

**T.C.**  
**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

**SOĞUK TOZ PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE KATI PARÇA ÜRETİMİ**  
**TASARIMI**

**BİTİRME PROJESİ**

MERT TAPAĞ

OĞUZ ELBÜKEN

CANER TOY

HAYDAR AKBULUT

**HAZİRAN 2021**

**TRABZON**

**T.C.**  
**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

**SOĞUK TOZ PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE KATI PARÇA ÜRETİMİ**  
**TASARIMI**

MERT TAPAĞ  
OĞUZ ELBÜKEN  
CANER TOY  
HAYDAR AKBULUT

**Danışmanlar:** Prof. Dr. Hasan GEDİKLİ

**Bölüm Başkanı:** Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU

**HAZİRAN 2021**  
**TRABZON**

## ÖNSÖZ

Proje fikrini beğenip sorumluluk almak istediğimizde bize güvenip, yapabileceğimize inanan ve projeyi yürütme esnasında yardımlarını, önerilerini ve yönlendirmelerini esirgemeyen değerli hocamız Prof. Dr. Hasan GEDİKLİ 'ye teşekkürü bir borç bilip saygılarımızı sunarız.

Isıtıcı tasarımı konusunda bizlere iş tecrübesini aktararak danışmanlık edip, fikir veren Ziyatin ELBÜKEN 'e sonsuz teşekkürlerimizi sunarız.

Bu zorlu pandemi sürecinde her türlü zorlu koşullara rağmen bu proje üzerinde emek veren herkese sonsuz teşekkürlerimizi sunarız.

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
İÇİNDEKİLER .....	IV
ÖZET .....	VI
SUMMARY .....	VII
TABLOLAR DİZİNİ .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XI
1. AMAÇ ve KAPSAM .....	1
1.1. GİRİŞ.....	1
1.1.1 SOĞUK PÜSKÜRTME SİSTEMLERİ.....	2
1.2 SOĞUK PÜSKÜRTME PROSESİ.....	3
1.3 SOĞUK PÜSKÜRTME SİSTEMİNİN TEMEL BİLEŞENLERİ.....	5
1.4 KAPLAMA TOZLARI ve UYGULAMA ALANLARI.....	6
1.5 SOĞUK PÜSKÜRTME PROSESİNİN AVANTAJLARI ve DEZAVANTAJLARI .....	7
1.6 SOĞUK PÜSKÜRTME PROSESİNİN TERMAL SPREY PROSESLERİNE GÖRE FARKLILIKLARI VE AVANTAJLARI.....	9
1.7 LİTERATÜR TARAMASI.....	10
1.8 KISITLAR ve KOŞULLAR.....	11
2. HAFTALIK ÇALIŞMA PROGRAMI .....	12
3. YAPILAN TASARIM ÇALIŞMALARI ve HESAPLAMALAR .....	13
3.1 LÜLE TASARIMI .....	13
3.1.1 YAKINSAK – IRAKSAK LÜLELER.....	13
3.1.2 MALZEME SEÇİMİ.....	13
3.1.3 SÜPERSONİK LÜLE PROFİLİ ÇİZİMİNİN AÇIKLANMASI .....	13
3.1.4 LÜLE HESAPLANMASINDA KULLANILAN EŞİTLİKLER.....	15
3.1.5 YAKINSAK – IRAKSAK LÜLE ve BAŞLANGIÇ ŞARTLARI.....	18
3.1.6 YAKINSAK – IRAKSAK LÜLE EĞRİSİNİN HESAPLAMALARI ...	19
3.1.7 DEĞİŞEN LÜLE GEOMETRİSİNİN ETKİLERİ .....	22

3.2 ISITICI TASARIMI .....	27
3.3 ISITMA ODASI TASARIMI.....	28
3.3.1 ISITMA TÜPÜ .....	31
3.3.2 ÖN KAPAK .....	32
3.3.3 ARKA KAPAK.....	33
3.3.3.1 ISITMA TÜPÜ ANALİZİ.....	34
3.3.4 BESLEME.....	38
3.3.5 BESLEME KAPAĞI.....	40
3.4 YAPILAN ÇALIŞMANIN İMALAT GÖRÜNTÜLERİ.....	41
4.ÇEVRESEL ETKİ DEĞERLENDİRMESİ .....	45
5. MALİYET HESABI .....	46
6. SONUÇ .....	47
7. KAYNAKLAR .....	48

## ÖZET

### SOĞUK TOZ PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE KATI PARÇA ÜRETİMİ TASARIMI

Çoğu püskürtme materyalinin erime noktasının altındaki bir sıcaklıkta, parçacıkların süpersonik bir hızla biriktirildiği bir katı hal süreci işlemi olan soğuk püskürtme bir farklılıkla geniş termal püskürtme ailesine aittir. Biriktirme davranışını etkileyen hemen hemen tüm önemli parametreleri ve gelişmekte olan bu teknolojinin avantajları, sınırlamaları ile birlikte bu yazıda çeşitli yönleriyle açıklanmıştır. Aynı zamanda bu işlemin uygulamaları ve bu sürecin gelişim tarihi ele alınmıştır. Bu teknoloji 30 yıl önce ortaya çıkmış olmasına rağmen hala kendini pratik endüstriyel teknoloji olarak kendini kanıtlayamamıştır. Bu nedenle, kamu/özel kaynaklardan gelen fonların yanı sıra bu kaplama işleminin ticarileştirilmesi için çabalar gerekmektedir. Soğuk sprej teknolojisi önümüzdeki on yıl içinde dünya çapında uygulanabilir bir kaplama süreci olarak büyüme görülmesi bekleniyor.

**Anahtar Kelimeler:** (Soğuk Sprej; Termal Sprej, Kaplama; Aşınma.)

## **Summary**

### **SOLID PARTS PRODUCTION DESIGN WITH COLD POWDER SPRAYING METHOD**

**ABSTRACT.** Cold spray (CS) belongs to a wide family of thermal spray technology with the difference that it is a solid state process in which spray particles are deposited via supersonic velocity impact at a temperature much below the melting point of the spray material. This paper briefly describes the various aspects of this rapidly emerging technology, with almost all the important parameters which affect the deposition behavior along with advantages and limitations; applications and history of emergence of this process is also reviewed. Though this technology emerges three decades ago but still it could not establish itself as viable practical industrial technology. Hence, the efforts, along with funding from public/private sources are required to commercialize this coating process. It is expected that next decade will see the growth of cold spray as a viable coating process around the globe.

