil 2.2. Döküm yönteminin genel ve alt sınıflandırması.....	12
Şekil 2.3. Basınçlı döküm yöntemlerinin sınıflandırılması	13
Şekil 2.4. Sıcak hazneli bir döküm makinesine ait örnek şema.....	15
Şekil 2.5. Sıcak hazneli bir basınçlı döküm makinesinde pota ve kalıp bağlantılarını sağlayan elemanlar (Anonim 2020)	15
Şekil 2.6. Sıcak hazneli basınçlı döküm makinesinde ergimiş metalin kalıp boşluğunu doldurması.....	16
Şekil 2.7. Sıcak hazneli basınçlı döküm makinesinde dökümü yapılan parçanın kalıbın hareketli yarısında kalması.....	17
Şekil 2.8. Sıcak hazneli bir basınçlı döküm makinesinde dökümü gerçekleştirilen parçanın kalıptan çıkartılması	17
Şekil 2.9. Yolluk içerisinde ergimiş metalin laminar akışı.....	19
Şekil 2.10. Yolluk içerisinde oluşan türbülanslı akış.....	19
Şekil 2.11. Sıcak hazneli basınçlı döküm prosesinde hız-basınç-strok grafiğinin birinci faz bölgesi kısmı (Bonollo 2014).....	21
Şekil 2.12. Sıcak hazneli basınçlı döküm prosesinde hız-basınç-strok grafiğinin ikinci faz bölgesi kısmı	21
Şekil 2.13. Basınçlı dökümde ürün kalitesine etki eden parametrelerin Ishikawa diyagramı ile gösterimi (Apparao ve Birru 2016).....	22
Şekil 3.1. Bir sistem veya prosese (sürece) ait proses modeli (Yang 2003).....	26
Şekil 3.2. Taguchi yöntemine göre kalite mühendisliği kavramının ayrılması (Baynal 2003)	29

Şekil 3.3. Örnek bir gerilme-uzama grafiği	34
Şekil 3.4. Numune üretiminin gerçekleştirildiği basınçlı döküm makinesi.....	36
Şekil 3.5. DIN 50125 standardında yer alan E tipi numune ölçüleri (DIN 50125:2004)	37
Şekil 3.6. Çekme deneyinin gerçekleştirildiği çekme deneyi cihazı	37
Şekil 3.7. Tez çalışmasında kullanılmak üzere Zamak 5 numuneler.....	38
Şekil 3.8. Sertlik deneyinin gerçekleştirildiği sertlik ölçüm cihazı	39
Şekil 4.1. Çekme testi uygulanmış parçalar.....	41
Şekil 4.2. Sertlik ölçüm sonuçlarına göre bulunan S/N grafiği	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Basınçlı dökümde kullanılan bazı metal alaşımlarının mekanik özellikleri.	7
Çizelge 3.1 Taguchi`nin kalite sistemi (Baynal 2003).....	30
Çizelge 3.2. Taguchi ortogonal dizi seçim tablosu	32
Çizelge 3.3. Çekme numunelerinin üretiminde değiştirilen parametreler ve seviyeleri.	35
Çizelge 3.4. Zamak 5 malzemenin kimyasal kompozisyonu.....	35
Çizelge 3.5. Deney numunelerinin üretiminde kullanılan proses parametrelerinin L9 ortogonal dizisine uygulanması	36
Çizelge 3.6. Çekme deneyinin gerçekleştirilme parametreleri	38
Çizelge 4.1. Çekme mukavemeti ve proses parametrelerinin L9 ortogonal tablosunda gösterimi.....	40
Çizelge 4.2. Üretim parametrelerinin çekme mukavemeti üzerine etkileri	43
Çizelge 4.3. Sertlik deneyi sonuçları	44
Çizelge 4.4. Parametre değerlerinin ve sertlik sonuçlarının L9 ortogonal dizisinde gösterimi.....	44
Çizelge 4.5. Parametre seviyeleri- S/N değerleri çizelgesi (sertlik deneyi için)	45
Çizelge 4.6. Üretim parametrelerinin sertlik değeri üzerine etkileri	46

1. GİRİŞ

İnsanlık, var oluşundan bu yana varlığını sürdürebilmek ve hayatını daha kolay idame ettirebilmek amacıyla sürekli olarak kendi işine yarayacak araç ve gereçler üretme çabası içinde olmuştur. Bu çaba sürecinde insanlık pek çok farklı üretim yöntemini keşfetmiş ve kullanmıştır. Bunun yanında keşfedilen üretim yöntemleri de keşfedildiği halde kalmamış, zaman içinde bu yöntemler de daha verimli hale gelecek şekilde gelişmiştir. İnsanlığı keşfettiği bu üretim yöntemlerinden bazıları, içinde bulunduğumuz modern zamanda veya bu zaman dilimine yakın bir periyotta keşfedilmişken, bazı üretim yöntemleri ise insanlık tarihinin başlangıcından beridir günümüze kadar kullanılmıştır.

Döküm, insanlığın keşfettiği en temel ve en eski üretim yöntemlerinden bir tanesidir. Bu yöntemde önce elde edilmesi istenen nihai parçanın şekline sahip bir kalıp boşluğu hazırlanmaktadır. Daha sonra metal veya metal alaşımı ergitilerek sıvı hale getirilmekte ve önceden hazırlanan kalıp boşluğunun içerisine dökülmektedir. Döküm yöntemi ile çok basit veya çok karmaşık geometrilere sahip parçalar üretilebilmektedir (Çiğdem, 2006).

Döküm yöntemi kullanılarak üretilen parçalarda geometrik kısıtlar ve parça ağırlığındaki kısıtlar yok denecek kadar azdır. Döküm yöntemi kullanılarak üretilen parçalarda boyutlar birkaç milimetre değerinden birkaç metreye, ağırlıklar ise birkaç gramdan birkaç tona kadar ulaşabilmektedir. Döküm yönteminin en önemli avantajlarından biri bu yöntem ile üretilen parçalarda ek bir talaşlı işleme genellikle gerek olmamasıdır. Bu nedenle talaşlı işlem uygulanabilirliği ve deforme edilebilirliği düşük olan malzemeler döküm yöntemi ile kolaylıkla üretilebilmektedir. Ayrıca ikincil işlemlere duyulan gereksinimin az olması, nihai parçanın üretim maliyetini de azaltmaktadır. Sonuç olarak döküm yöntemi sayılan bu avantajlarla beraber üretim yapan şirketler tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır (Çiğdem, 2006).

Döküm yönteminin bir diğer büyük avantajı da sürdürülebilir kalitenin bu yöntemde diğer üretim yöntemlerine göre daha ulaşılabilir olmasıdır. Döküm prosesinde otomasyon imkanları oldukça yüksektir ve seri üretimde sağlanan yüksek otomasyon oranı ile

prosesin gerçekleřmesi halinde ortaya çıkması muhtemel insan kaynaklı hata olasılıđı oldukça dūřuk bir seviyeye inmektedir. Bu sayede sūrdūrūlebilir kalite ve otomotiv endūstrisinde hedeflenen sıfır hata hedefi, gerçekleřtirilebilir bir hedef haline gelmektedir.

Dōkūm yōntemi kullanılarak ūretilen parçalar otomotiv bařta olmak ūzere beyaz eřya, savunma, elektronik, ev eřyaları ve birçok farklı sektōrde kullanılmaktadır. Son yıllara bakıldığında dūnyada ve ūlkemizde dōkūm yōntemi kullanılarak ūretilen parçaların sayısı ve çeřitliliđi sūrekli artmaktadır. Őzellikle dōkūm yōnteminde kullanılabilecek yeni malzeme çeřitlerinin ve daha kullanıřlı olan yeni ve farklı dōkūm yōntemlerinin keřfedilmesi ile dōkūm sanayi çok daha rekabetçi bir hale gelmiřtir. Bu rekabetçi pazarda dōkūm řirketleri kendi paylarını arttırmak ve rekabet edebilirliklerini korumak amacıyla yeni teknolojileri sūrekli olarak takip etmek ve mevcut proseslerini sūrekli olarak geliřtirmek zorunluluđundadır.

Bu tez çalıřması kapsamında, dōkūm yōntemlerinden bir tanesi olan sıcak hazneli basınçlı dōkūm yōnteminde mevcut ūretim parametreleri ele alınmıř ve bu parametrelerin optimizasyonu yapılmıřtır. Ardından optimize edilmiř yeni parametre deđerlerinin nihai ūrūne etkisi incelenmiřtir.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kaynak Araştırması

Günümüz otomotiv dünyasında sıfır iş kazası ve sıfır hata ile üretim gerçekleştirmek düşüncesi otomobil üreticileri tarafından benimsenmiştir. Bu düşüncüyü benimseyen otomobil üreticileri kendi tedarikçilerini de aynı düşünce yapısında çalışmaya sevk etmektedirler. Bu sebeple tedarik zincirindeki bütün paydaşlar kendi üretim hatlarını sıfır hata ve sıfır iş kazası hedefleri koyarak yönetmektedirler.

Otomotiv dünyasının büyük bir kısmı için hedeflerden biri olan sıfır hata ile üretim, mevcut üretim prosesinin mükemmelleştirilerek hatalı parçaların üretiminin imkansız hale gelmesi ile sağlanabilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, otomobillerde üst düzey güvenlik ekipmanlarından olan emniyet kemeri ve hava yastıklarına ait komponentlerin üretildiği sıcak kamaralı basınçlı döküm prosesini inceleyerek bu prosese ait üretim parametrelerinin değişik seviyelerdeki değerlerinin nihai ürüne etkisi incelenecektir.

Rao, Kalyankar ve Waghmare (2014) çalışmalarında basınçlı döküm prosesinde pota sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, birinci faz hızı, ikinci faz hızı ve üçüncü faz hızı parametreleri optimizasyon için seçilmiştir. Bu optimizasyon çalışmasında öğretim-öğrenme temelli algoritma kullanılmış ve sadece 10 farklı parametre değeri ile optimizasyonu yapılan parametrelerin porozite üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, diğer optimizasyon metotları ile 1000 adet farklı seviye değerinin belirlenmesi ve hesaplama çok fazla vakit ayrılması gereken optimizasyon işlemi, öğretim-öğrenme metodu ile 10 farklı parametre değeri için ve çok kısa bir hesaplama süresinden sonra diğer optimizasyon yöntemleri ile aynı sonuçlara sahip bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Apparao ve Birru (2017) gerçekleştirdikleri çalışmada alüminyum basınçlı döküm prosesinde döküm parametrelerinin Taguchi metodu ile optimizasyonu yapılmış ve döküm hatalarından bir tanesi olan ve nihai ürünün mekanik özelliklerini kötü yönde etkileyen porozite problemi giderilmiştir. Bu çalışmada optimizasyonu yapılmak üzere toplamda dört adet parametre seçilmiş ve bu parametrelerin her biri için üç farklı seviye ile çalışılmıştır. Çalışmada L9 ortogonal dizilimi kullanılmıştır. Çalışma sonunda ergimiş metalin hazneye döküm sıcaklığı, kalıp doldurma süresi, kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon basıncı parametrelerinin alüminyum dökümde oluşan poroziteye etki ettikleri görülmüş, bu farklı dört parametre için ayrı ayrı optime edilmiş seviyeleri belirlenmiştir.

Kumar ve ark. (2013), bir alüminyum döküm alaşımı olan SAE 308'in basınçlı döküm prosesinde oluşan porozite problemini gidermek amacıyla Taguchi metodu ile ANOVA'yı kullanarak döküm prosesine ait seçilmiş olan dört adet parametresini optimize etmişlerdir. Her bir parametre için farklı üç adet seviye belirlenmiş ve sonrasında L9 ortogonal dizilimi kullanılarak üç farklı örnek parçanın porozite değerleri ölçülmüştür. Bu çalışma sonucunda birinci faz hızı, ikinci faz hızı, birinci faz başlama mesafesi ve enjeksiyon basıncı parametrelerinin ayrı ayrı dökümde porozite hatasına etki ettikleri görülmüştür. Bununla beraber bu parametreler arasından enjeksiyon basıncı parametresinin porozite hatasında en büyük etkiye sahip olduğu saptanmıştır.

Balikai ve ark. (2018) çalışmalarında, ADC 12 alüminyum alaşımının kullanıldığı bir basınçlı döküm prosesinde porozite hatasına sebebiyet veren dört adet parametre değerini seçmişler ve Taguchi ile ANOVA kullanılarak bu parametrelerin optimizasyon işlemini gerçekleştirip, döküm parçada porozite hatasını azaltmışlardır. Bu çalışmada optimizasyon işlemi yapılacak proses parametreleri yoğunlaştırma basıncı, birinci faz hızı, ikinci faz hızı ve ergimiş metal sıcaklığı olarak seçilmiştir. L25 ortogonal dizilimi kullanılarak yapılan optimizasyon işlemi sonucunda hangi parametrenin porozite hatasında daha etkin olduğu belirlenmiş ve her bir parametre için optimum değerler tayin edilmiştir.

Adke ve Karanjkar (2014) yaptıkları çalışmada 20 tonluk kapasiteye sahip bir basınçlı döküm makinesinde dört farklı proses parametresinin üç farklı seviyesi için Taguchi yöntemi ile optimizasyon yaparak parça üretimi için gerekli olan çevrim süresi değerini aşağıya çekmişlerdir. Enjeksiyon basıncı, piston hızı, ergime sıcaklığı ve soğutma süresi parametrelerinin Taguchi yöntemi ile optimizasyonunda L9 ortogonal dizilimi seçilmiştir. Sonuç olarak çevrim süresinin daha aşağıda bir değere çekilebildiği optimum parametre değerleri tespit edilmiştir.

Syrcos (2002) gerçekleştirdiği çalışmada, $AlSi_9Cu_3$ alaşımının kullanıldığı basınçlı döküm prosesi ile üretilen bir parçanın mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla proseste kullanılan beş adet parametre değerinin üç farklı seviyesi için Taguchi yöntemi ile optimizasyon gerçekleştirmiştir. Optimizasyon amacıyla ergimiş metal sıcaklığı, birinci faz hızı, ikinci faz hızı, doldurma süresi ve hidrolik basınç parametreleri seçilmiştir. Çalışma sonucunda seçilen parametrelerin optimum değerleri paylaşılmıştır.

2.2. Kapsam ve Amaç

Bu tez zamak malzemesinin basınçlı döküm metodunda kullanılması ile parça üretimi prosesinin detaylı bir şekilde incelenmesini ve basınçlı döküm prosesinde kullanılan makineye ait üretim parametrelerinin optimize edilmesiyle, bu proses ile üretilen parçanın mekanik özelliklerinde en iyi değerlerin yakalanması için çalışmalar yapılmıştır. Bu tezde özellikle üretilen parçanın akma mukavemeti ve sertlik değerlerinin en yüksek olduğu optimize edilmiş makine üretim parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmektedir.