**KEYWORDS.** Cold Spray; Thermal Spray; Coating; Corrosion.

<b>Tablo 1.</b> Malzemelerin prosesler ile uygulama alanları.....	6
<b>Tablo 2.</b> Lülenin belirtilen şartlara göre tasarım parametreleri.....	19
<b>Tablo 3.</b> Geometri ile Mach sayısı değişim tablosu.....	22
<b>Tablo 4.</b> Isıtma odası teknik resim bileşen tablosu.....	30
<b>Tablo 5.</b> Maliyet hesabı tablosu.....	46



<b>Şekil 1.1</b> Şematik olarak soğuk sprey prosesi.....	3
<b>Şekil 1.2</b> Soğuk püskürtme sisteminin temel bileşenleri.....	5
<b>Şekil 3.1</b> Yakınsak-Iraksak lüle iç kesiti.....	14
<b>Şekil 3.2.</b> Lülenin iç profilini oluşturan çember yayları ve çizgi parçaları.....	14
<b>Şekil 3.3.</b> Lüle iç profil konturunun parametrelerle ölçülendirilmesi.....	15
<b>Şekil 3.4.</b> Belirtilen sınır şartlarına göre hesaplanmış lüle profili ölçüleri.....	20
<b>Şekil 3.5</b> Ampirik bağıntılarla hesaplanan nozzle tasarımının Ansys programında analizi.....	21
<b>Şekil 3.6</b> Boğaz Çapı – Mach Sayısı değişimi.....	23
<b>Şekil 3.7</b> Seçilen lülenin teknik resim görüntüsü.....	24
<b>Şekil 3.8</b> Lüle tasarım analizleri.....	26
<b>Şekil 3.9</b> Lülenin imalat fotoğrafı.....	26
<b>Şekil 3.10</b> Kullanılan ısıtıcı görüntüsü.....	27
<b>Şekil 3.11</b> Isıtma odası kesit görünümü.....	28
<b>Şekil 3.12</b> Isıtma odası montajı izometrik görünümü.....	29
<b>Şekil 3.13</b> Isıtma odası teknik resim görünümü.....	29
<b>Şekil 3.14</b> Isıtma odası teknik resim detay görünümü.....	30
<b>Şekil 3.15</b> Isıtma tüpünün teknik resimi.....	31
<b>Şekil 3.16</b> Isıtma tüpünün izometrik görünüşü.....	32
<b>Şekil 3.17</b> Ön kapak izometrik görünüşü.....	32
<b>Şekil 3.18</b> Ön kapak teknik resim görünümü.....	33
<b>Şekil 3.19 (A)</b> Arka kapağın izometrik görünüşü. <b>(B)</b> Kesit görünüşü.....	33

<b>Şekil 3.20</b> Arka kapak teknik resim görünümü.....	34
<b>Şekil 3.21</b> Toplam deformasyon dağılımı.....	35
<b>Şekil 3.22</b> Eş değer gerilmeler dağılımı.....	36
<b>Şekil 3.23</b> Emniyet Katsayısı.....	37
<b>Şekil 3.24</b> (A) Besleme kanalının kesit görünüşü. (B) İzometrik görünüşü.....	38
<b>Şekil 3.25</b> Beslemenin teknik resim görüntüsü.....	39
<b>Şekil 3.26</b> Besleme kapağının izometrik görünüşü.....	40
<b>Şekil 3.27</b> Isıtma odası ve ısıtıcı.....	41
<b>Şekil 3.28</b> Isıtıcının, ısıtma odası içindeki görünümü.....	42
<b>Şekil 3.29</b> Isıtıcı detay görünüm.....	43
<b>Şekil 3.30</b> Montaj görünüm.....	44

## SEMBOLLER DİZİNİ

P: Basınç (Mpa)

m: Kütle (kg)

M: Mach sayısı

V: Hacimsel debi (m<sup>3</sup>/s)

D: Çap (mm)

k: İzentropik gaz üssü

$\rho$ : Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)

T: Sıcaklık (K)

R: Radyus (mm)

R: İdeal gaz sabiti (kJ/kg.K)

$\phi$ : Açı (A)

L: Uzunluk (mm)

## 1. AMAÇ ve KAPSAM

Teknolojinin hızla ilerlemesiyle metalik malzemelerin herhangi bir işlem uygulanmadan göstermiş olduğu performansı, ağırlaşan şartlar altında yetersiz kalmaktadır. Bu yöntemle diğer kaplama ve üretim yöntemlerine göre daha iyi bir yüzey pürüzlülüğü ve korozyon direnci elde edilir.

### 1.1 Giriş

Endüstriyel uygulamalarda özellikle aşınmaya, korozyona, oksidasyona ve yüksek sıcaklığa dirençli kaplamaların üretiminde hızla pazar gücünü geliştiren termal sprey prosesleri (ark sprey, alev sprey, plazma sprey, yüksek hızda oksit yakıt sprey) yeni fonksiyonel kaplama ünitelerinin gelişimi, artan otomasyon kabiliyeti, daha güçlü ve efektif tabanca tasarımlarının geliştirilmesi ile sektörel beklentileri önemli ölçüde karşılamaktadır. Termal sprey prosesleri ile üretilen kaplama mikro yapılarında ergitme ve hızlı katılma nedeniyle kaplama kesiti boyunca farklı boyut ve dağılımda süreksizlikler (porozite, çatlak, oksit vb.) ile artık gerilmeler ve inklüzyonlarla karşılaşılması olasıdır. Proses parametreleri, hızlı püskürtme koşulları ve kontrollü atmosfer ortamında süreksizlikler belirli ölçüde engellenebilmesine karşın proses maliyetleri ve uygulama pratikliği açısından sürekli yeni proses arayışları sürmektedir. Bu bağlamda 1980'lerin sonlarında Anatoli Papyrin ve takım arkadaşları (Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Novosibirsk, Russia) tarafından kapsamlı deneysel çalışmalar esnasında soğuk gaz sprey adı verilen bir yeni kaplama prosesi geliştirilmiş (1994 Amerika, 1995 Avrupa da patent) ve bu prosesin keşfedilmesinden itibaren yakın zamanda çok hızlı bir gelişmeler gözlenmiştir. Soğuk sprey prosesi diğer termal sprey proseslerine göre ergime olmaksızın katı halde parçacıkların çok yüksek hızda ve düşük sıcaklıkta püskürtülerek daha yoğun kaplama üretimine olanak sağlamaktadır. Günümüzde soğuk sprey prosesi güvenilir ve çevre dostu bir teknoloji olup, özellikle metalik esaslı kaplamaların endüstriyel uygulamalarında birçok açıdan önemli fırsatlar sunmaktadır.[5]

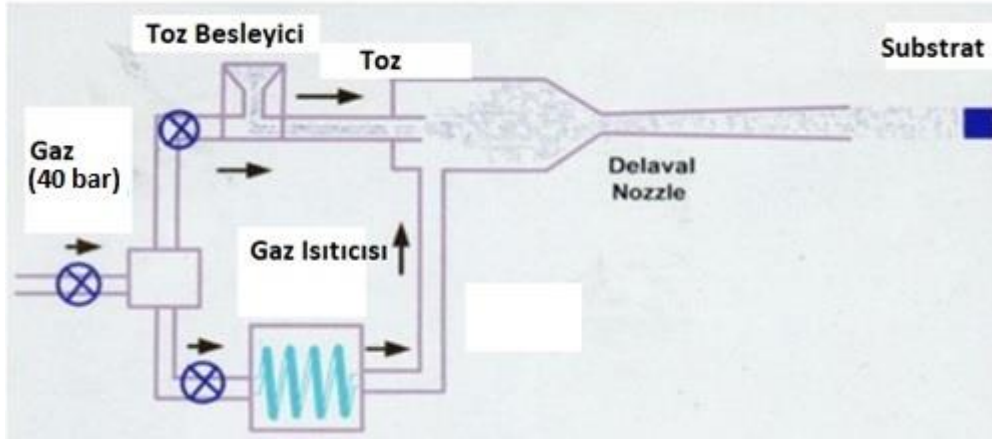
### 1.1.1 SOĞUK PÜSKÜRTME SİSTEMLERİ



Soğuk Püskürtme (CS) termal sprey süreçlerinin büyük aile altına girer nispeten yeni bir sprey teknolojisidir. Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme, Kinetik Püskürtme, Yüksek Hız Parçacık Konsolidasyonu (HVPC), Yüksek Hız Toz Birikimi ve Süpersonik Parçacık / Toz Birikimi (SPD) gibi farklı isimleri ile bilinen farklı yaklaşımlar vardır. Soğuk püskürtme işleminin temel prensibi çok basittir; toz parçacıklarını ivmelendirmek ve lülenin çıkışından yaklaşık 25mm uzağa yerleştirilen parçanın alt tabakasına (substrate) püskürterek darbe ve kaplama işlemi yapılması için bir yüksek hız gaz jeti (300-1200 m/s), bir deLaval veya benzeri yakınsama lülesi kullanılmasıdır. Partiküllerin yüksek sıcaklıktan ziyade kinetik enerjisi, bu partiküllerin darbe sırasında plastik olarak deforme olmasına ve kaplamalar oluşturmak için birbirine bağlanan ve böylece yüksek sıcaklıkta oksidasyon, buharlaşma, erime, kristalleşme, artık gerilmeler, gaz salınımı gibi geleneksel termal püskürtme yöntemlerinin birçok zararlı eksikliğini ortadan kaldıran veya en aza indiren kaplama oluşturmasına yardımcı olur. Bu işlemde toz partikülleri geleneksel termal püskürtme işleminde olduğu gibi her zaman malzemenin erime noktasından daha düşük bir sıcaklıkta süpersonik gaz jeti kullanılarak katı haldeki partiküllerin oluşması ve dolayısıyla tozlar tarafından erime ve katılaşma süreci yaşanmadan kaplama yapılır. Ayrıca, Soğuk püskürtme ışınının izdüşümü lülenin (10-15 mm<sup>2</sup>) küçük boyutu ve püskürtme mesafesi (5-25 mm) nedeniyle tipik olarak 5 mm çapında çok dardır ve yüksek yoğunluklu bir parçacık ışını sağlayarak substrat yüzeyindeki birikinti alanı üzerinde hassas kontrol sağlar. Bu işlem, mikro vuruşlu çekiçlemeye benzer ve dolayısıyla kaplamalar yoğun ve ultra kalın (5-50mm) kaplamalarla sonuçlanan çekme gerilmeleri yerine basınç gerilmeleri ile yapışma hatası olmadan üretilir. Düşük sıcaklıkta kaplama oluşumu oksitlere ve işlenmiş mikro yapıya sahip kapanımlara yol açar.

## 1.2 SOĞUK PÜSKÜRTME PROSESİ

Soğuk sprej prosesi özellikle metalik toz parçacıkların çok yüksek hızla (süpersonik) ivmelendirilerek yüzeye çarpmaları sonucunda parçacıkların deformasyon kabiliyetine bağlı olarak yüzeyde birikmesine olanak sağlayan yeni bir kaplama prosesidir. Bu yüksek ivmelenme proses gazlarının (hava, azot, helyum ve karışım kombinasyonu) önce ısıtılması ve basınç altında sıkıştırılmasını takiben nozülde (Laval Nozül) genişleşerek çıkışı ile sağlanmaktadır (Şekil 1.1). Proses bu nedenle; kinetik metalizasyon, soğuk gaz dinamik sprej, kinetik sprej, yüksek hızda yüzeyde toz biriktirme prosesi gibi değişik isimlerle birlikte tanımlanmaktadır.

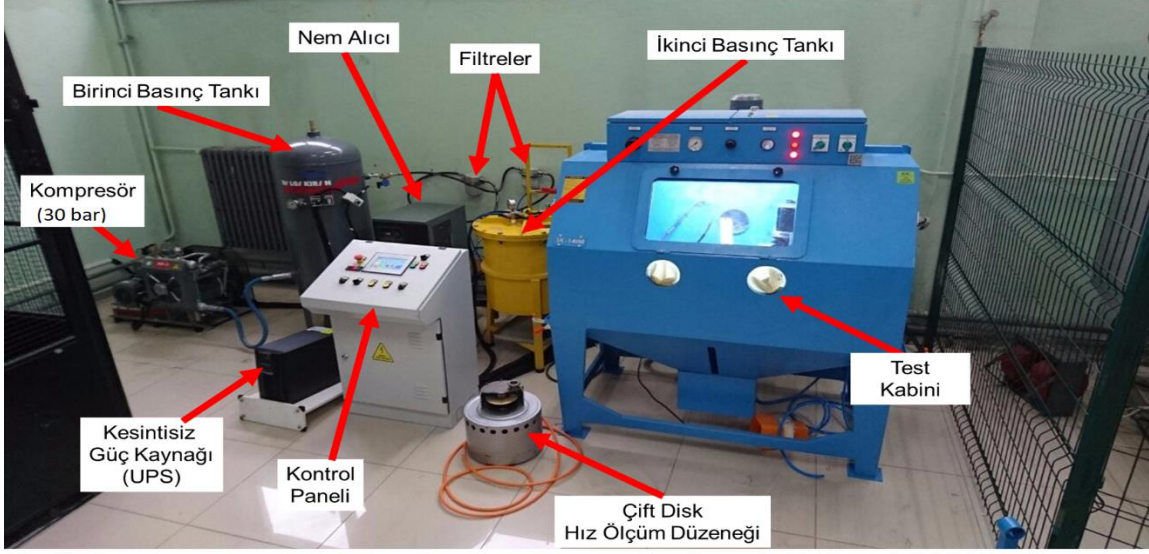


Şekil 1.1 Şematik olarak soğuk sprej prosesi.

Prosesin fiziksel temeli püskürtülen parçacıkların çarpma sonucunda kinetik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşmesi ile ilişkili olarak yüzey ve parçacıkların birbirleri ile etkileşimi sonucu meydana gelen termal deformasyon etkisiyle yüzeyde kaplama birikmesi esasına dayanmaktadır. Bu sayede yoğun ve yüksek yapışma gösteren bir kaplama tabakası elde edilebilmesi olanak sağlayan bir prosesdir. Arzulanan kaplama mikro yapısı ve fiziksel özelliklerinin elde edilebilmesi doğrudan kaplama malzemesi türüne ve toz boyutlarına bağlı olarak püskürtme esnasında yüzeye çarpan parçacıkların hız dağılımıyla ilişkilidir. Bunun yanında diğer önemli proses parametreleri gaz türü ve kompozisyonu, gaz ön ısıtma sıcaklığı, basınç, nozül geometrisi ve püskürtme mesafesidir. Proste kullanılan gazlar hava, azot, helyum ve karışım gazlardır. Püskürtme hızı (300-1200 m/sn) taşıyıcı gaza ve toz boyutuna bağlı olarak değişmektedir.