Tez çalışmasının birinci bölümünde döküm prosesi ve bu prosesin bir çeşidi olan basınçlı döküm prosesi hakkında bir literatür tarama çalışması sonucunda ulaşılan bilgiler, kısa ve öz bir şekilde sunulmuştur. Döküm prosesinin üretim endüstrisinde kullanıldığı çeşitli alanlar ile ilgili kısa bilgiler verilerek döküm prosesi kullanılarak üretilen parça boyutlarından bahsedilmiştir. İkinci bölümde, basınçlı döküm prosesinde üretim parametrelerinin optimizasyonu hakkında daha önce yapılmış bazı çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmalara ait bilgilendirmeler yapılmıştır. Daha sonra döküm prosesinin tarihçesi

ve sınıflandırması, basınçlı döküm prosesinin gerçekleştirilmesi, proseste kullanılan malzemeler ve prosese ait parametreler incelenmiştir. Üçüncü bölümde, deneysel tasarım ve Taguchi metodunun detayları incelenmiş ve anlatılmıştır. Dördüncü bölümde seçilen sıcak kamara basınçlı döküm üretim parametreleri için Taguchi metodu kullanılarak optimizasyon çalışması yapılmış ve basınçlı döküm yöntemi ve optimize edilen parametreler ile üretilen çekme çubuğu numuneleri üstünde deneyler yapılarak elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Beşinci bölümde ise elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

2.3. Basınçlı Döküm Prosesinde Kullanılan Malzemeler

Basınçlı döküm yönteminde çoğunlukla alüminyum, magnezyum, bakır, kurşun, kalay ve çinko metalleri ve alaşımları kullanılmaktadır.

Basınçlı döküm ile parça üretiminde ilk olarak kullanılmaya başlanan metaller kurşun ve kalay alaşımları olmuştur. Basınçlı döküm prosesinin zaman içerisinde gelişmesi ile birlikte alüminyum ve çinko alaşımları da basınçlı döküm yönteminde kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde basınçlı döküm yöntemi ile üretilen otomotiv parçalarının çoğunluğu alüminyum ve zamak malzemeden üretilmektedir.

Döküm prosesinde kullanılan metal alaşımları birbirlerinden çok farklı ve geniş mekanik ve fiziksel özellik çeşitliliğine sahiptir. Bu sayede döküm yöntemi, birçok farklı sektör için üretilen farklı parçaların üretiminde kullanılabilir. Bu sayede döküm yöntemi, birçok farklı sektör için üretilen farklı parçaların üretiminde kullanılabilir.

Bir döküm malzemesinin seçiminde nihai döküm üründen beklenen özellikler rol oynamaktadır. Bu özelliklerden en önemli olanı ise ürünün sahip olması gereken mekanik özelliklerdir. Mekanik özellikler arasından en önemli olanları; çekme mukavemeti, akma mukavemeti, uzama (süneklik), sertlik ve elastisite modülüdür.

Çizelge 2.1. Basınçlı dökümde kullanılan bazı metal alaşımlarının mekanik özellikleri

	AlSi₉Cu₃	AZ61A	Zamak 5
Çekme mukavemeti (MPa)	240	310	328
Akma mukavemeti (MPa)	140	230	228
Uzama (%)	1	16	7
Sertlik (HB)	80	60	91

Çinko ve çinko alaşımları, basınçlı döküm prosesinde en fazla kullanılan malzemelerden birisidir. Çinko alaşımları sektörde genellikle zamak ismi ile de anılmaktadır. Zamak, saf çinko elementine alüminyum ve bakır başta olmak üzere farklı elementlerin ilavesi ile ortaya çıkan bir alaşım türüdür. Zamak alaşımları döküm yönteminde kullanılan zamak alaşımları ve diğer şekillendirme proseslerinde kullanılan zamak alaşımları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Dökümde kullanılan zamak alaşımları kendi içlerinde barındırdıkları alüminyum miktarına göre farklı şekillerde isimlendirilmektedirler. Basınçlı döküm prosesinde en çok kullanılan zamak alaşımları; Zamak 2, Zamak 3 ve Zamak 5 alaşımlarıdır. Ancak Zamak 7, Zamak 8, Zamak 12 ve Zamak 27 olmak üzere basınçlı dökümde kullanılan farklı zamak alaşımları da mevcuttur (Polat 2013).

Zamak alaşımlarının basınçlı dökümde kullanılmasının avantajları şunlardır;

- Zamak malzemesi seri üretime uygundur,
- Nihai döküm parçada düşük boyutsal toleranslara ulaşılabilir,
- Zamak malzeme yüksek korozyon direncine sahiptir,
- Zamak malzemenin akışkanlık özelliği iyidir,
- Zamak malzeme kolay şekillendirilebilir,

Zamak malzemenin avantajları olduğu kadar dezavantajları da bulunmaktadır. Zamak malzemenin dezavantajları şunlardır;

- Zamak malzeme yüksek sıcaklık koşullarında fonksiyon kaybına uğramaktadır,

- Zamak malzemenin renklendirilmesi zordur,
- Zamak malzemenin fiyat kararsızlığı yüksektir,

Basınçlı döküm prosesinde yaygın şekilde kullanılan zamak alaşımları zamak 2, zamak 3 ve zamak 5 alaşımlarıdır.

Zamak 3 alaşımı, döküm prosesinde sıklıkla tercih edilen bir çinko alaşımıdır. Bu alaşımın sahip olduğu iyi derecedeki fiziksel ve mekaniksel özellikler, döküm yöntemi ile üretim yapan şirketler tarafından sıklıkla tercih edilmesine yol açmıştır. Yüksek boyutsal kararlılık ve yüksek mukavemete sahip olması istenilen parçalarda Zamak 3 alaşımı kullanılmaktadır (Polat 2013).

Zamak 2 alaşımı, Zamak 3 alaşımından daha farklı bir çinko alaşımıdır. Zamak 2 alaşımı içeriğinde %3 oranında bakır bulundurmaktadır. Bu %3'lük bakır ilavesi Zamak 2 alaşımına aşınmaya karşı direnç kazandırmaktadır ve alaşımın mukavemetini de aynı zamanda arttırmaktadır. Ancak içeriğinde bulunan bakırdan dolayı Zamak 2 alaşımının boyutsal genişleme hızı düşüktür ve yüksek sıcaklıkta uzun süre boyunca çalıştığında performans kaybı yaşanmaktadır. Zamak 2 alaşımı küçük boyutlu ve yüksek aşınma direnci ile mükemmel sertlik ve çekme mukavemeti istenen parçalarda kullanılabilir (Polat 2013).

Zamak 5 alaşımının içeriğinde %1 oranında bakır bulunmamaktadır. Bu sebeple Zamak 3 alaşımına göre daha mukavim ve sert bir yapıya sahiptir. Mukavim yapısından ötürü Zamak 5 alaşımı özellikle çekme performansının yüksek olmasının istendiği uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca Zamak 5 alaşımının boyama, kaplama ve krom kaplama gibi işlemlerdeki performansı diğer çinko alaşımlarından daha üstündür (Polat 2013).

Döküm yönteminde nihai üründen beklenen özelliklerin alaşımda bulunan malzemeler ile ilişkisi çok yüksektir. Bu duruma örnek olarak karmaşık geometriye sahip parçaların daha

akışkan malzemeler ile daha basit geometriye sahip parçaların daha viskoz malzemeler ile dökümü gerçekleştirilmektedir (Polat 2013).

Alüminyum elementi çinko alaşımının ergime noktasını düşürmektedir. Bunun yanında %4 oranında Al elementinin çinko alaşımına eklenmesi ile nihai döküm parçanın mekanik özellikleri ve ergimiş metalin akışkanlığı artırılmış olacaktır.

Çinko alaşımına magnezyum ilavesi ile alaşımın korozyona karşı direnci ve nihai döküm ürünün mekanik özellikleri artmış olacaktır. Bu durumdan farklı olarak alaşıma magnezyum ilavesi ile alaşımın aşınmaya karşı direnci de artmış olacaktır. Magnezyum, alaşıma belirli bir oranın üzerinde katılırsa alaşımın akışkanlığını düşürecektir ve döküm prosesini zorlaştıracaktır.

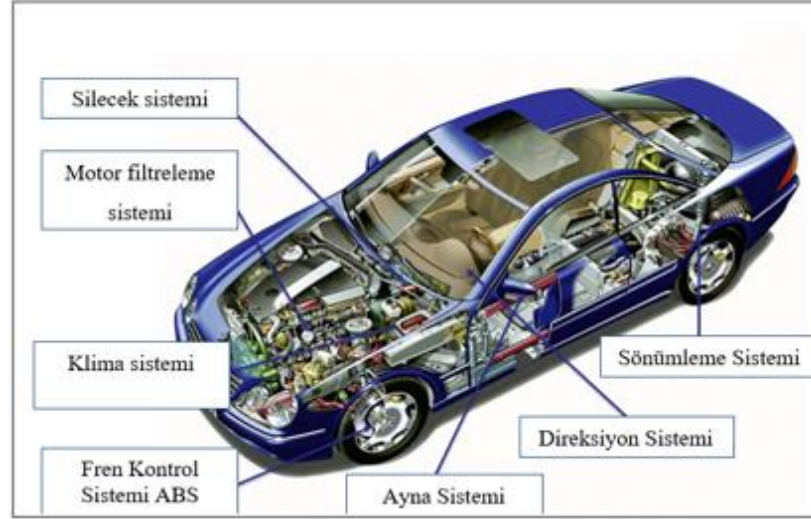
Bakır elementinin alaşıma eklenmesi ile nihai döküm parçanın mukavemeti ve aşınma direnci artacaktır. Ancak bakır elementinin döküm malzemesinde fazla miktarda bulunması aynı zamanda yapının sünekliğinin de azalmasına sebebiyet verecektir.

Dökümde kullanılan hammaddenin yapısında en sık rastlanılan safsızlıklar kurşun, kadmiyum ve kalaydır. Bu safsızlık elementleri nihai döküm parçanın mekanik özelliklerini zayıflatmakta ve parçada korozyon oluşumuna sebebiyet vermektedir.

Çinko alaşımlarında safsızlık yaratacak bir diğer element demir (Fe) elementidir. Ergimiş malzeme bulunan Fe elementi sadece kullanılan malzemedeki değil, döküm yönteminde kullanılan ekipmanların aşınması neticesinde de malzemeye karışabilmektedir.

Çinko alaşımları içerdikleri yüksek çinko oranı sayesinde korozyona karşı iyi bir direnç göstermektedir. Ayrıca çinko alaşımları geri dönüştürülebilir olduklarından çevre dostu alaşımlar olarak değerlendirilmektedirler.

Çinko alaşımları yapı, otomotiv, elektronik, ev eşyası ve daha birçok farklı sektörde hammadde olarak sıklıkla kullanılmaktadırlar.



Şekil 2.1. Otomobil üzerinde kullanılan ve çinko alaşımlarından üretilmiş parçalar

2.4. Döküm Prosesi

Döküm yöntemi ile üretim M.Ö. 4000 yıllarına kadar uzanan uzun bir geçmişe sahiptir. Döküm yöntemi, eski çağlarda daha çok balta ve bıçak gibi dönemin gerekliliği olan parçaların üretiminde kullanılmıştır. Daha sonraları insanoğlunun kalıp teknolojisinde bulunduğu yeniliklerden biri olan parçalı kalıpların keşfedilmesi ile döküm yöntemi, yuvarlak kesitli parçaların üretimi için de kullanılmaya başlamıştır. M.Ö. 2000`li yıllara doğru kilden yapılmış maçaların da kullanılmaya başlanması ile içerisinde boşluklara sahip parçaların da döküm yöntemi ile üretilmesi mümkün olmaya başlamıştır (Aran 2007).

Döküm yönteminin bir çeşidi olan basınçlı döküm yönteminin üretim endüstrisinde ilk defa kullanımının 19. yüzyılın ortalarında başladığı kabul edilmektedir. Kayıtlara göre 1849 yılında Sturges, o dönemde kullanılan baskı makinelerinde yer alan harfleri üretmek için ilk el ile çalışan basınçlı döküm makinesinin patentini almıştır. Basınçlı döküm yönteminin seri üretimde kullanılması H.H. Franklin Company`nin basınçlı döküm ile bazı otomobil parçaları üretmesi ile başlamıştır.

Basınçlı dökümde kullanılan ilk malzemeler çeşitli kurşun ve kalay alaşımları olmuştur. Birinci Dünya Savaşı`nın başladığı ilk senelerde çinko ve çinko alaşımlarının da basınçlı

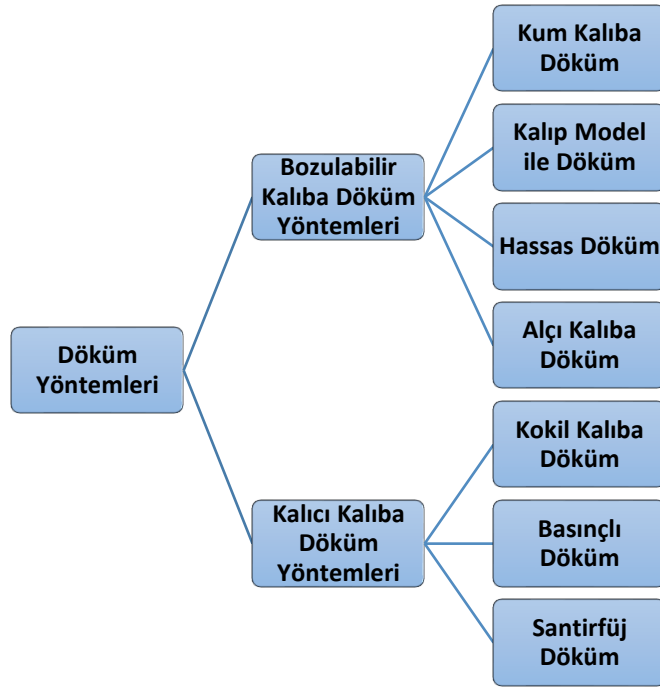
döküm prosesinde kullanılmaya başlanması ile kurşun ve kalay alaşımlarının basınçlı döküm prosesindeki eski önemleri kaybolmuştur. Çinko ve çinko alaşımlarının basınçlı döküm yönteminde kullanılmasına başlandıktan kısa süre sonra magnezyum ve bakır gibi alaşımların da basınçlı döküm prosesinde kullanımına başlanmıştır (Anonim 2016).

2.4.1. Döküm Prosesinin Sınıflandırılması

Döküm prosesi, insanlığın keşfettiği ilk üretim yöntemlerinden bir tanesidir. Tarihi çok eskilere dayanan döküm prosesi, zaman içerisinde sürekli olarak geliştirilmiş ve farklı amaçlara yönelik döküm prosesinin gerçekleştirilmesi için farklı yöntemler keşfedilmiştir. Döküm prosesi birçok alt sınıfa ayrılabilmesine rağmen en genel şekildeki sınıflandırma proste kullanılan kalıba göre yapılan sınıflandırmadır. Döküm prosesi, proste kullanılan kalıba göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlar; bozulabilir (tekrarlı kullanılmayan) kalıp kullanılan döküm yöntemleri ve kalıcı (tekrarlı kullanılabilen) kalıp kullanılan döküm yöntemleridir.

Bu iki farklı döküm prosesi yöntemlerinin de kendilerine ait avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bozulabilir kalıp kullanılan döküm yöntemlerinin en önemli avantajı karmaşık şekilli parçaların da bu yöntemle üretilebilir olmasıdır. Bu yöntemle ait en önemli dezavantaj ise yöntemin seri üretime uygun olmamasıdır. Kalıcı kalıp kullanılan döküm yöntemlerinin en önemli avantajı yöntemin seri üretime uygunluğuyken, en önemli dezavantajı ise parçayı kalıptan çıkarmak için kalıbın tekrar açılması gerektiğinden döküm sonrası ortaya çıkan nihai parçada ulaşılabilen geometrilerin sınırlı olmasıdır.