Laval nozül ile taşıyıcı gaz hava olması durumunda parçacık hızı ortalama 600 m/sn seviyelere çıkartılabilmekte, taşıyıcı gaz havadan daha hafif olması (He gibi) halinde sprej hızı artmaktadır. Bu proses gazları arasında en çok tercih edileni azot (N<sub>2</sub>) gazıdır. Bunun nedeni helyuma göre daha ucuz bir gaz olmasıdır. Kaplama prosesinde ön ısıtılmış gaz sıcaklığı 0-700 °C arasında ve basınç ise 0.6-3.5 MPa arasında değişmektedir. Proses sıcaklığı püskürtülecek kaplama malzemesinin ergime sıcaklığının altındadır. Nozül çıkışında sıcaklık düşmekte ve toz besleme ile daha da azalmaktadır. Proseste kullanılan toz boyutları yaklaşık 1-50 µm aralığında değişmektedir. Püskürtülecek tozların seçiminde en önemli unsur yüksek hızla çarpma esnasında deformasyon kabiliyetine sahip olmasıdır. Al, Cu, Ag, Au, Pt, Ni ve γ-Fe gibi yüzey merkezli kübik kristal kafas yapısına sahip metaller hacim merkezli kübik kristal (W, Ta, Mo, Nb, V, Cr, α-Fe, β-Ti) ve sıkı paket hegzagonal (Cd, Zn, Co, Mg, Ti) kafes yapısına sahip metallere göre daha fazla deformasyon kabiliyetine sahip olmalarından dolayı soğuk sprej proseslerinde öncelikli olarak Al, Fe, Cu, Ni esaslı kaplamalar üzerinde çalışmalar sürdürülmüştür. Soğuk sprej prosesleri ile demir esaslı, demir dışı metal ve alaşımlar (NiCr, Zn-Al, Ti-6-8Al-4V, 316, 316L, NiCrAlY) dışında metal/seramik (WC-Co, NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) ve kompozit (Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al-SiC, Al-TiN) esaslı kaplamalar üretilebilmektedir. Ayrıca polimerik (polyelefin gibi) esaslı kaplamalar da soğuk sprej ile uygulanabilmektedir.

### 1.3 SOĞUK PÜSKÜRTME SİSTEMİNİN TEMEL BİLEŞENLERİ




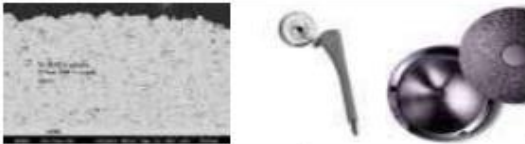
Şekil 1.2 Soğuk püskürtme sisteminin temel bileşenleri.

- Test Kabini
- Kontrol Paneli
- Kompresör
- Birinci Basınç Tankı
- Nem Alıcı
- Filtreler
- Çift Disk Hız Ölçüm Düzeneği
- İkinci Basınç Tankı
- Kesintisiz Güç Kaynağı
- Gaz Isıtıcısı



## 1.4 Kaplama Tozları ve Uygulama Alanları

**Tablo 2.** Malzemelerin prosesler ile uygulama alanları.

Kaplama Malzemesi	Uygulama Amaçları	AAltık Malzeme	Proses Parametre
*Alüminyum (Al) [32] Magnezyum (Mg) [45]	Korozyon koruma Parça tamir Kalıp tamir Boyutsal restorasyon Bağ kaplama Lehim kaplama EMI	Çelik, Alüminyum ve Magnezyum Alaşımları	Gaz Sıcaklığı: 300-500C Tabanca Basıncı: 5.8-8. bar Toz Besleme: 30-60% Sprey Mesafesi: 10-25 mm
			
*Bakır (Cu) [46]	Parça tamir Elektriksel ve termal iletkenlik gereksinimi	Bakır ve Alaşım Çeşitli tür altlık	Gaz Sıcaklığı: 450-500C Tabanca Basıncı: 6.9-8.2 bar Toz Besleme: 30-60% Sprey Mesafesi: 10-25 mm
*Paslanmaz Çelik [53]	Parça tamir Kalıp tamir	Çelik ve Alüminyum Alaşımları	
*Çinko (Zn) [54]	Kalıp tamir Korozyon koruma Elektriksel iletkenlik gereksinimi Baskı merdaneleri	Alüminyum Çinko Alaşımları Cam Çelik	Gaz Sıcaklığı: 375-475C Tabanca Basıncı: 5.8-7.6 bar Toz Besleme: 30-60% Sprey Mesafesi: 10-25 mm
*Kalay (Sn) [53]	Korozyon koruma İletkenlik gereksinimi	Bakır ve Alaşımları	Gaz Sıcaklığı: 175-250C Tabanca Basıncı: 5.8-7.6 bar Toz Besleme: 30-60% Sprey Mesafesi: 10-25 mm
Titanyum (Ti) ve Alaşımları [19, 43-44]	Biyoyum, korozyon direnci	Titanyum ve alaşımları	Gaz Sıcaklığı: 520 C Tabanca Basıncı 2.8 bar Sprey Mesafesi: 30 mm
			
Al-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Al-SiC [47-49]	Yüzey Direnci Aşınma direnci Sertlik	Alüminyum ve Magnezyum Alaşımları	Gaz Sıcaklığı: 100-200 C Tabanca Basıncı 6.2 bar Sprey Mesafesi: 10-15 mm
W-Cu [40]	İletkenlik	Alüminyum ve Bakır Alaşımları	Gaz Sıcaklığı: 270 C Basıncı: 37 MPa Sprey Mesafesi: 10 mm
HAP [42] Ca <sub>10</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> (OH) <sub>2</sub>	Biyoyumluluk	Ti alaşımları	Gaz Sıcaklığı: 400-700 C Sprey Mesafesi: 10-25 mm
 <p style="text-align: right;">*Supersonic Spray Tech. (SST) uygulamaları</p>			
NiCr [51] MCrAlY [52]	Sıcak korozyon direnci Oksidasyon direnci	Gaz türbin motor parçaları, türbin kanatları	

## 1.5 Soğuk Püskürtme Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları

### a) Soğuk Sprey Prosesinin Avantajları:

- Düşük porozite, iyi yapışma: %0,5'ten düşük oksit içeren, çok yoğun (düşük poroziteli) kaplamalar yüksek hızda püskürtme etkisiyle de yüzeye iyi yapışmış olarak elde edilebilmektedir.
- Homojen mikro yapı: düşük sıcaklıkta bir proses olması nedeniyle kimyasal bir değişim söz konusu olmadan diğer proseslere göre çok düşük gerilmeler içeren, bir mikro yapı oluşumuna olanak tanımaktadır. Çözünme, tane büyümesi, kristalizasyon, faz dönüşümü, artık gerilme, element kaybı söz konusu değildir.
- Düzgün yüzey: kumlama gereksinimi olmaksızın, soğuk sprej prosesi ile çok iyi yüzey düzgünlüğüne sahip kaplamalar üretmek mümkündür. Rahatlıkla boya veya astar uygulamaları yüzeye yapılabilir.
- Oksitsiz kaplama: Oksijen ilgisi yüksek reaktif elementler için hızlı püskürtme sayesinde oksit oluşumu elimine edilebilmektedir. Özellikle korozyon uygulamalarında önemli bir avantaj teşkil etmektedir.
- Proses emniyeti: uygulama açısından düşük ısı girdisi sayesinde pratik uygulama avantajı oldukça yüksek ve güvenilir bir prosesdir.
- Çevre dostu proses: proses esnasında etrafa zehirli bir gaz veya kimyasal bir reaksiyon ürünü çıkmaması nedeniyle çevre dostu bir prosesdir.

- Altlık/kaplama seçeneği yüksek: çok çeşitli kaplamalar birçok altlık (metal, cam, beton, seramik, taş) türü üzerinde biriktirilebilmektedir. Demir dışı alaşım kaplamaların demir ve çelik esaslı altlıklar üzerine kaplanması, çeşitli metalik kaplamaların demir dışı metaller, seramikler ve cam altlıklar üzerine kaplanması, iletken kaplamaların elastomerik altlıklar üzerine kaplanması, birbirinden farklı tozlardan oluşan karışım kombinasyonlarının çeşitli altlıklar üzerine kaplanması. Altlık üzerinde yüksek bir ısı girdisi olmaması önemli bir avantajdır.

- Proses kabiliyeti yüksek: yüzey hazırlığı, sistemi kaplamaya hazır hale getirmek çok kısa bir zaman almaktadır. Isı girdisi yüksek olmadığı için soğutma gereksinim bulunmamaktadır. Yüksek birikme verimi ile çalışmaktadır. Proseste inert gaz kullanarak ultra saflıkta kaplama üretmek mümkündür. Maskeleme gereksinim azdır.

- Teknolojik gelişim: birçok uygulama sahasına alternatif ekonomik ve başarılı bir çözüm getirme olasılığı yüksektir.

#### **b) Soğuk Sprey Prosesinin Dezavantajları:**

- Sert malzemelerin kaplanmasında mutlaka bir bağlayıcı gereksinim bulunmaktadır.

- Çok sünek malzemelerde yapışma özelliği zayıflamaktadır

- Gaz sarfiyatı fazladır. Her kullanılması maliyeti artırmaktadır.

- Standartlaşmış bilgi birikimi üzerinde çalışmalar sürmektedir.

## 1.6 Soğuk Püskürtme Prosesinin Termal Sprey Proseslerine Göre Farklılıkları ve Avantajları

Soğuk sprej prosesi termal sprej kaplama teknolojileri ailesinin bir parçası olarak tanımlanmasına karşın, klasik termal sprej teknolojilerinden (alev sprej (AS), elektrik ark sprej (EAS), atmosferik ve vakum plazma sprej (APS, VPS), yüksek hızda oksij yakıt sprej (HVOF) gibi) farklı olarak tozlar katı halde ergime olmaksızın çok yüksek hızlarda yüzeye püskürtülmektedir. Soğuk sprej prosesi esnasında püskürtülen parçacık sıcaklığı çok düşük buna karşın püskürtme hızı oldukça yüksektir. Proses türüne ve proseste kullanılan tabanca tipi ve kullanılan gaz kompozisyonlarına bağlı olarak farklılıklar gözlenmektedir. Uygulamalarda geleneksel termal sprej prosesleri ile püskürtülen metalik kaplama malzemeleri yüksek sıcaklık etkisi ile oksitlenerek kaplama yapısında belirli oranda oksit oluşumuna neden olmaktadır. Bu durum kaplamanın performansını ve ömrünü azaltmaktadır. Oksit, porozite ve süreksizlik oranını azaltmak amacıyla parçacıkların daha hızlı püskürtüldüğü HVOF prosesi ve ortamda oksitlenmeyi azaltmak amacıyla kontrollü atmosferde veya inert gaz ortamlarında gerçekleştirilen plazma sprej prosesleri ile olumlu sonuçlar alınmasına karşın proses ve ekipman maliyetleri oldukça yükselmektedir. Bu nedenle termal sprej proseslerinde karşılaşılan ergitme, buharlaşma, faz dönüşümü, oksidasyon, rekristalizasyon, artık gerilme, yapışmama gibi birçok etken soğuk sprej prosesi ile elimine edilmektedir. Bu sayede kalın ve yoğun kaplamaların üretimine olanak sağlanmaktadır. Klasik termal spray proseslerine göre düşük proses sıcaklıklarına sahip olması nedeniyle düşük ısı girdisi nedeniyle soğutma gereksinimi azdır. Bunun yanında kaplama öncesinde yüzey pürüzlendirme (kumlama vb.) gereksinimi bulunmamaktadır. Soğuk sprej prosesi ile üretilen metalik esaslı kaplamalarda yüksek birikme hızlarına ve yüksek yapışma mukavemetlerine ulaşılabilir. Elde edilen kaplamalarda oksit, porozite ve artık gerilmeler oldukça düşük seviyededir. Soğuk sprej prosesi de diğer termal sprej prosesleri gibi proses kontrolüne olanak sağlayan daha ekonomik ve pratik bir uygulama avantajı sergilemektedir.

## 1.7 Literatür Taraması

T. Stoltenhoff, H. Kreye, and H.J. Richter bu makalede [16], soğuk sprej prosesinin parametreleri ve mikroyapıya etkileri altında gaz sıcaklığının ve basıncın etkileri ile ilgili çalışmalar yapmışlardır.

İlker COŞAR tezinde [13], yakınsak – ıraksak lüenin çalışma koşullarına göre en uygun geometrisini incelemiştir.

Julio Villafuerte, kitabında [3], soğuk toz püskürtme yönteminde lüle geometrisinin etkisi hakkında incelemede bulunmuştur.

H. Singh makalesinde [5], değişen gazlara göre parçacık çapının ve hızının değişimleri ile ilgili çalışmalar yapmıştır.

Schmid T., Gartner F., Aassadi H, Kreye H. makalesinde [17], metalik tozların yüzey yapışabilmesi için kritik çarpma hızları hakkında incelemede bulunmuşlardır.

## 1.8 Kısıtlar ve Koşullar

Püskürtme işleminin verimli ve efektif olabilmesi için parçacık hızının belirli bir seviye üzerinde olması yani Mach sayısının 2'nin altına düşmemesi gerekmektedir. Bunun için lüle tasarımında boğaz çapı düşürülerek hedeflenen değerlere ulaşıldı.

Toz besleyiciden gelen tozların belirli bir sıcaklığa ulaştırabilmek için elektrikli rezistans kullanıldı. Ulaşmak istediğimiz değerlere uygun güçte ve ısı kayıpları en az olacak şekilde ideal ısıtıcı tasarlandı.