Döküm yöntemlerine ait genel ve alt sınıflandırmaları içeren Şekil 3.2. aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.2. Döküm yönteminin genel ve alt sınıflandırması

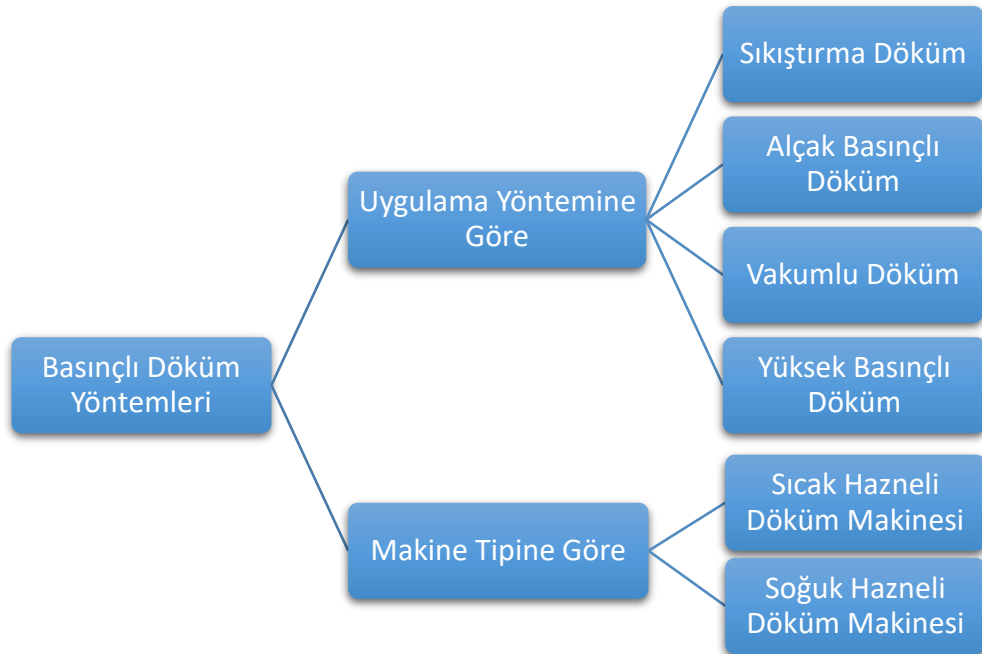
2.4.2. Basınçlı Döküm Prosesi

Kalıcı kalıp ile döküm yöntemlerinden bir tanesi olan basınçlı döküm yöntemi ergimiş metalin basınç ile kalıp boşluğuna itilmesi esasına dayanmaktadır. Basınçlı döküm yöntemi ile geometrik olarak karmaşık parçalar iyi bir boyutsal kararlılık ve iyi bir yüzey kalitesi üretilebilmektedir. Bu yöntemin bir diğer olumlu tarafı da yöntemin seri üretime uygulanabilirliğinin çok yüksek olmasıdır (Çetin 2017).

Basınçlı döküm yönteminde genellikle demir içermeyen metallerin ve metal alaşımlarının bir potada ergitildikten sonra, ergimiş halde bulunan bu hammaddenin yüksek hız ve basınçta kalıp boşluğuna aktarılması prensibine dayanmaktadır. Prosesin diğer adımında kalıba aktarılmış olan bu ergimiş metal soğuyarak katılaşmakta ve kalıptan nihai ürün olarak çıkarılmaktadır. Basınçlı döküm yöntemi ile üretilen parçaların boyutları birkaç milimetre `den birkaç metreye kadar değişebilmektedir. Ergimiş metal proses esnasında çok hızlı soğuduğu için parçada elde edilen yapı ince tanelidir ve bu proses ile üretilmiş bir parçanın dayanımı oldukça yüksektir (Çetin 2017).

Basınçlı döküm yöntemine ait çok fazla sayıda avantaj olmasına rağmen bu yönteme ait birçok kısıt da bulunmaktadır. Örnek olarak; basınçlı döküm yönteminde kullanılacak kalıpların üretilmesi ve seri üretime uygun hale gelmesi uzun sürmektedir ve kalıpların imalatı pahalı olmaktadır. Bu kısıtlardan dolayı yüksek adetli üretilmesi planlanmayan parçaların imalatı basınçlı döküm yöntemi ile yapılamamaktadır. Bunun yanı sıra çok büyük parçaların bu yöntem ile üretimi verimli değildir ve döküm prosesini gerçekleştirecek makinenin yüksek bir ilk yatırım maliyetinin olması da bu yöntemin kısıtları arasında gösterilebilmektedir (Anonim 2016; Aslan 2007; Gözen 2007; Ertürk 2010).

Basınçlı döküm yöntemi prosesin uygulanma yöntemine göre ve prosesin gerçekleştirilmesi için kullanılan makine ve ekipmanın çeşidine göre genel anlamda ikiye ayrılmaktadır. Buna göre basınçlı döküm prosesinin sınıflandırılması Şekil 3.3` de yer alan grafikte gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Basınçlı döküm yöntemlerinin sınıflandırılması

Basınçlı döküm yöntemi, prosesin uygulanma yöntemine göre kendi içinde dörde ayrılmaktadır. Bunlar; sıkıştırma döküm, alçak basınçlı döküm, vakumlu döküm ve yüksek basınçlı döküm yöntemleridir. Basınçlı döküm yöntemi, proseste kullanılan makinenin tipine göre ise sıcak hazneli döküm makinesi ile gerçekleştirilen döküm ve soğuk hazneli döküm makinesi ile gerçekleştirilen döküm olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sıcak hazneli ve soğuk hazneli isimleri basınçlı döküm esnasında ergitilen metalin kalıba enjekte edilmeden önce aktarıldığı haznenin sıcaklık değerinden ileri gelmektedir.

2.4.3. Sıcak Hazneli Basınçlı Döküm Prosesi

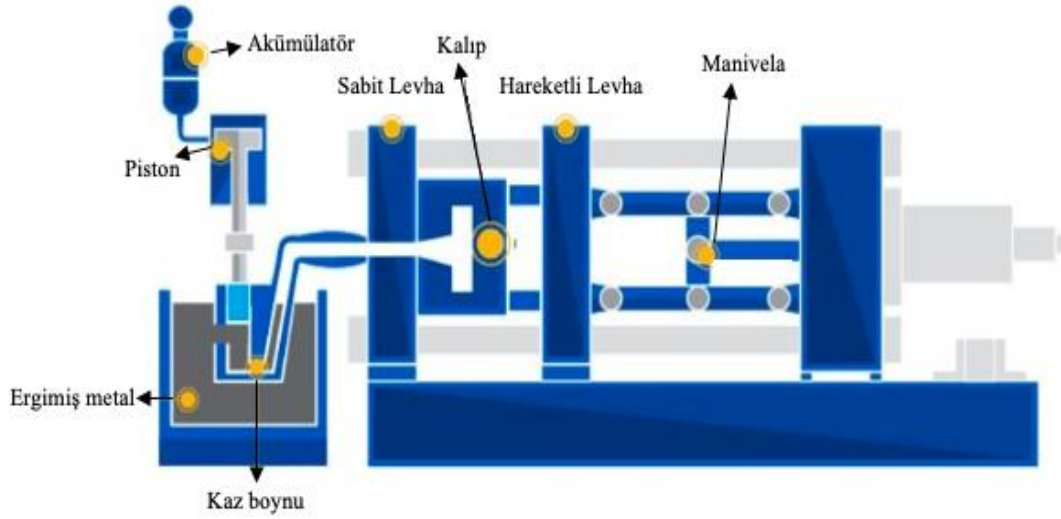
Sıcak hazneli basınçlı döküm prosesinde en sık kullanılan malzemeler ergime sıcaklığı düşük olan kalay, kurşun ve çinko alaşımlarıdır. Sıcak hazneli basınçlı döküm makineleri ile alüminyum ve alüminyum alaşımları gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin ve metal alaşımların dökümü gerçekleştirilememektedir. Bu durumun ortaya çıkmasının sebebi döküm işlemi gerçekleştirilecek olan yüksek ergime sıcaklığına sahip metalin ergitme işleminde kullanılan makineye ait elemanları aşındırması ve bu elemanların yüksek sıcaklığa dayanıklı olmamasından kaynaklanmaktadır (Anonim 2016).

Sıcak hazneli döküm makinelerini soğuk hazneli döküm makinelerinden ayıran en önemli iki özellik dökümü gerçekleştirilecek olan metalin veya metal alaşımının ergitildiği ergitme potasının makine ile entegre halde bulunması ve metalin kalıba aktarıldığı haznenin sıcaklığının soğuk basınçlı döküm makinelerinde bulunan haznedeki daha sıcak olmasıdır.

Sıcak hazneli basınçlı döküm makineleri ile gerçekleştirilen basınçlı döküm işleminde aşağıda maddeler halinde yer alan proses adımları izlenmektedir.

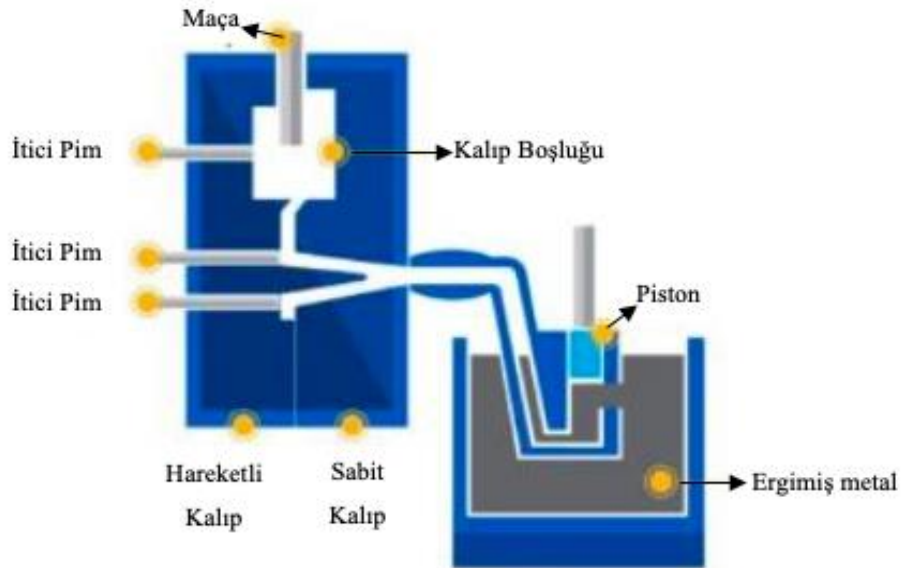
- Sıcak hazneli döküm makinesinde enjeksiyon mekanizması ergimiş metalin içerisinde bulunmaktadır. Ergime potası (ocak) makineye entegre edilmiş bir

haldedir ve metal kaz boynu ismi verile bir besleme sisteminden kalıba aktarılmaktadır (Anonim 2020).



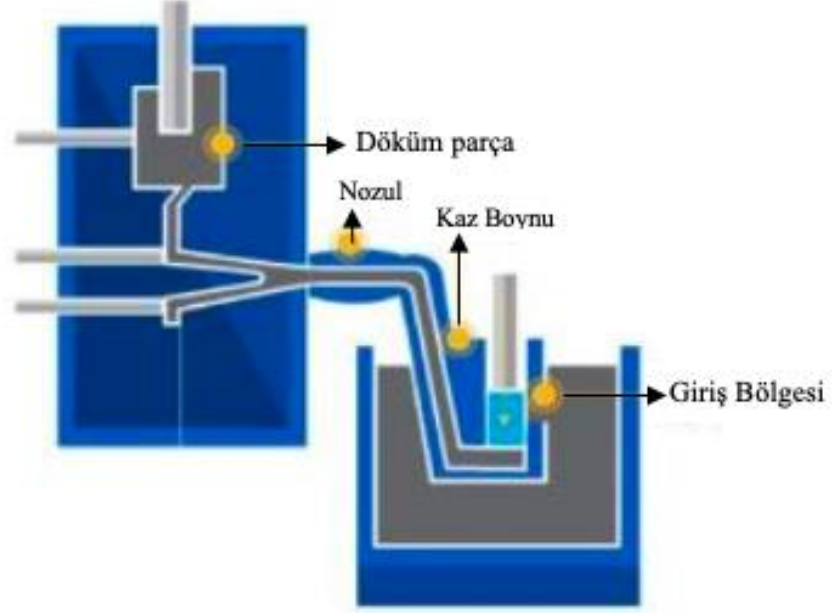
Şekil 2.4. Sıcak hazneli bir döküm makinesine ait örnek şema

- Prosesin başlangıcında açık olan kalıp kapanmaktadır ve bu duruma istinaden ergimiş metalin kalıba aktarılmasını sağlayan piston yükselmektedir. Böylece ergimiş halde makineye ait pota içerisinde bulunan metal, silindirin içerisine dolmaktadır (Anonim 2020).



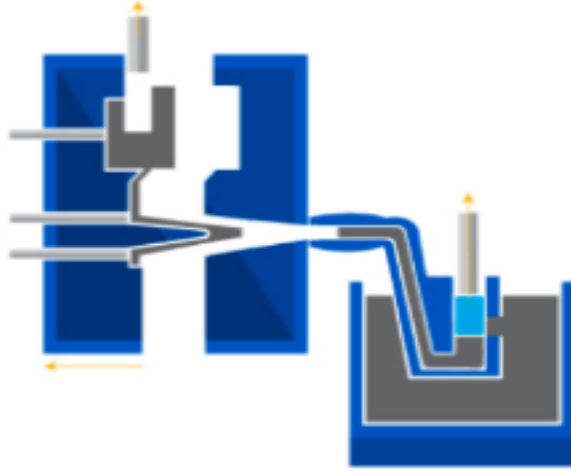
Şekil 2.5. Sıcak hazneli bir basınçlı döküm makinesinde pota ve kalıp bağlantılarını sağlayan elemanlar (Anonim 2020)

- Ergimiş metalin silindire dolmasından sonra piston aşağıya doğru harekete başlamaktadır ve ergimiş metal kaz boynu boyunca bu şekilde piston tarafından itilmektedir. Bu sürecin sonunda ergimiş metalin kalıp boşluğuna dolması gerçekleşmektedir (Anonim 2020).



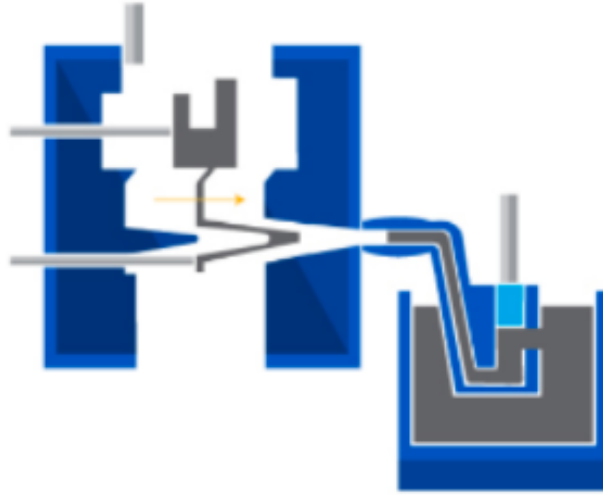
Şekil 2.6. Sıcak hazneli basınçlı döküm makinesinde ergimiş metalin kalıp boşluğunu doldurması

- Ergimiş halde bulunan metalin kalıp boşluğuna aktarılmasından sonra kalıp ve maçalar açılmaktadır. Dökümü gerçekleştiren parça, kalıbın hareketli yarısında yer alan itici pimlerin bulunduğu alanda kalmaktadır. Bu safhada piston tekrar yukarı doğru kalkarken ergimiş metalin tekrar silindir kısmına dolması sağlanmaktadır (Anonim 2020).