Maliyeti düşük, montajı kolay, verimli ve dayanıklı olması için tasarım yapılmıştır.

## 2. Haftalık Çalışma Programı

	Görevler
1. Hafta	Tasarım hakkında araştırma yapıldı ve bilgi toplandı.
2. Hafta	Literatür araştırması.
3. Hafta	Tasarımın üretilebilirlik açısından değerlendirilip, düzenlendi.
4. Hafta	Sistemin çalışma koşulları analizi yapıldı.
5. Hafta	Farklı nozzle geometrilerinin analizleri yapıldı.
6. Hafta	Çalışma koşullarına uygun olarak ısıtıcı tasarımı yapıldı.
7. Hafta	Isıtıcı için gerekli firma ile görüşmeler yapıldı.
8. Hafta	Isıtma odasının çalışma koşullarında analizi yapıldı, tasarımı düzenlendi.
9. Hafta	Sistemin kütle hesabı yapıldı, tasarım istenilen kütlelere getirilip çalışma koşullarında yeniden analizi yapıldı.
10. Hafta	Tasarımda iyileştirmeler yapıldı.
11. Hafta	Proje imalatı.
12. Hafta	Proje imalatı.
13. Hafta	Bitirme çalışması yazımı.

### 3.Yapılan Tasarım Çalışmaları ve Hesaplamalar

#### 3.1 Lüle Tasarımı

Lüle, akışın hızını onun basıncını düşürerek artıran mekanik bir sistemdir. Yayıcı, akışın basıncını onun hızını azaltarak artıran mekanik bir sistemdir. Bir lülenin kesit alanı ses altı hızlar için akış yönünde küçülür, ses üstü hızlar için akış yönünde büyür.

##### 3.1.1 Yakınsak – İraksak Lüleler

Lüle kelime anlamı itibariyle akış yönünde kesiti küçülen akış kanalları akla gelir. Oysaki yakınsak lüledeki bir akışkanın çıkarılabileceği en yüksek hız, lülenin çıkış düzleminde oluşan ses hızı ile sınırlıdır. Akışkanın sesüstü hızlara çıkarılabilmesi için boğazdaki sesaltı lüleye sadece ıraksak akış kısmı eklenerek gerçekleştirilebilir. Bu şekilde ortaya çıkan birleşik akış bölümlü bir yakınsak-ıraksak lüledir ve sesüstü uçak ve füzelerde yüksek itme gücünden yararlanabilen standart bir donanımdır.

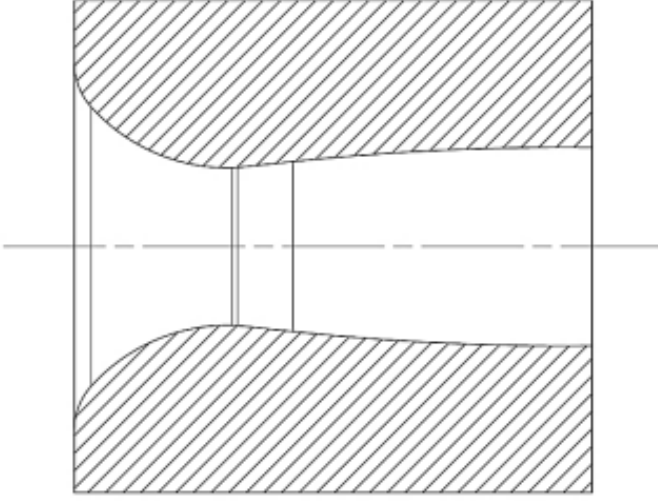
##### 3.1.2 Malzeme Seçimi

Lüle tasarımında, tasarım malzemesinin seçimi oldukça önemlidir. Bu nedenle lüle imalatında kullanılacak malzemelerin hangi mekanik özelliklere sahip olması gerektiği doğru olarak belirlenmelidir. Bu özelliklerden yüksek basınç ve sıcaklık dayanımı değerlerinin öncelikle ve titizlikle değerlendirilerek malzeme seçimine gidilmesi gerekmektedir. Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı, 4140 Islah Çeliği kullanmak en uygun malzeme seçimi olmuştur. Bu çeliğe bor karbür sertleştirme işlemi yapılacaktır.

##### 3.1.3 Süpersonik Lüle Profili Çiziminin Açıklaması

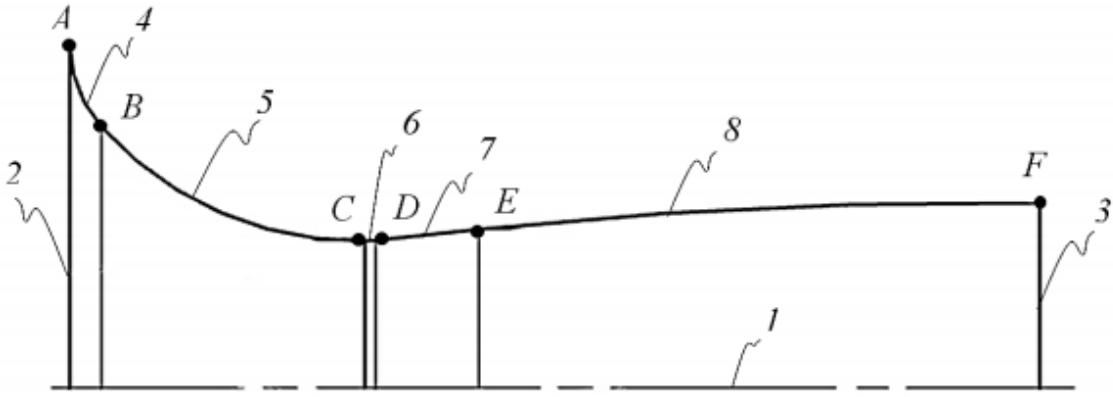
Lüle profili, gaz dinamik denklemleri ile belirlenen çok sayıda birbirine teğet olan yay ve çizgilerle tanımlanmış bir süpersonik akış elde edilen yakınsak-ıraksak lülenin imalatında kullanılabilen bir iç cidar profilini tanımlar. Tasarımı yapılacak olan lüle profilinin, daha önce tarif edilen analitik veya sayısal yöntemlerle hesaplanmasına göre daha kolaydır. Yapılan çalışma, yakınsak - ıraksak kısımdan oluşan bir eksenel simetrik lüle profilidir. Yakınsak bölüm, boğazdaki sapma bölümüne bağlanır. Yakınsak bölüm ve ıraksak bölüm, daire yayları ve bir çizgi parçası tarafından tanımlanan sürekli bir profil ile tanımlanır. **Şekil 3.1.**'de lülenin kesit görünüşü verilmiştir. **Şekil 3.2.**'de ise iç kestin profili verilmiştir. Lülenin iç kesitinde (4) ve (5) nolu çember yayları yakınsak kısmını (6), (7) ve (8) nolu daire yayları ve doğru parçaları ise ıraksak kısmını belirtmektedir.





Şekil 3.1 Yakınsak-İraksak lüle iç kesiti.

Şekil 3.2.'deki (1) ekseni yatay eksenin referans eksenidir. Bu çember yayları ve doğru parçaları ve dairesel kesitli lüle oluşumu (1) ekseni etrafında  $360^\circ$  döndürülerek oluşturulur. Bu şekilde yakınsak-ıraksak lüle aksel simetrik olarak düşünülebilir. Giriş ucu (2), sıkıştırılmış hava ile beslenir ve çıkış kısmından (3), Mach sayısının üstünde hızlandırılmış bir hava elde edilir.

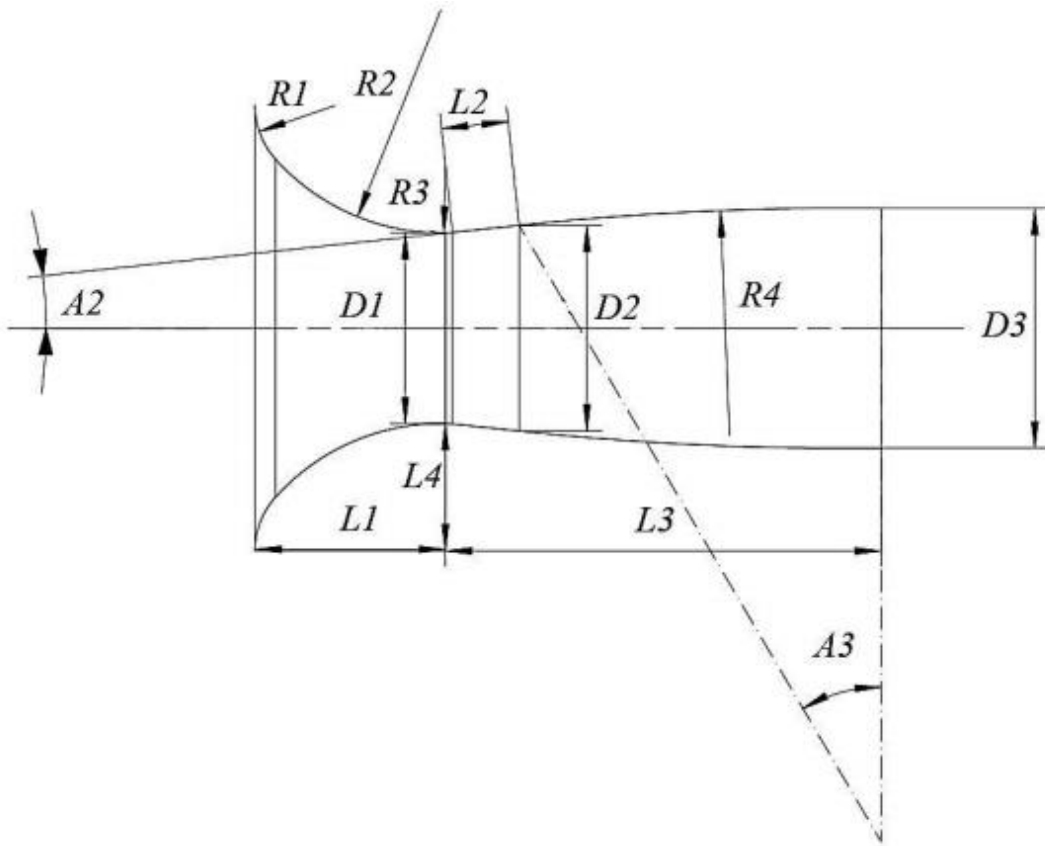


Şekil 3.2. Lülenin iç profilini oluşturan çember yayları ve çizgi parçaları.

Yakınsayan ilk bölümün ilk çizgisinden (4) itibaren, ani değişimler olmaksızın, kademeli olarak yakınsayan, düzgün bir şekilde ıraksayan ve (1) eksenine paralel olması koşuluyla, birtakım olasılıklardan herhangi biri olabilir. Olasılıklar arasında, boğaza uzanan dairesel bir yaya, teğet bir çizgi parçası veya bir parabol gibi sürekli yüksek mertebeden bir eğri ve buna benzer çizgi parçası bulunmaktadır.

Boğaz yayı (6), havanın arzu edilen çıkış Mach sayısına ( $M_3$ ) ulaşmasını sağlayan ilk genişleme bölümüne (7) 33 bağlanır. (7) nolu çizgi (6) nolu çember yayına teğettir. Iraksak kısmın ikinci bölümü (8), akışın, lülenin eksenine (1), çıkış (3) kesitine dik ve (7) nolu çizgiye paralel olacak şekilde havanın akışının düzeltilmesi işlevini görür. Iraksak kısım ikinci bölümü (8) için kontur tek bir çember yayından oluşur. Bu yay, lüle çıkışında son bulur ve püskürtülen hava uygun Mach sayısına getirilerek, püskürtme borusundan düzgün ve esas olarak paralel bir şekilde akış hızlandırılır.[13]

### 3.1.4 Lüle Hesaplanmasında Kullanılan Eşitlikler



Şekil 3.3. Lüle iç profil konturunun parametrelerle ölçülendirilmesi.[13]

Hesaplamalara göre basit bir konturu, süpersonik lülenin çapını, uzunluklarını, yarıçaplarını ve açılarını Şekil 3.3. daha ayrıntılı olarak tanımlar. Belirli bir basınç oranı değeri için izentropik gaz ilişkileri kullanılarak, lülenin girişindeki basıncın çıkış şartlarındaki basıncına oranı ( $P_0/P_3$ ) hesaplanır. Böylece  $M_3$  çıkış Mach sayısını eşitlik (3.1) ile doğrudan hesaplamak mümkündür.

$$M_3 = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[ \left( \frac{P_0}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} \quad (3.1)$$

Boğaz ve çıkış çapları sırasıyla  $D_1$  ve  $D_3$ , standart koşullarda tanımlanan gazın hacimsel debisi  $V$  alınarak, çalışma yapılacak olan kompresör için, katalog listesinden debi değeri alınabilir. Bu büyüklükleri belirlemek için aşağıdaki eşitliklerden faydalanılabilir.

$$D_1 = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{-(k+1)}{4(k-1)}} \cdot \sqrt{\frac{4\rho\dot{V}}{\pi P_0}} \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T_0}{k}} \quad (3.2)$$

$$D_3 = \frac{D_1}{\sqrt{M_3}} \left[ \frac{1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_3^2}{\frac{k+1}{2}} \right]^{\frac{k+1}{4 \cdot (k-1)}} \quad (3.3)$$