Şekil 2.7. Sıcak hazneli basınçlı döküm makinesinde dökümü yapılan parçanın kalıbın hareketli yarısında kalması

- Sıcak hazneli basınçlı döküm makinesi ile gerçekleştirilen döküm işleminde son adımda itici pimler dökümü gerçekleştirilen parçayı iterek kalıptan çıkarmaktadır. Piston tam olarak başlangıç konumuna dönmektedir, ergimiş metal ise silindir ve kaz boynuna tam olarak dolmaktadır (Anonim 2020).



Şekil 2.8. Sıcak hazneli bir basınçlı döküm makinesinde dökümü gerçekleştirilen parçanın kalıptan çıkartılması

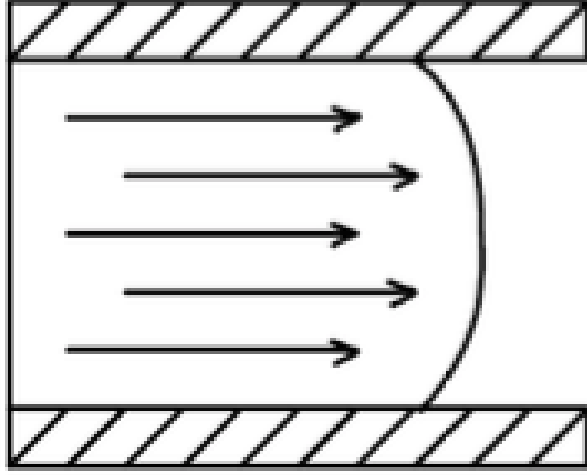
2.5. Basınçlı Döküm Prosesinde Genel Akış Teorisi

Basınçlı döküm prosesinde optimum ergimiş metal akışı istenen şartlara uygun olan kaliteli bir parçanın dökülebilmesi için çok önemlidir. Bu nedenle silindir içerisinde kalıpta yer alan yolluk kısmında ve kaz boynunda ilerleyen ergimiş metalin herhangi bir türbülans olmadan, içine hava almadan ilerlemesi ve kalıp boşluğunu tam olarak doldurması gerekmektedir. Bunlara ek olarak kapı giriş kesiti olarak adlandırılan ve ergimiş metalin kalıba aktarıldığı bölgenin doğru tasarlanmasının da optimum akışın yakalanabilmesindeki rolü büyüktür. Basınçlı döküm prosesinde uygun bir akışın sağlanabilmesi için aşağıda maddeler halinde yer alan şartların sağlanması gerekmektedir.

- Kapı giriş kesitinin konumunun doğru belirlenmesi,
- Kapı giriş kesitine ilerleyen ergimiş malzemenin hızı,
- Birinci faz aşamasından ikinci faz aşamasına geçiş noktası,
- Birinci faz ve ikinci faz hızları,
- Proses esnasındaki kalıp sıcaklığı,
- Kalıp yüzeyinde yağlama ile oluşturulan düzgün film tabakası,
- Ergimiş metalin sıcaklığı

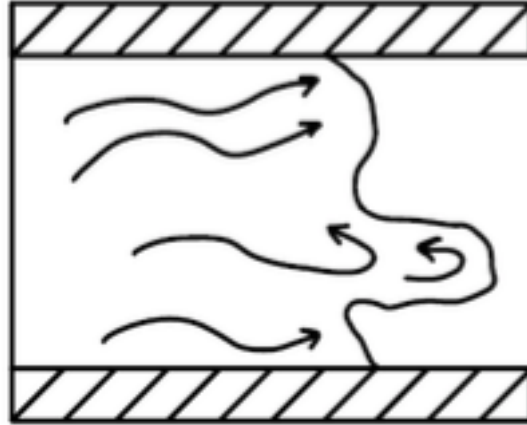
Yukarıda maddeler halinde yer alan değişken parametreler dökümün sağlıklı ve istenilen şekilde yapılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Basınçlı döküm prosesinde laminer akış terimi ergimiş halde bulunan materyalin yolluk eksenine paralel ve karışmaksızın hareket etmesinden ileri gelmektedir. Bu durumun sağlanabilmesi yolluk tasarımındaki en önemli parametrelerden bir tanesidir. Laminer akış özelliklerine sahip olmayan bir akış hareketinin sonucunda dökümü yapılan parçanın iç yapısında makro veya mikro boyutlarda poroziteler oluşabilmektedir. Sonucunda ise döküm parçada istenen kalitenin yakalanamaması ihtimali bulunmaktadır.



Şekil 2.9. Yolluk içerisinde ergimiş metalin laminer akışı

Basınçlı döküm prosesinde türbülanslı akış terimi yolluk tasarımındaki yanlışlıklardan kaynaklanan veya belirli bir mesafe sonrasında akışkan hareketinde ve doğrultusunda oluşan düzensizlikler sonucunda akış çizgilerinin birbirini kesmesi ile ortaya çıkan düzensiz akış tipidir. Kalıp boşluğuna dolan ergimiş metaldeki bu türbülansın dolay döküm işlemi bittiğinde parça içerisinde boşluklar bulunacaktır. Bu tip bir akış, döküm parçasının kalitesini düşürecek ve parçada dolma sorunları ortaya çıkacaktır.



Şekil 2.10. Yolluk içerisinde oluşan türbülanslı akış

2.6. Sıcak Hazneli Yüksek Basınçlı Döküm Prosesinde Faz Kavramı

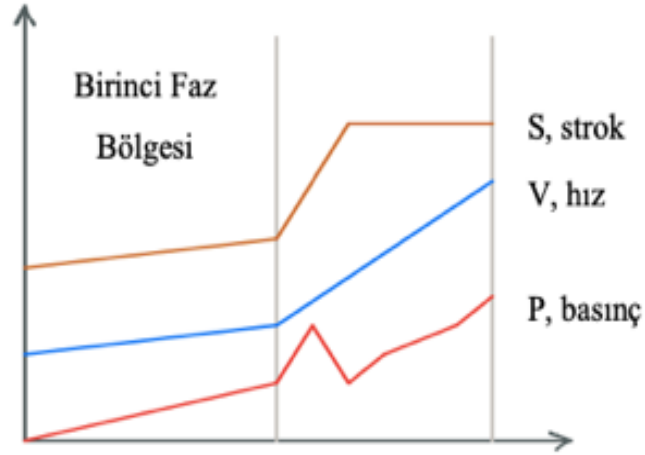
Yüksek basınçlı döküm prosesinde ergimiş metalin silindir, kaz boynu ve yolluklarda sahip olduğu hız ve ilerleme miktarına bağlı olarak üç adet faz kavramı ortaya çıkmıştır. Bu üç adet faz kavramı prosesin kontrolünü sağlamak için kullanılmaktadır ve fazların isimleri sırası ile;

- Birinci Faz Kavramı,
- İkinci Faz Kavramı ve
- Üçüncü Faz Kavramı olarak isimlendirilmektedir.

Basınçlı döküm prosesinde birinci faz adı verilen aşama esnasında ergimiş metal, silindirin içerisinden kalıp boşluğuna girdiği yer alan olan ve ‘kapı’ olarak tabir edilen bölgeye kadar piston tarafından uygulanan optimum bir hız ile itilmektedir. Birinci faz aşamasında ergimiş halde bulunan sıvı metalde dalga oluşumunun engellenmesi için (akışta türbülans oluşumunun engellenmesi), ergimiş metal yavaş bir hızda hareket ettirilmelidir. Ancak birinci faz aşamasında, ergiyik metali iten pistonun hızının fazla yavaş olması basınçlı döküm prosesinin çevrim süresini oldukça arttıracaktır. Prosesin toplam çevrim süresinin artması da proses esnasında oluşacak ısı kaybını ve prosesin toplam maliyetini arttırmaktadır. Bu durum istenen bir durum değildir ve birinci faz hızının olabildiğince yüksek olması gerekmektedir.

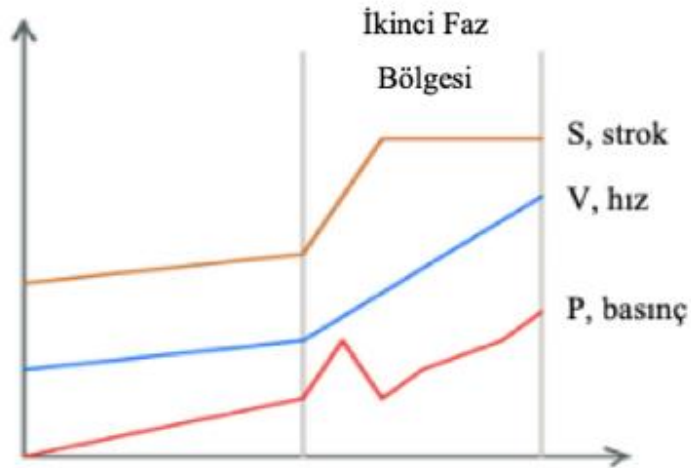
Sonuç olarak yüksek basınçlı dökümde birinci faz hızının ergimiş metalde türbülans oluşturmayacak kadar yavaş ve aynı zamanda ısı kaybına ve maliyet artışına sebep olmayacak kadar hızlı olması gerekmektedir. Birinci fazın gerçekleşmesi esnasında oluşabilecek türbülansın neticesinde nihai döküm parçada porozite oluşumuna sebep olacak ve parçanın mekanik özelliklerini etkileyecektir.

Yüksek basınçlı döküm prosesinde, hız-basınç grafiğinin yorumlanması çok büyük önem arz etmektedir. Ergimiş metalin, silindir ve kaz boynunda ilerlerken bir engel ile karşılaşmaması gerekmektedir.



Şekil 2.11. Sıcak hazneli basınçlı döküm prosesinde hız-basınç-strok grafiğinin birinci faz bölgesi kısmı (Bonollo 2014)

Yolluk girişinde ergimiş halde bulunan sıvı metalin ani bir hız ve basınç ile kalıp boşluğunu tam olarak doldurduğu aşama ikinci faz aşaması olarak adlandırılmaktadır. Bu aşama sonrasında dökümü yapılan parçanın kalıptan çıkartılması için soğuması beklenmektedir.

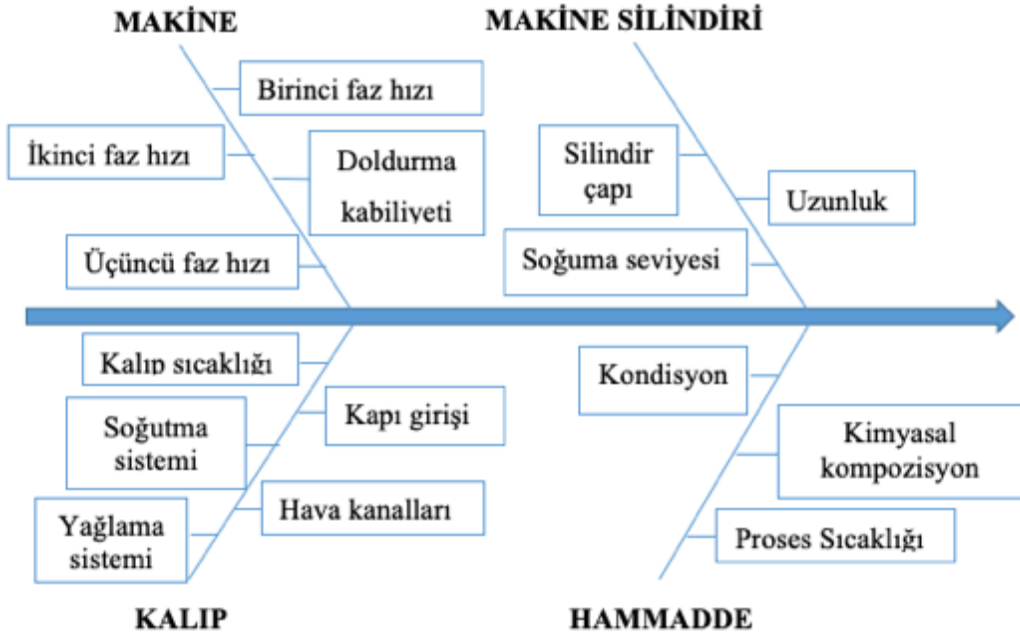


Şekil 2.12. Sıcak hazneli basınçlı döküm prosesinde hız-basınç-strok grafiğinin ikinci faz bölgesi kısmı

2.7. Basınçlı Dökümde Parça Kalitesine Etki Eden Parametreler

Basınçlı döküm prosesinde temelde üç aşama bulunmaktadır. Bu aşamalar sırası ile; prosesin düşük hızla gerçekleştiği birinci faz aşaması, prosesin yüksek hızla gerçekleştiği ikinci faz aşaması ve sıkıştırma ile soğumanın gerçekleştiği üçüncü faz aşamasıdır. Üçüncü faz aşaması sıcak hazneli basınçlı döküm yöntemi ile zamak malzemeden üretilen parçalar için kullanılmamaktadır (Apparao ve Birru 2016).

Basınçlı döküm yöntemi kullanılarak üretilen bir parçada optimum porozite oranının yakalanmasında birçok farklı parametrenin etkisi bulunmaktadır. Bu parametreler; proste kullanılan kalıp, makine, hammadde veya makinenin silindir kısmı (kaz boynu) ile ilgili olabilmektedir. Şekil 2.13'de ürün kalitesine etki eden bu parametreler bir problem çözme yöntemi olan Ishikawa diyagramı ile verilmiştir.



Şekil 2.13. Basınçlı dökümde ürün kalitesine etki eden parametrelerin Ishikawa diyagramı ile gösterimi (Apparao ve Birru 2016)

Birinci faz hızı, ergimiş metalin piston tarafından kaz boynu boyunca itilerek kapı girişine getirildiği zamana kadar ergimiş metalin sahip olduğu hızdır. Burada kullanılan hız değeri, nihai döküm ürünün kalitesine direkt olarak etki etmektedir.

İkinci faz hızı, ergimiş metalin piston tarafından hızla itilerek kapı girişinden kalıp içerisine aktarıldığı hızdır. İkinci faz hızı aşaması bittiğinde kalıp içerisinde nihai döküm ürünü oluşmuş olmaktadır.

Doldurma kabiliyeti, makinenin uygulayabileceği basınç-yük kapasitesi ile alakalıdır. Makinenin uygulayabildiği yük kapasitesi arttıkça kalıp boşluğunu doldurma kabiliyeti de artmaktadır.

Üçüncü faz hızı, soğuk hazneli basınçlı döküm makinesi kullanılarak gerçekleştirilen döküm işleminde bulunan bir parametredir. İkinci fazdan sonra yapılan sıkılaştırma işlemi bu fazdaki hız ile gerçekleşmektedir.

Uzunluk, ergimiş metalin kalıba aktarıldığı kaz boynunun uzunluğunu göstermektedir ve sonradan müdahale edilebilir bir parametre değildir.

Silindir çapı, makinede yer alan silindirin (kaz boynu) çapıdır. Sonradan müdahale edilebilir bir parametre değildir.

Kalıp sıcaklığı, ergimiş metalin kalıpta ilerleyişine direkt olarak etki eden parametrelerden birisidir. Ergimiş metalin kalıp içerisindeki hareketinin optimum seviyede olması için kalıbın çok soğuk veya çok sıcak olmaması gerekmektedir.

Kapı girişi, ergimiş metalin kalıpta bulunan yolluk kısmına aktarıldığı kısımdır. Kapı girişinin geometrisi, ergimiş metalin kalıp içerisindeki akışına direkt olarak etki etmektedir. Dolayısıyla nihai döküm ürünün kalitesi de bu parametreden etkilenmektedir.

Soğutma sistemi ve hava kanalları, kalıp içerisinde kullanılan soğutma kanalları ve bu kanalların sıvı veya hava kullanılarak kalıbın soğutulmasına göre değişen sisteme soğutma sistemi ismi verilmektedir. Bu parametre kalıbın içerisindeki metal akışına da etki etmektedir.

Yağlama sistemi, dökümü yapılan parçanın kalıpta sıkışmaması için kullanılmaktadır. Bu yağın kalıp üzerinde fazladan kullanılması neticesinde kalıp yüzeyindeki yağ ergimiş metal ile temasında yanmaktadır ve istenen optimum metal akışı bozulmaktadır.

Kimyasal kompozisyon, döküm operasyonunda kullanılan hammaddenin kimyasal kompozisyonuna göre dökümü yapılan nihai ürünün kalitesi değişmektedir.

Hammaddenin durumu, döküm yönteminde kullanılan hammaddenin döküm öncesi depolanma koşulları, hammaddenin birincil veya ikincil malzeme olup olmaması gibi durumlar döküm kalitesine etki etmektedir.

Proses sıcaklığı, hammaddenin dökümü yapılmadan önce ergitildiği ve potada tutulduğu sıcaklık döküm kalitesini etkilemektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deneysel Tasarım Yöntemleri

Deneysel tasarım yöntemi, 1920`li yıllarda İngiliz bir istatistikçi olan Ronald Fisher tarafından tarım endüstrisi alanında çalışmalar yapılırken keşfedilmiş ve geliştirilmiştir. Deneysel tasarım yöntemi kısa bir süre içerisinde Amerika`da tarım sektöründe üretimin geliştirilmesi amacıyla uygulanmış ve Amerika`nın bu alanda dünya lideri olmasına büyük katkıda bulunmuştur (Şirvancı 1997).

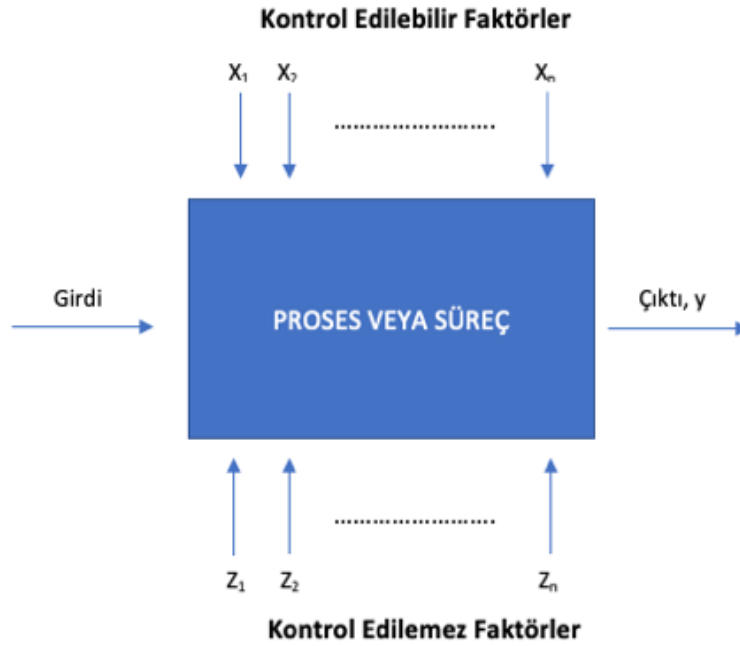
Deney tasarımı yöntemi, daha sonraları kimya ve ilaç sektörlerinde kullanılmış ancak imalat endüstrisinde kullanımı 1970`lere kadar sınırlı kalmıştır. 1980`li yılların başında Japonların ürettiği ürünlerde ulaşılan kalite seviyesi batı dünyası tarafından araştırılırken, deney tasarımı yönteminin ürünün kalitesi üzerindeki etkisi yeniden keşfedilmiştir. Deney tasarımı yöntemi, o tarihlerde Japon Profesör Genichi Taguchi liderliğinde etkin olarak uygulanmaktaydı. Taguchi, deney tasarımı yönteminin üretimdeki uygulamaları üzerinde bazı yenilikler yapmış ve yöntemin imalat sektöründe kabul görmesini sağlamıştır (Şirvancı 1997).

Deneysel tasarım yönteminin amacı, incelenecek proseste veya bir üründe yapılacak geliştirme işleminde bulunan değişkenler (faktörler) arasındaki bağlantıyı bulmak ve bu değişkenlerin proseste etkisini hesaplamaktır. Bu nedenle değişkenler (faktörler) arasındaki ilişkinin matematiksel bir denklem ile ifade edilmesi önemlidir. Değişkenler (faktörler) arasındaki etkileşim sonucu etki edecek bir düzeyde ise, bu etkileşime ait terimlerin denkleme dahil edilmesi gerekmektedir (Taguchi ve ark. 2005).

Deneysel tasarım planlaması esnasında bir kontrol listesinin oluşturulması gerekmektedir. Bir deneyin tasarımında kontrol listesinde oluşturulan adımlar birbiri ile bağlantılı olmaktadır. Dean ve Voss (1999), deney tasarımı için bir kontrol listesi oluşturulmuştur. Bunlar;

1. Deneyin amaç ve hedeflerinin belirlenmesi,

2. Bütün değişken özelliğe sahip kaynakların tanımlanması,
 - a. Deney üniteleri,
 - b. Kontrol edilebilen faktörler,
 - c. Kontrol edilemeyen faktörler,
 - d. Bloklama işlemleri,
3. Uygulamada deneyi ünitelere ayırmak için bir kuralın belirlenmesi,
4. Deneyin ölçü birimlerinin belirlenmesi,
5. Pilot bir uygulama yapılması,
6. Pilot uygulamadan sonra model oluşturulması,
7. Analiz için bir çerçeve oluşturulması,
8. Kaç adet gözlem yapılacağıının hesaplanması,
9. Gözden geçirme ve revizyon (Gökçe ve ark. 2009).



Şekil 3.1. Bir sistem veya prosese (sürece) ait proses modeli (Yang 2003)

Bir deneysel tasarım projesinde deneysel faktörler kasti olarak değiştirilmekte ve sonuçtaki çıktılar gözlemlenmektedir. Deney sırasında elde edilen bilgiler, deneysel

faktörlere bağılı olan çıktı (y)'ya uyan ampirik modeller oluşturulması için kullanılmaktadır. Matematiksel olarak fonksiyonel ilişkiler bulunmaya çalışılmaktadır (Yang 2003).

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (\text{Denklem 1.1})$$

Yukarıda yer alan matematiksel denklemde bulunan ε , deneysel hata veya deneysel değişken terimi olarak adlandırılmaktadır. Denklem 1.1'de yer almayan kontrol edilemeyen faktörler (z_1, z_2, \dots, z_n) ve deney koşulları, ekipmanları, ölçümsel hatalardan doğan sapmalar, girdi ve çıktı arasında kesin bir fonksiyonel bağlantı kurulmasını engelleyebilmektedir (Yang 2003).

Deneysel tasarım kendine has terminoloji ve metodolojiye sahiptir. Deneysel çalışmalarda çok sayıda deney yapılmaktadır ve bu deneysel çalışmalar bilimin merkezinde yer almaktadır. Deneysel tasarım sebep ve etki ilişkisinin belirlenmesi için kullanılan bir yaklaşımdır. Deney tasarımı için aşağıda yer alan kısıtların sağlanması gereklidir.

1. Toplam deney sayısını azaltmak,
2. Tasarımcının formüle ettiği etkinliği eş zamanlı olarak değiştirebilmek,
3. Doğru bir deney stratejisi belirlemek (Lazic 2004)

3.2. Taguchi Yöntemi

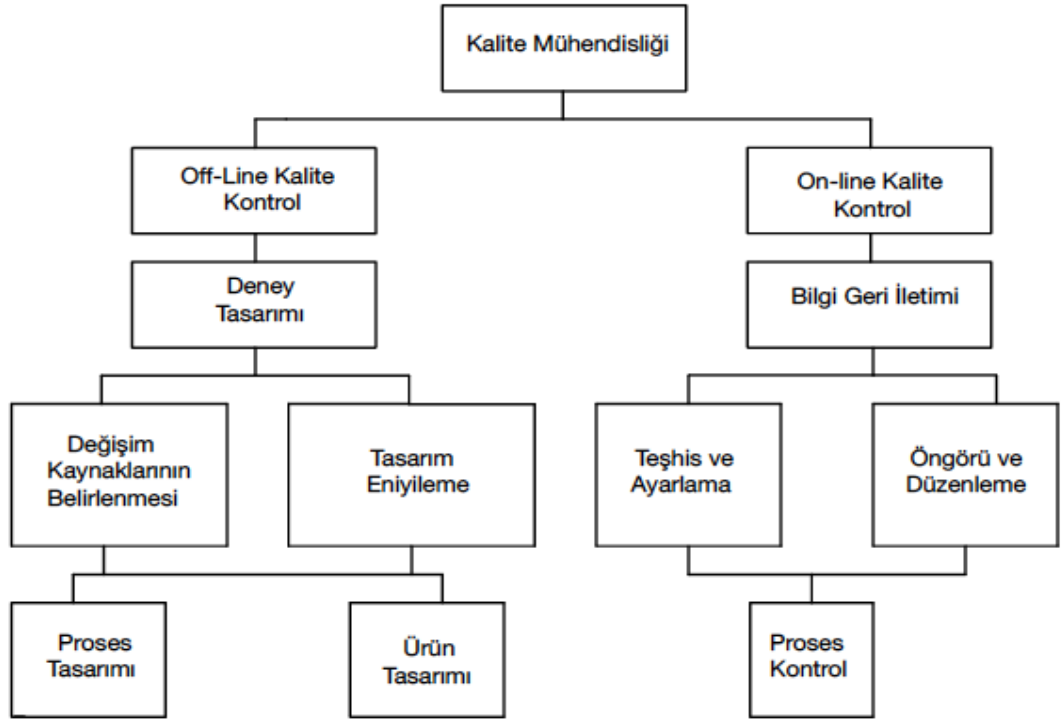
Taguchi yöntemi, Japon bilim adamı Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiş bir en iyileme metodudur. Taguchi'nin kalite felsefesinde üründeki kalitenin daha ürün tasarım aşamasında iken düşünülmesi gerektiği yer almaktadır ve bu bakış açısı bir devrim olarak nitelendirilmektedir. Taguchi'nin felsefesine göre ürün kalitesi üzerinde oluşabilecek değişkenlikler tasarım aşamasında giderilebilmekte ve böylece ürün istenen kalitede ekstra bir maliyete gerek kalmadan üretilebilmektedir (Krishnaiah 2012).

Taguchi, üründe ve proseste hedeflenen değerlerden sapma yaratan ve kontrol edilemeyen faktörlerin saptanmasının yanında, kontrol edilebilen faktörlerin (parametrelerin) değerlerinin en uygun olarak seçilerek ürün ve prosesteki değişkenliği en aza indirmeyi amaçlamıştır. Taguchi bu amaca sahip ürün tasarımına robust tasarım (sağlam tasarım) ismini vermiştir.

Taguchi yöntemine göre kalite sistemi üretim öncesi (off-line) ve üretim sonrası (on-line) olarak ikiye ayrılmaktadır.

Off-line kalite kontrol, pazar araştırması ile ürün ve üretim prosesinin geliştirilmesi sırasında gerçekleştirilen kalite faaliyetlerini içermektedir. Bu faaliyetler, ürüne doğrudan müdahaleler yerine üretimin başlamasından önce gerçekleştirilen tasarım çalışmalarıdır (Şirvancı 1997).

On-line kalite kontrol, ürün üretilmeye başladığında veya ürünün üretim aşamasından sonra (servis aşamalarında) gerçekleştirilen kalite aktivitelerini içermektedir. İstatistiksel proses kontrol ve parça üzerinde gerçekleştirilen kalite muayeneleri on-line kalite kontrol faaliyetleri arasında sayılmaktadır (Şirvancı 1997).



Şekil 3.2. Taguchi yöntemine göre kalite mühendisliği kavramının ayrılması (Baynal 2003)

Taguchi yönteminde bulunan off-line kalite kontrolü kendi içerisinde ikiye ayrılmaktadır. Bu ayırım ürün tasarımı ve proses tasarımı olarak tanımlanmaktadır. Kalite güvence aşaması olarak hem ürünün tasarım aşamasına ait hem de proses akışı için üç kalite aşaması tanımlanmaktadır. Bu aşamalar; sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı aşamalarıdır (Şirvancı 1997).

Çizelge 3.1 Taguchi`nin kalite sistemi (Baynal 2003)

		KONULAR	KALİTE SAĞLAMA AŞAMALARI
OFF-LINE KALİTE KONTROL	1. Aşama ÜRÜN TASARIMI	1. Müşteri gereksinim ve beklentilerinin belirlenmesi 2. Müşteri gereksinim ve beklentilerini karşılayacak ve aynı zamanda sürekli ve ekonomik olarak üretilebilecek bir ürünün tasarımı	1. Sistem Tasarımı 2. Parametre Tasarımı 3. Tolerans Tasarımı
	2. Aşama PROSES TASARIMI	Üretim için açık ve yeterli standart, spesifikasyon, yöntem ve üretim araçlarının tasarımı	1. Sistem Tasarımı 2. Parametre Tasarımı 3. Tolerans Tasarımı
ON-LINE KALİTE KONTROL	1. Aşama ÜRETİM	Ürünün daha önce ürün tasarım ve proses tasarım aşamalarında tespit edilmiş olan spesifikasyon ve standartlara göre üretilmesi	1. Proses saptaması ayarlama ve düzeltme, 2. Muayene ve ıskartaya çıkartma
	2. Aşama MÜŞTERİ İLİŞKİLERİ	Müşteriye servis hizmetinin verilmesi ve ürünün kullanımı sırasında çıkan problemlerle ilgili bilginin, ürün ve proses tasarımının geliştirilmesi için kullanılması	Geri besleme yoluyla ürün ve prosesin, spesifikasyon ve tasarımının değiştirilmesi

Sistem tasarımı, herhangi bir ürünün tasarım sürecindeki ilk proses olarak tanımlanmaktadır. Bu tasarım adımı ürünün konsept ve fonksiyonel tasarımlarını da içerisinde bulundurmaktadır. Konsept tasarım adımı ürünün nasıl görünmesi gerektiğini ve ürünün fonksiyonlarının belirlenmesi için fikirlerin öne sürüldüğü sistem tasarımı adımıdır. Fonksiyonel tasarım adımı ise, müşteri tarafından üründen istenen görevlerin tanımlandığı ve bu görevlerin nihai ürün tarafından nasıl gerçekleştirileceğinin belirlendiği tasarım adımıdır. Fonksiyonel tasarım esnasında bilimsel ve mühendislik bilgilerinin ürün üzerinde uygulanması amacıyla bir fiziksel veya matematiksel prototip hazırlanmaktadır (Krishnaiah 2012).