**Şekil 3.3.’de** gösterilen birinci yakınsak bölüm sırasıyla  $R_1$  ve  $R_2$  yarıçaplı olan yayları, **Şekil 3.2.’de** (4) ve (5) nolu çember yaylarını içerir. Bu iki yay, bir noktada (B) birleştiklerinde, birbirlerine tanjantlırlar; Böylece yay parçacıklarının (4 ve 5) birleştirdikleri yerde; kesintisiz, sürekli olarak birleşen kesit oluştururlar. Bu durumda lülenin giriş ucu (A), (2) nolu lüle girişi kesit doğrusuna teğettir. Yakınsak kısmı oluşturan (4) ve (5) yaylarını oluşturan değerler, kombine yaylar kabul edilebilir ve matematik olarak  $R_1$  ve  $R_2$ ,

$$R_1 = \frac{D_3}{3} \quad (3.4)$$

$$R_2 = \frac{7D_1}{6} \quad (3.5)$$

eşitlikleri ile verilir. Ses üstü akış lülesinin girişin ana eksene mesafesi  $L_1$ ,  $D_1$ ’e eşittir ve yan eksenin uzunluğu  $L_4$ ’te  $2/3 D_1$  ‘e eşittir. **Şekil 3.2. ‘de** gösterildiği gibi, iraksak bölümün birinci kısmı (6), tamda yakınsak bölüm ile iraksak bölümü için geçiş bölümüdür ve boğaz şartlarının olduğu bölümdür. 35 Boğaz şartlarının olduğu kısımdan sonra, iraksak kısmın ilk yayı olan (6) nolu yay  $R_3$  yarıçaplıdır ve [C] noktasından itibaren  $A_1$  derecelik bir açı yapmaktadır. Boğaz kısmından sonraki ikinci bölüm olan (7) nolu doğru parçası, lüle eksenine  $A_2$  derecelik açıya sahiptir. Doğru parçasının (7) uzunluğu  $L_2$ ’dir ve (6) yayı ile birbirlerine teğettir. Bu geometrik ilişkiden dolayı,  $A_1$  açısı ile  $A_2$  açısı değerleri birbirine eşit olmaktadır.

Bu nedenle, imalat için en az miktarda materyal gerektiren en kısa lüle için,  $\Phi(M)$  'nin Prandtl-Meyer ilişkisi ile tanımlandığı yerde,  $A_2$ 'in  $1/4 \Phi(M_3)$  eşit olmasını seçerek eşitlik (3.6)'dan bulunur.

$$\varphi(M) = \left[ \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \cdot \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \cdot (M^2) \right] - \tan^{-1} \cdot \sqrt{M^2 - 1} \right] \quad (3.6)$$

[E] kesitindeki Mach sayısı  $M_2$  'nin değeri, basit iterasyon yapılarak bulunur. Prandtl-Meyer fonksiyonunun eşitlik (3.7)'deki  $M_2$  değeri için bilinen  $A_2$  değerine ulaşıncaya kadar basit bir iterasyon işlemi yapılır.

$$\Phi = (M_2) 2A_2 \quad (3.7)$$

Şekil 3.2.'deki [E] noktasındaki  $D_2$  kesit çapı, izentropik alan oranı ilişkisinin karekökü  $\tau(M)$  denkleminde eşitlik (3.9)'dan bulunur.

$$\sqrt{\frac{\pi D_2^2}{4}} = \tau(M) = \sqrt{\frac{1}{M} \left[ \left( \frac{2}{k+1} \right) + \left( \frac{k-1}{k+1} (M^2) \right) \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}}} \quad (3.8)$$

$$D_2 = D_1 \cdot \tau(M_2) \quad (3.9)$$

Şekil 3.2 'de gösterilen (6) nolu  $R_3$  yarıçaplı yay Foelsch [3] tarafından bulunan eşitlik (3.10)'dan bulunur.

$$R_3 = \frac{D_3 \left[ \tau(M_2) \cdot \cos\left(\frac{A_2}{2}\right) - 1 \right]}{4 \cdot \tau(M_3) \cdot \sin\left(\frac{A_2}{2}\right) \cdot \left[ \sin\left(\frac{A_2}{2}\right) + \cos\left(\frac{A_2}{2}\right) \right]} \quad (3.10)$$

Iraksak bölümün düzleştirici (8) yayı, yarıçapı  $R_4$  olan bir yay olarak tasarlanmıştır ve [E] noktasından [F] noktasına  $A_3$  derecelik bir açıya sahiptir.  $R_4$  yarıçapı tasarımı lüle üretimini büyük ölçüde kolaylaştırmak için ve ayrıca akışı daha düzenli olması için seçilmiştir. (8) yayı, çizgi parçası (7) ile teğettir. (8) yayının bitiş noktası [F] lüle eksenine paraleldir dolayısıyla (3) çizgisine diktir. Richard D. Nathenson çalışmasında, tercih edilen düzenlemede, ikinci sapma bölümünün (8) akış düzeltici yarıçapı  $R_4$  eşitlik (3.11)'de verilir.

$$R_4 = \frac{D_3 \left[ 1 - \frac{\tau(M_2)}{\tau(M_3)} \cdot \cos(A_2) \right]}{4 \cdot \sin(A_2) \cdot \sin\left(\frac{A_2}{2}\right)} + D_3 \left( \frac{\sqrt{M_3^2 - 1}}{2 \cdot \sin(A_2)} \right) \quad (3.11)$$

Foelsch [3] tarafından hesaplanmış lülenin süpersonik bölümünün uzunluğu eşitlik (3.12) kullanılarak  $L_3$  iraksak kısım uzunluğu bulunur.

$$L_3 = \frac{D_3}{4 \cdot \sin\left(\frac{A_2}{2}\right)} + \frac{D_3}{2} \cdot \sqrt{M_3^2 - 1} - \frac{D_1}{2 \cdot \tan(A_2)} + R_3 \tan\left(\frac{A_2}{2}\right) \quad (3.12)$$

Tercih edilen düzenlemede,  $A_1$  ve  $A_3$ ,  $A_2$  ile aynı olacak şekilde seçilir  $L_2$ ,  $R_3$ 'e eşit olarak ayarlanır.

### 3.1.5 Yakınsak İraksak Lüle ve Başlangıç Şartları

Çalışmanın bu kısımda; havanın özgül ısı oranı olan  $k = 1.4$  değerine göre ve aşağıdaki belirtilmiş başlangıç şartlarına göre akışın daimi ve izentropik olduğu kabul edilerek hesaplamalar yapılacaktır. Bölüm 3.3 'de verilen eşitlikler kullanılarak nozul geometrisinin tasarımı yapılacaktır.

Çalışmanın başlangıç şartları aşağıda belirtilmiştir:

$k = 1.4$	(izantropik gaz üssü)
$P_0 = 40 \text{ bar} = 4 \text{ MPa}$	(giriş basıncı)
$P_3 = 101325 \text{ Pa}$	(karşı basınç)
$T_0 = 1073 \text{ K}$	(standart koşullardaki sıcaklık)
$V = 0.04167 \text{ m}^3 / \text{s}$	(kompresörden elde edilen hacimsel debi)
$R = 0.287 \text{ kJ/kgK} = 287 \text{ J/kgK}$	(mükemmel gaz sabiti)
$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$	(hava yoğunluğu)

Yakınsak Iraksak lüle tasarımı için, bölüm 3.3 'de kontur çizimleri ve açıklamaları ile