Parametre tasarımı, tasarım parametrelerinin nihai ürün ve nihai ürünün hedeflenen performansına ulaşması için gürültü faktörlerinin etkisinin yok edilmesi amacı ile optimum tasarım parametre ayarlarının araştırıldığı bir sağlam tasarım (robust tasarım) adımıdır. Bu adımda hedeflenen optimum tasarım parametrelerinin bulunması amacıyla

istatistiksel tasarım sahip deneyler veya ortogonal deneyler kullanılmaktadır (Krishnaiah 2012).

Toleransların tasarımı adımı parametre tasarımı adımından sonra belirlenmiş olan optimum parametre değerleri için tolerans aralıklarının belirlendiği sağlam tasarım (robust tasarım) adımıdır. Tolerans değerleri belirlenirken nihai ürünün hedeflenen performansından kayıp verilmemesi ve minimum üretim maliyeti ile üretilmesi hedeflenmektedir (Krishnaiah 2012).

Taguchi yöntemi farklı değişkenlerin farklı değerleri arasından en uygun kombinasyonun belirlenmesi için oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Her bir değişkene ait her bir farklı değer dikkate alındığı tüm kombinasyonlar için çok fazla sayıda deneysel çalışma yapılması gereken durumlarda, Taguchi yönteminde ortogonal dizi tablosu (Çizelge 3.2) kullanılarak yapılacak deney sayısı azaltılmakta ve sonuca daha kolay bir şekilde ulaşılabilmektedir (Güral 2003).

Taguchi felsefesine göre sağlam tasarım (robust tasarım), üç adet temel aşamaya dayanmaktadır. Bunlar;

- Dikey dizilim (ortogonal dizi)
- Sinyal / gürültü oranı (S/N oranı)
- Kayıp fonksiyonu (loss function) `dur (Yıldırım 2011).

Çizelge 3.2. Taguchi ortogonal dizi seçim tablosu

2				SEVİYE SAYISI		4		5			
				P=2	S=3	P=2	S=4	P=2	S=5		
P=2	S=2	L4	P=3	S=3	L9	P=2	S=4	L'16	P=2	S=5	L25
P=3	S=2		P=4	S=3		P=3	S=4		P=3	S=5	
P=4	S=2		P=5	S=3		P=4	S=4		P=4	S=5	
P=5	S=2	L8	P=6	S=3	L18	P=5	S=4	L'32	P=5	S=5	L50
P=6	S=2		P=7	S=3		P=6	S=4		P=6	S=5	
P=7	S=2		P=8	S=3		P=7	S=4		P=7	S=5	
P=8	S=2	L11	P=9	S=3	L27	P=8	S=4	L'32	P=8	S=5	L50
P=9	S=2		P=10	S=3		P=9	S=4		P=9	S=5	
P=10	S=2		P=11	S=3		P=10	S=4		P=10	S=5	
P=11	S=2	L16	P=12	S=3	L36			L'32	P=11	S=5	L50
P=12	S=2		P=12	S=3		P=11	S=5		P=12	S=5	
P=13	S=2		P=13	S=3		P=12	S=5				
P=14	S=2	L16	P=14	S=3	L36			L'32			L50
P=15	S=2		P=15	S=3							
P=16	S=2		P=16	S=3							
P=17	S=2	L16	P=17	S=3	L36			L'32			L50
P=18	S=2		P=18	S=3							
P=19	S=2		P=19	S=3							
P=20	S=2	L16	P=20	S=3	L36			L'32			L50
P=21	S=2		P=21	S=3							
P=22	S=2		P=22	S=3							
P=23	S=2	L16	P=23	S=3	L36			L'32			L50
P=24	S=2										
P=25	S=2										
P=26	S=2	L16			L36			L'32			L50
P=27	S=2										
P=28	S=2										
P=29	S=2	L16			L36			L'32			L50
P=30	S=2										
P=31	S=2										

Taguchi yönteminde üç tür gürültü tanımlanmaktadır. Bunlar;

- Dış gürültü: Çevre koşullarındaki farklılık (sıcaklık, nem oranı, voltaj, toz vb.),
- İç gürültü: Zamanla ve kullanma sonucu oluşan ürün aşınması, malzeme yorgunluğu gibi yıpranma,

- Birimler arası (parçalar arası) gürültü: Aynı spesifikasyona göre üretilmiş veya tedarik edilmiş olmasına rağmen, birimden birime görülen farklılık.

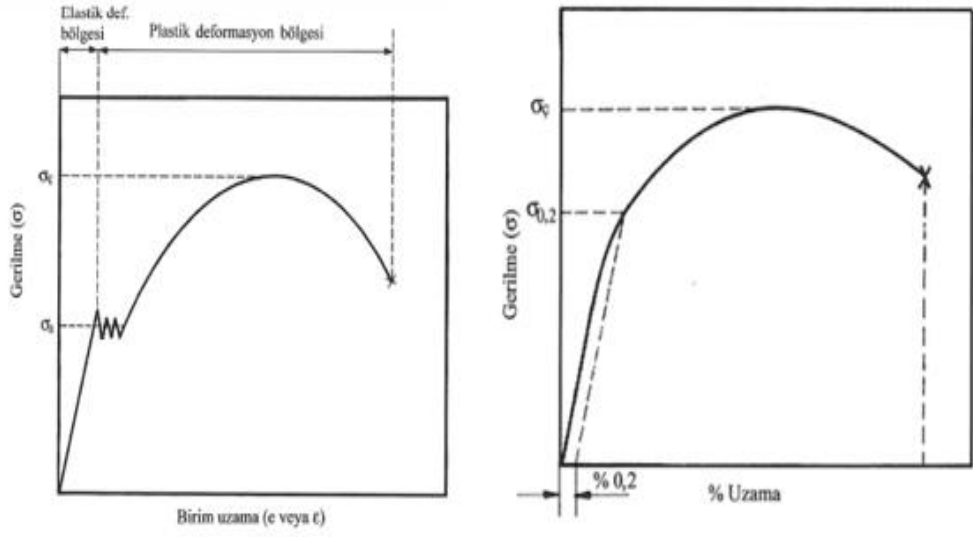
Taguchi yönteminde ortalama değerlerden farklı olarak analizinin yapılması gereken diğer bir büyüklük ise sinyal/gürültü oranıdır. Sinyal/gürültü oranının matematiksel ifadeleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Nominalin en iyi olduğu durumda, $SG_N = 10 \log_{10} \left(\frac{x^2}{s^2} \right)$
- Ne kadar büyük olursa o kadar iyi, $SG_B = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1/x_i^2 \right)$
- Ne kadar küçük olursa o kadar iyi, $SG_K = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \right)$

3.3. Çekme Deneyi

Yüksek basınçlı döküm ile üretilen parçalarda mekanik özelliklerin geliştirilmesi ve incelenmesi için kullanılan verilerden biri çekme mukavemeti değeridir. Çekme mukavemeti değeri ise Çekme Deneyi ile bulunabilir ve bu değer mühendislik hesaplamalarında ve malzemenin mekanik davranışını tahmin etme çalışmalarında doğrudan kullanılabilir.

Çekme deneyi, çekme deneyini gerçekleştirmesi için tasarlanan bir makine ve belirli standartlarda üretilen çekme çubukları ile gerçekleştirilmektedir. Çekme deneyinin sonucunda bir kuvvet (F) ve uzama (Δl) eğrisi elde edilmektedir. Ancak çekme deneyi sonucunda elde edilen gerilme-uzama grafiği, malzeme özelliklerinin tayini için kullanılmaktadır. Gerilme-uzama grafiğinin eldesi için deney esnasında uygulanan kuvvet, deney numunesinin kesit alanına bölünerek ($\sigma = F/A_0$) gerilme değerleri bulunmakta ve sonuçta gerilme-uzama grafiği elde edilmektedir (Anonim 2020).



Şekil 3.3. Örnek bir gerilme-uzama grafiği

3.4. Sertlik Deneyi

Malzemenin sertliği, malzemenin diğer mekanik özellikleri ile arasında paralel bir ilişkisinin olması dolayısı ile oldukça sık kullanılan bir değerdir. Malzeme sertliği, sertlik ölçme deneyi ile bulunmaktadır. Sertlik ölçme deneyi esnasında malzemeye hasar verilmez ve uygulanması oldukça kolay bir deneydir. Genellikle malzemenin çekme mukavemeti ile sertlik değeri arasında doğrusal bir bağlantı vardır (Anonim 2017).

Malzemenin sertliği, malzemenin sürtme, çizilme ve plastik deformasyona karşı olan direnci olarak tanımlanabilir.

Sertlik deneyleri uygulanacağı malzemeye göre farklılıklar göstermektedir. Sertlik ölçümü yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli husus malzeme üzerinde birden fazla ölçümün yapılması ve bu ölçüm sonuçlarının ortalamasının alınması gerekliliğidir. Toplamda dört farklı sertlik ölçüm yöntemi mevcuttur (Anonim 2017).

- 1) Brinell sertlik ölçme metodu,
- 2) Vickers sertlik ölçme metodu,
- 3) Rockwell sertlik ölçme metodu,
- 4) Mikro-sertlik ölçme metodu.

Zamak malzemedede, malzemenin sertliğinin belirlenmesi amacıyla Brinell sertlik ölçme yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde malzemeye uygulanan yük, çapı belirli olan bir bilye yardımı ile malzemeye verilmektedir. Yük malzemeye uygulandıktan sonra ortaya çıkan izin çapı ölçülür ve bu çap değerinden malzemenin Brinell sertlik değeri tayin edilmiş olur.

3.5. Numune Üretiminin Gerçekleştirilmesi

Bu tez çalışmasında sıcak kamaralı basınçlı döküm yöntemi ile üretilmiş zamak 5 materyalinden çekme numuneleri kullanılmıştır. Çekme numunelerinin üretimi esnasında üç farklı parametre üç farklı seviyede kullanılmıştır. Bu parametreleri ve seviyeleri gösteren tablo Çizelge 4.1`de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Çekme numunelerinin üretiminde değiştirilen parametreler ve seviyeleri

Parametreler	1.seviye	2.seviye	3.seviye
Birinci Faz Hızı	0,02 m/s	0,06 m/s	0,1 m/s
İkinci Faz Hızı	0,5 m/s	0,8 m/s	1,1 m/s
2. Faz Hızı Başlangıç Mesafesi	25 mm	35 mm	45 mm

Çizelge 3.4. Zamak 5 malzemenin kimyasal kompozisyonu

Element	İçerik Yüzdesi (%)
Çinko	≥ 99
Mangan	$\leq 0,35$
Demir	$\leq 0,20$
Silikon	$\leq 0,15$
Bakır	$\leq 0,15$
Karbon	$\leq 0,15$
Magnezyum	0,010 – 0,080
Titanyum	0,010 – 0,050
Sülfür	$\leq 0,0080$

Deney numunelerinin üretilmesi esnasında 3 farklı parametre 3 farklı seviyede kullanılmıştır. Bu bilgiye göre deney çalışmasında kullanılmak üzere L9 ortogonal dizisi seçilmiştir. Proses parametrelerine ait veriler L9 ortogonal dizisine yerleştirildiğinde Çizelge 4.3`de yer alan tablo ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 3.5. Deney numunelerinin üretiminde kullanılan proses parametrelerinin L9 ortogonal dizisine uygulanması

Deney Numarası	Birinci Faz Hızı (mm/s)	İkinci Faz Hızı (mm/s)	İkinci Faz Hızı Başlangıç Mesafesi (mm)
1	0,02	0,5	25
2	0,02	0,8	35
3	0,02	1,1	45
4	0,06	0,5	35
5	0,06	0,8	45
6	0,06	1,1	25
7	0,1	0,5	45
8	0,1	0,8	25
9	0,1	1,1	35



Şekil 3.4. Numune üretiminin gerçekleştirildiği basınçlı döküm makinesi

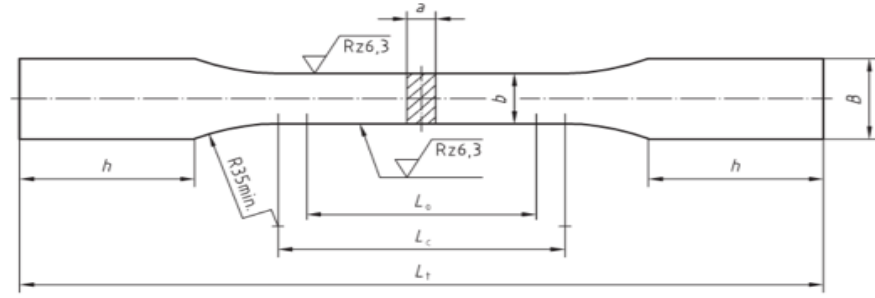
Çalışmada kullanılan numunelerin üretiminde kullanılan Frech marka W-125 model yüksek basınçlı döküm makinesine ait resim Şekil 3.5`te verilmiştir.

3.6. Çekme Deneyi Uygulaması

Bu tez çalışmasında, çekme deneyini gerçekleştirmek için kullanılan çekme cihazının fotoğrafı Şekil 3.7`de verilmiştir.

Çekme deneyinde kullanılan çekme test cihazı Utest markasının UTM-3000 modelidir.

Deney için hazırlanan numuneler DIN 50125:2004 standardında yer alan E tipi deney numunesidir.



Şekil 3.5. DIN 50125 standardında yer alan E tipi numune ölçüleri (DIN 50125:2004)



Şekil 3.6. Çekme deneyinin gerçekleştirildiği çekme deneyi cihazı

Numunenin ölçüleri şu şekildedir;

a (Deney numunesinin kalınlığı): 6 mm

b (Deney numunesinin genişliği): 20 mm

β (Tutucu kısım genişliği): 27 mm

h (Tutucu kısım uzunluğu): 50 mm

Lt (Deney numunesinin toplam uzunluğu): 210 mm`dir.



Şekil 3.7. Tez çalışmasında kullanılmak üzere Zamak 5 numuneler

Çizelge 3.6. Çekme deneyinin gerçekleştirilme parametreleri

Deney No	Kalınlık Değeri (mm)	Yüzey Alan (mm ²)	Uzunluk (mm)
1	20,46	565,684	80
2	20,45	562,740	80
3	20,41	563,414	80
4	20,44	562,288	80
5	20,45	565,230	80
6	20,44	564,776	80
7	20,44	563,532	80
8	20,44	564,776	80
9	20,44	564,532	80

3.7. Sertlik Deneyi Uygulaması

Bu tez çalışmasında, çekme deneyini gerçekleştirmek için kullanılan sertlik ölçme cihazının fotoğrafı Şekil 3.9`da verilmiştir.



Şekil 3.8. Sertlik deneyinin gerçekleştirildiği sertlik ölçüm cihazı

Sertlik deneyinde kullanılan sertlik ölçme yöntemi Brinell sertlik ölçme yöntemidir.

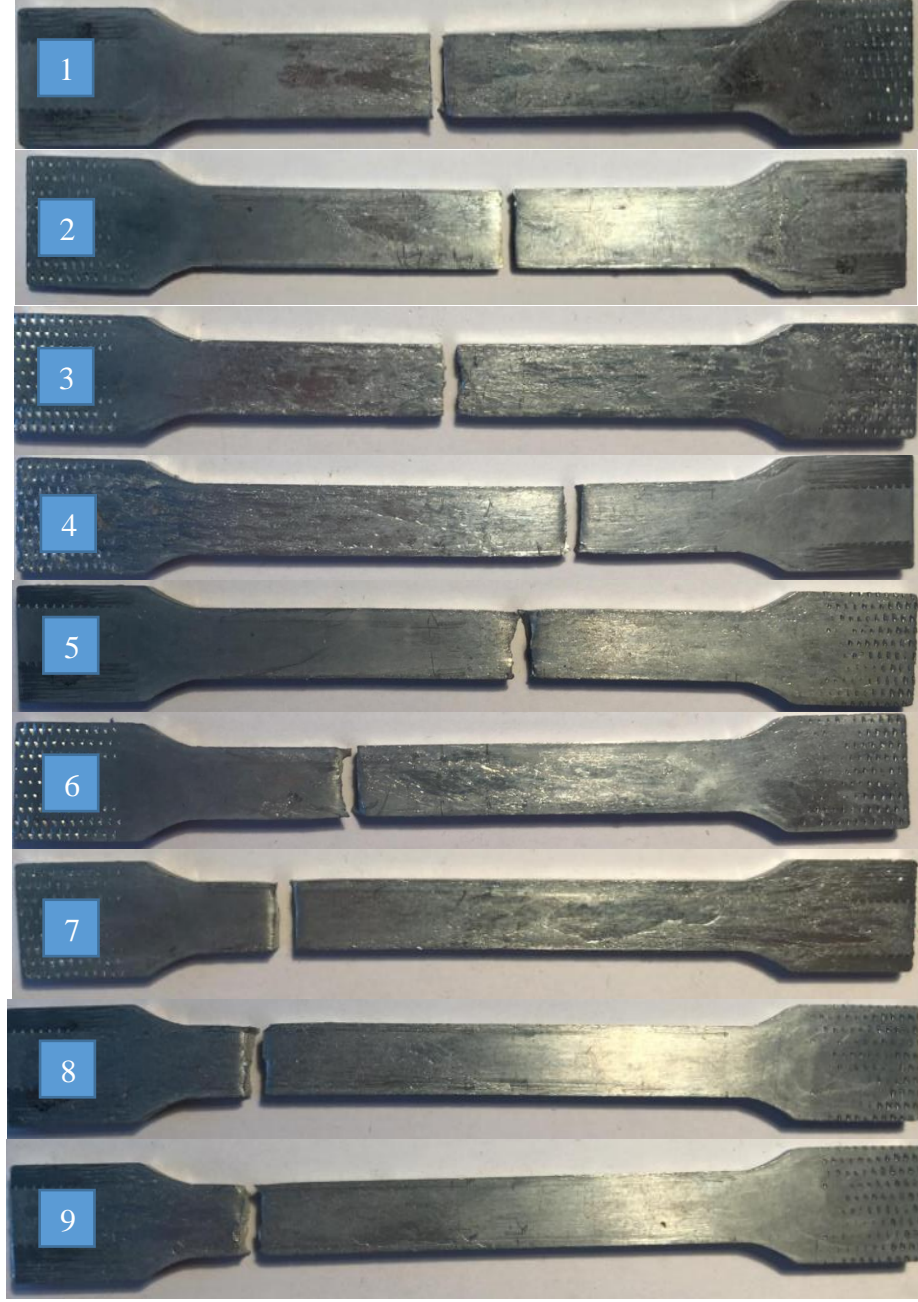
4. BULGULAR

Çalışma esnasında üretilen numuneler 1`den 9`a kadar numaralandırılmıştı. Bu numuneler üzerinde çekme deneyi ve sertlik deneyi uygulanarak numunelerin çekme mukavemetleri ve sertlik değerleri elde edilmiştir.

Çekme deneyinin sonuçları Çizelge 4.1`de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Çekme mukavemeti ve proses parametrelerinin L9 ortogonal tablosunda gösterimi

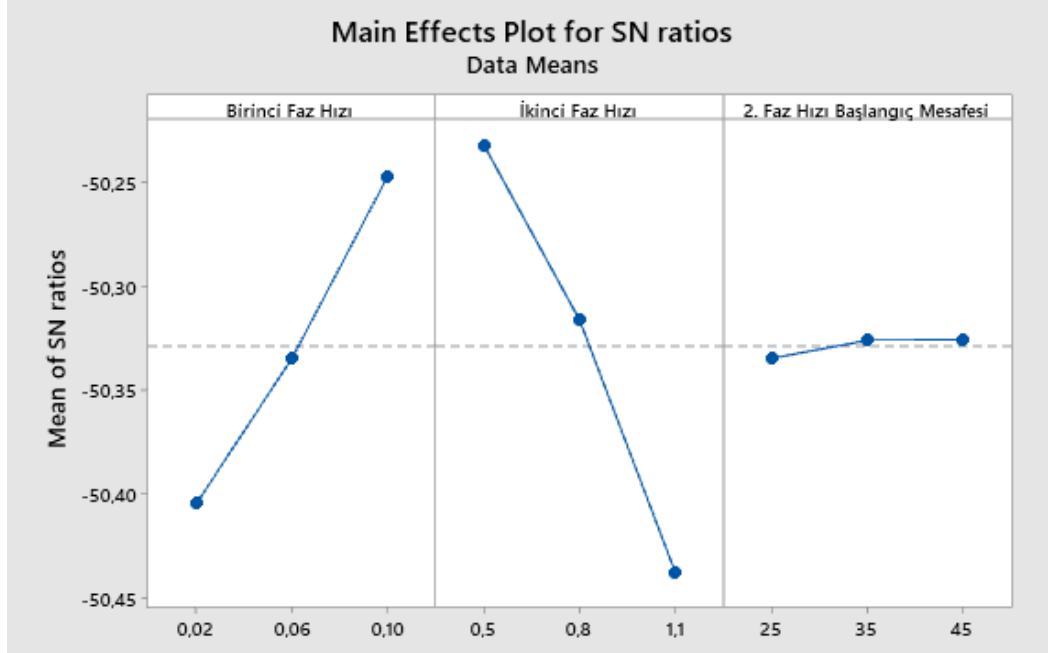
Deney Numarası	Birinci Faz Hızı (m/s)	İkinci Faz Hızı (m/s)	İkinci Faz Hızı Başlangıç Mesafesi (mm)	Çekme Mukavemeti (MPa)
1	0,02	0,5	25	328,1
2	0,02	0,8	35	330,3
3	0,02	1,1	45	335,6
4	0,06	0,5	35	325,1
5	0,06	0,8	45	328,3
6	0,06	1,1	25	332,6
7	0,1	0,5	45	321,2
8	0,1	0,8	25	325,3
9	0,1	1,1	35	329,6



Şekil 4.1. Çekme testi uygulanmış parçalar

Numuneler için çekme mukavemeti sonuçları bulunduktan sonra, Taguchi metodu ile veri analizinin gerçekleştirilmesi için Minitab 19.1.1. programı kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında S/N oranının belirlenmesi için kullanılan denklem ‘en küçük en iyi’ denklemdir.

Çekme mukavemeti değerlerinin de programa girilmesi ile program analiz için çalıştırılarak, gerekli olan sinyal/gürültü oranları program tarafından hesaplanarak S_N grafiği elde edilir.



Şekil 4.2. Çekme mukavemeti sonuçlarına göre bulunan S/N grafiği

Çizelge 4.2. Parametre seviyeleri – S/N değerleri çizelgesi (çekme deneyi için)

Seviye	Birinci Faz Hızı (mm/s)	İkinci Faz Hızı (mm/s)	İkinci Faz Başlangıç Mesafesi (mm)
1	-50,40	-50,23	-50,33475
2	-50,33	-50,32	-50,32608
3	-50,25	-50,44	-50,32579
Δ (Maksimum-Minimum)	0,16	0,21	0,00896
En iyi Seviye	2	1	3

Şekil 4.2 ve Çizelge 4.2'deki verilere bakıldığında 'en küçük en iyi' sinyal/gürültü oranına göre parametreler ve farklı seviyeleri incelendiğinde;

- Birinci faz hızı için en uygun parametre seviyesi 0,1 m/s olarak bulunmuştur.

- İkinci faz hızı için en uygun parametre seviyesi 0,5 m/s olarak bulunmuştur.
- İkinci faz hızı başlangıç mesafesi için en uygun parametre seviyesi 45 mm olarak bulunmuştur.

Üretimde yer alan parametrelerin her birinin ‘Çekme mukavemeti’ değerine etkisi incelenmek istendiğinde elde hali hazırda bulunan veriler ANOVA analizinde kullanılabilir. Bu amaçla tekrar Minitab 19.1.1. programı kullanılarak ANOVA analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları Çizelge 4.3`te yer almaktadır.

Çizelge 4.2. Üretim parametrelerinin çekme mukavemeti üzerine etkileri

Parametre	Serbestlik Derecesi (Df)	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P (p<0,05)	Parametre Etkisi (%)
Birinci Faz Hızı	2	53,6022	26,8011	66,82	0,0015	36,48
İkinci Faz Hızı	2	92,3356	46,1678	115,10	0,009	62,84
İkinci Faz Baş. Mesafesi	2	0,2022	0,1011	0,25	0,799	0,14
Hata	2	0,802	0,4011			0,55
Toplam	8	146,942				100

ANOVA analizi sonuçları (Çizelge 4.3)`na göre ‘İkinci Faz Hızı’ parametresinin üretilen parçanın çekme mukavemeti üstündeki etkisi % 62,84, ‘Birinci Faz Hızı’ parametresinin üretilen parçadaki çekme mukavemeti üzerine etkisi % 36,48 ve ‘İkinci Faz Başlangıç Mesafesi’ parametresinin parçanın çekme mukavemeti üzerindeki etkisi % 0,14 olarak bulunmuştur.

Bulunan bu sonuçlara göre üretilecek parçanın çekme kuvvetine en iyi şekilde mukavemet gösterebilmesi için dikkat edilmesi gereken en önemli parametre ‘İkinci Faz Hızı’ parametresi daha sonra da ‘Birinci Faz Hızı’ parametresidir. İkinci Faz Başlangıç Mesafesi`nin üretilecek parçanın çekme mukavemeti üzerinde etkisinin çok sınırlı olacağı analizler sonucunda görülmüştür.

Üç farklı parametrenin üç farklı seviyesine göre üretimi yapılmış olan toplam 9 adet numuneye ait sertlik deneyi sonuçları aşağıdaki Çizelge 4.4`de verilmiştir. Sertlik deneyinin sonuçlarının ve parametrelerin yer aldığı L9 ortogonal dizisi ise Çizelge 4.5`te verilmiştir.

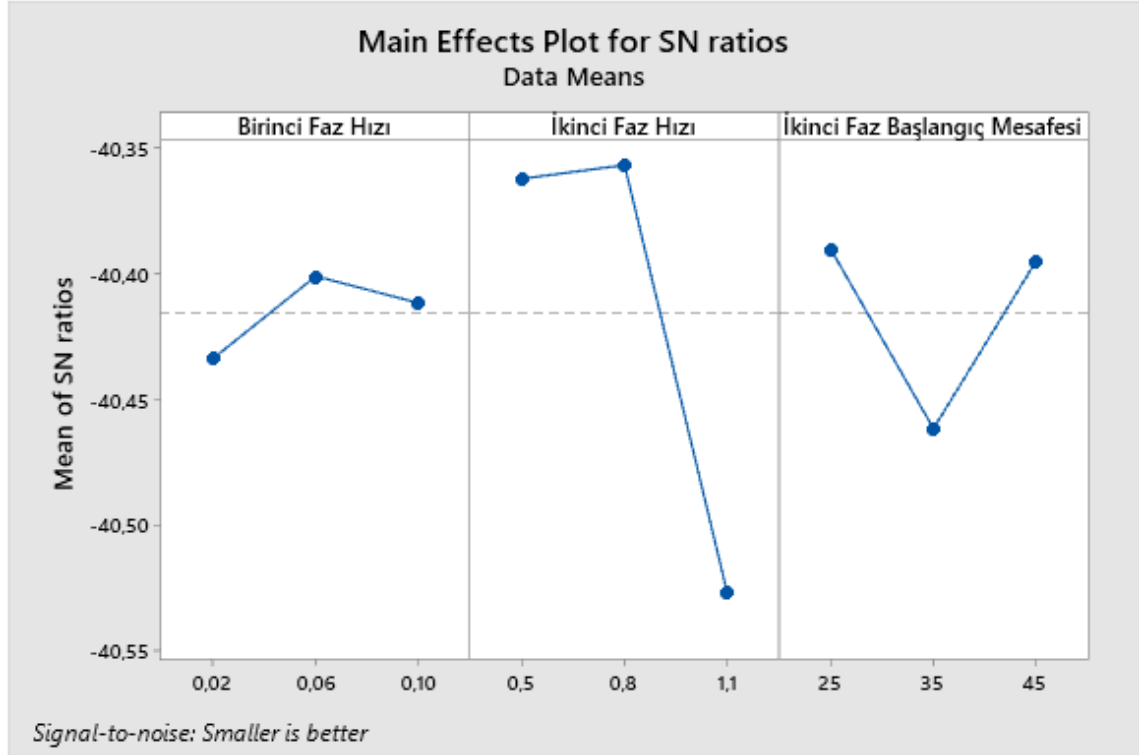
Çizelge 4.3. Sertlik deneyi sonuçları

Numune Adı	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	4. Ölçüm	5. Ölçüm	Ortalama Değer
Numune 1	103	104	104	104	105	104
Numune 2	104	104	107	104	104	104,6
Numune 3	107	107	108	105	107	106,8
Numune 4	107	104	107	104	104	105,2
Numune 5	104	104	104	102	104	103,6
Numune 6	105	107	107	104	104	105,4
Numune 7	104	104	104	104	102	103,6
Numune 8	107	103	104	104	104	104,4
Numune 9	107	107	108	104	107	106,6

Çizelge 4.4. Parametre değerlerinin ve sertlik sonuçlarının L9 ortogonal dizisinde gösterimi

Deney Numarası	Birinci Faz Hızı (m/s)	İkinci Faz Hızı (m/s)	İkinci Faz Hızı Başlangıç Mesafesi (mm)	Sertlik Değeri (HB)
1	0,02	0,5	25	104
2	0,02	0,8	35	104,6
3	0,02	1,1	45	106,8
4	0,06	0,5	35	105,2
5	0,06	0,8	45	103,6
6	0,06	1,1	25	105,4
7	0,1	0,5	45	103,6
8	0,1	0,8	25	104,4
9	0,1	1,1	35	106,6

Minitab 19.1.1. programıyla Taguchi analizinin gerçekleştirilmesi ile aşağıda Şekil 4.3`te yer alan S/N grafiği elde edilmektedir.



Şekil 4.2. Sertlik ölçüm sonuçlarına göre bulunan S/N grafiği

Çizelge 4.5. Parametre seviyeleri- S/N değerleri çizelgesi (sertlik deneyi için)

Seviye	Birinci Faz Hızı (mm/s)	İkinci Faz Hızı (mm/s)	İkinci Faz Başlangıç Mesafesi (mm)
1	-40,43	-40,36	-40,39
2	-40,40	-40,36	-40,46
3	-40,41	-40,53	-40,40
Δ (Maksimum-Minimum)	0,03	0,17	0,07
En iyi Seviye	3	1	2

Şekil 4.3 ve Çizelge 4.6`daki verilere bakıldığında ‘en küçük en iyi’ sinyal/gürültü oranına göre parametreler ve farklı seviyeleri incelendiğinde;

- Birinci faz hızı için en uygun parametre seviyesi 0,06 m/s olarak bulunmuştur.
- İkinci faz hızı için en uygun parametre seviyesi 0,8 m/s olarak bulunmuştur.
- İkinci faz hızı başlangıç mesafesi için en uygun parametre seviyesi 25 mm olarak bulunmuştur.

Üretimde yer alan parametrelerin her birinin ‘sertlik değeri ’ne etkisi incelenmek istendiğinde elde hali hazırda bulunan veriler ANOVA analizinde kullanılabilir. Bu amaçla tekrar Minitab 19.1.1. programı kullanılarak ANOVA analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları Çizelge 4.7’de yer almaktadır.

Çizelge 4.6. Üretim parametrelerinin sertlik değeri üzerine etkileri

Parametre	Serbestlik Derecesi (Df)	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P (p<0,05)	Parametre Etkisi (%)
Birinci Faz Hızı	2	0,2489	0,1244	0,17	0,853	2,19
İkinci Faz Hızı	2	8,2756	4,1378	5,71	0,149	72,79
İkinci Faz Baş. Mesafesi	2	1,3956	0,6978	0,96	0,509	12,28
Hata	2	1,4489	0,7244			12,74
Toplam	8	11,3689				100

ANOVA analizi sonuçları (Çizelge 4.7)’na göre ‘İkinci Faz Hızı’ parametresinin üretilen parçanın sertlik değeri üstündeki etkisi % 72,79, ‘Birinci Faz Hızı’ parametresinin üretilen parçadaki çekme mukavemeti üzerine etkisi % 2,19 ve ‘İkinci Faz Başlangıç Mesafesi’ parametresinin parçanın çekme mukavemeti üzerindeki etkisi % 12,28 olarak bulunmuştur.

Bu sonuçlara göre parçanın sertlik değerinin önemli olduğu durumlarda ‘İkinci Faz Hızı’ parametresine dikkat edilmesi çok büyük önem arz etmektedir. İkincil olarak ‘İkinci Faz Başlangıç Mesafesi’ parametresi de parçanın sertlik değeri üzerinde etkiliyken, ‘Birinci Faz Hızı’ parametresini parçanın sertlik değeri üzerinde etkisi nispeten diğer parametrelere göre oldukça sınırlıdır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında yüksek basınçlı metal enjeksiyon yöntemi ile otomotiv sektörü için parça üretimi yapılan bir işletmede, üretilen ürünlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilerek ürünlerin kalite karakteristiklerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Çalışma kapsamında öncelikle üretilen ürünün çekme mukavemetine etki edecek üretim parametreleri belirlenmiş ve daha sonrasında üç farklı parametrenin üç farklı seviyesi üzerinde Taguchi yöntemi uygulanarak, en iyi kalite karakteristiği için gerekli olan parametre seviyeleri belirlenmeye çalışılmıştır.

İşletme bünyesinde çalışan üretim ekibi ile yapılan toplantılar sonucunda ürünün mekanik özelliği üzerinde etkisi olan parametreler ve bu parametrelere ait farklı seviyeler belirlenmiştir. 3 farklı parametre için 3 seviyeli tasarımda en iyi mekanik özelliklerin hangi seviyede yakalandığının tespiti için L9 ortogonal dizisi kullanılmıştır. Bu sayede en iyi parametre seviyesinin tespiti için yapılması gereken $3^3 = 27$ adet deney yapılması gerekirken, Taguchi yönteminin kullanılması ile sadece 9 adet deney gerçekleştirilmiştir.

Yüksek basınçlı döküm yöntemi ile üretilen parçalarda en iyi mekanik özelliklere ulaşılması için gerekli olan faktörleri belirleyebilmek amacıyla MINITAB 19.1.1. paket programı kullanılarak Taguchi analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda en iyi mekanik özellikler için gerekli olan en uygun parametre seviyeleri önceden belirlenmiş olan 3 farklı parametre için belirlenmiştir.

Yapılan deney çalışmasına göre numune parçalardaki çekme mukavemetine yönelik şu yorumlar yapılabilir;

- Parçalardaki çekme mukavemetine etkisi bakımından seçilen parametreler arasındaki en önemli parametre %62,84 oranı ile 'İkinci Faz Hızı' olarak belirlenmiştir. İkinci faz hızı kalıp boşluğunun hangi hız ve hangi basınç ile ergimiş malzeme ile dolacağına etki eden bir parametredir. Kalıp boşluğu

içerisindeki ergimiş malzeme akışının, basıncın ve kalıp dolma hızının, döküm parçada porozite oluşumuna etkisinin büyüklüğü 'İkinci Faz Hızı' parametresinin deneyler esnasında bulunan yüksek etki değeri ile ilişkilendirilebilir. Bunun yanında 'İkinci Faz Hızı' için seçilen parametre seviye değerlerinden en düşük olan 0,5 m/s`de parçanın çekme mukavemetine etkisinin en yüksek olduğu bulunmuştur. Bu durumda ikinci faz hızı parametre seviyesinin sayısal olarak düşük değerlerde bulunmasının kalıp boşluğu içerisindeki ergimiş metal akışına iyi yönde etki ettiği ve porozite oluşumlarını azaltarak, parçanın çekme mukavemeti değerini arttırdığı yorumu yapılabilir. Pratik hayatta bu durumun kalıp içerisindeki basıncı düşürebileceği için özellikle ince cidarlı parçaların dökümünü zorlaştırabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca yüksek ikinci faz hızının dökülecek parçada çapaklara neden olabileceği ve kalıp boşluğu içerisindeki ergimiş metal akışında türbülanslar oluşturarak parça iç yapısında döküm boşluklarına neden olarak parçanın çekme mukavemetini düşüreceği sonucu da yapılan deney çalışmasından elde edilebilmektedir.

- Birinci Faz Hızı parametresinin, numune parçaların çekme mukavemeti üzerinde etkisi ANOVA analizi neticesinde seçilen parametreler arasından %36,48 ile ikinci yüksek önemde bulunmuştur. Birinci faz hızı parametresi, parçanın kaz boynu içerisindeki akış hızına direkt olarak etki eden bir parametredir. Bu parametrenin kalıp boşluğunu dolduran ergimiş metalin sıcaklığı ve yine akışın lineerliği üzerinde etkisi bulunmaktadır. Seçilen 'Birinci Faz Hızı' parametre seviyelerinden en yüksek değer olan 0,1 m/s`nin parçanın çekme mukavemeti üzerine etkisinin en iyi olduğu yapılan deney çalışması neticesinde bulunmuştur. Kazboynu içerisindeki metal akışında oluşacak sıcaklık kaybının minimum olması ve akışkanlığın korunarak lineer bir ergimiş metal akışının elde edilebilmesi yüksek birinci faz hızı değeri ile sağlanmıştır. Yüksek birinci faz hızı değerinin pratik hayattaki diğer bir pozitif etkisi ise parçanın çevrim süresini düşürerek seri üretime katkıda bulunmasıdır. Daha düşük birinci faz hızı değerleri ise ergimiş metal akışında sıcaklık farkları yaratacak, metalin akışkanlık özelliğini kötü etkileyecek ve ergimiş metal akışında türbülanslar yaratacaktır. Bu durumda

dökülen parçada poroziteler oluşacak ve üretilen parçaların çekme mukavemet değerleri düşecektir. Düşük birinci faz hızı parametre değerinin pratik hayattaki diğer negatif etkisi ise çevrim süresini arttırması ve üretilen parça maliyetinin de bu sebeple artmasıdır.

- İkinci Faz başlangıç mesafesi parametresi, döküm esnasında ikinci fazın başlangıcı esnasında ergimiş metali iten pistonun konumunu ifade eder. Bu parametrenin parçanın çekme mukavemeti üzerinde etkisi ANOVA analizi neticesinde %0,14 ile çok düşük bir seviyede bulunmuştur. Bu parametrenin etki ettiği en önemli durum döküm prosesinde birinci faz aşamasının ne kadar süreceğidir. Bulunan sonuçtan yapılacak çıkarım ise Birinci Faz aşamasının zamanının parçaların çekme mukavemetine etkisinin çok düşük olduğudur.

Yapılan deney çalışmasına göre numune parçalardaki sertlik değerine yönelik şu yorumlar yapılabilir;

- Parçalardaki sertlik değerine etkisi bakımından seçilen parametreler arasındaki en önemli parametre %72,79 oranı ile 'İkinci Faz Hızı' olarak ANOVA analizi neticesinde bulunmuştur. Taguchi analizi ile bulunan en optimum ikinci faz hızı parametre değeri ise 0,8 m/s`dir. Bu durumda ikinci faz hızı parametresinin düşük değerlerinde, yüksek değerlere göre daha lineer bir akışın yakalanarak parçanın mekanik özelliklerine etkisinin en iyi olduğu çıkarımı yapılabilir ve bu çıkarım çekme deneyi sonuçları ile uyumludur. Pratik hayatta yüksek ikinci hız parametre değerleri görsel yüzey kalitesini ve çevrim süresini iyileştirebilir ancak parçanın mekanik özellikleri bundan kötü yönde etkilenecek ve parçada çapak oluşumu gözlenebilecektir.
- Parçalardaki sertlik değerine etkisi bakımından seçilen parametreler arasından en yüksek önemde olan ikinci parametre ANOVA analizi neticesinde %12,28 değeri ile 'İkinci Faz Başlangıç Mesafesi' olarak bulunmuştur. İkinci faz başlangıç mesafesinin döküm prosesindeki en önemli etkisi Birinci Faz aşamasının süresini

belirlemesidir. Taguchi analizi neticesinde bulunan optimum parametre değeri 25mm olmuştur. Bu durumda 'Birinci Faz' aşamasının kısa sürede tamamlanması neticesinde parça yüzeyinde daha iyi sertlik değerleri bulunacağı tespit edilmiştir. Birinci faz sürecinde düşecek sıcaklık değerinin minimum olması ve bu sayede ergimiş metaldeki akışkanlığın korunarak lineer bir ergimiş metal akışının oluşmasının iyi yüzey sertliği değerlerinin elde edilmesindeki pozitif etkisi yapılan deneyler sonucunda tespit edilmiştir.

- Yapılan çalışmada Birinci Faz Hızı parametresinin parçaların yüzey sertlik değerleri üzerine etkisinin %2,19 ile çok düşük olduğu tespit edilmiştir. Taguchi analizi ile en optimum parametre seviyesi birinci faz hızı parametre seviyeleri arasından 0,06 m/s olarak bulunmuştur. Buradan yapılacak çıkarım ise parçalarda yüzey sertliği söz konusu olduğunda birinci faz aşamasının süresinin, birinci faz aşaması hızından daha önemli olduğudur.

KAYNAKLAR

- Anonim 2017.** Gümüşhane Üniversitesi Makine Mühendisliği Sertlik Deneyi Föyü. <http://makine.gumushane.edu.tr/media/uploads/makine/files/sertlik-deneyi-foyu.pdf> (Erişim Tarihi: 17.01.2021)
- Anonim, 2016.** NADCA Publication: 101 BK. North American Die Casting Association, Illinois, USA, 112 pp.
- Anonim, 2019.** Die Casting Applications. <https://www.ikd-china.com/en-pro-apply.html> (Erişim Tarihi: 06.10.2020)
- Anonim, 2020.** Çekme Deneyi Deney Föyü. <http://makina.deu.edu.tr/wp-content/uploads/2017/09/2Cekme.pdf>-(Erişim Tarihi: 12.10.2020).
- Anonim, 2020.** Hot Chamber Die Casting Process. <https://www.dynacast.com/en/speciality-die-casting/die-cast-process/hot-chamber-die-casting->(Erişim Tarihi: 05.10.2020).
- Apparao, K.C., Birru, A.K. 2016.** Optimization of Die Casting Process Based on Taguchi approach. 6th International Conference of Materials Processing and Characterization, 5-7 December 2016, Hyderabad, India.
- Aran, A. 2007.** Döküm Teknolojisi İmal Usulleri Ders Notları. İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul, Türkiye, 106 s.
- Aslan, O.S. 2007.** Basınçlı Dökümde Kaliteyi Etkileyen Faktörlerin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul.
- Baynal, K. 2003.** Çok Yanıtlı Problemlerin Taguchi Yöntemi ile Eniyilemesi ve Bir Uygulama. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Ana Bilim Dalı, İstanbul.
- Çetin, A. 2017.** Alüminyum Döküm Alaşımları. Dökümhane Akademi, İstanbul, Türkiye, 85 s.
- Çiğdem, M. 2006.** İmal Usulleri. Çağlayan Kitabevi, İstanbul, Türkiye, 424 s.
- Ertürk S. Ö. 2010.** Al Alaşımlarının Basınçlı Dökümünde Yolluk Sisteminden Kaynaklanan Gaz Problemlerinin Simülasyon Tekniği ile İncelenmesi. Yüksek Lisans

Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya.

Gökçe, B., Taşgetiren, S. 2009. Kalite İçin Deney Tasarımı. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6(1): 71-73.

Gözen, A. 2007. Basınçlı Döküm Kalıplarında Yolluk Sistemlerinin Tasarımı ve Simülasyonunun İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul.

Güral, G. 2003. Gaz Kaynağında Proses Parametrelerinin Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İzmir.

Krishnaiah, K., Shahabudeen, P. 2012. Applied Design of Experiments and Taguchi Metodu, PHI Learning Private Limited, New Delhi, India, 362 pp.

Lazic, Z. R. 2004. Design of Experiment in Chemical Engineering A Practice Guide. Wiley-Wch Inc, 620pp.

Polat, B. D. 2013. Zamak alaşımı nedir? Zamak'tan nasıl para kazanılır? Metalürji Dergisi, 159: 34-45.

Şirvancı, M. 1997. Kalite İçin Deney Tasarımı Taguchi Yaklaşımı. Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama San. Tic. Ltd. Şti, İstanbul, Türkiye, 110 s.

Taguchi, G. Chowdbury, S. Wu, Y. 2005. Taguchi's Quality Engineering Handbook. John Wiley & Sons Inc, New Jersey, USA, 1662 pp.

Yang, K., El-Haik, B. 2003. Design For Six Sigma. McGraw-Hill Companies Inc., New York, USA, 624 pp.

Yıldırım, S. 2011. Ürün Tasarım Geliştirmesi: Taguchi Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara.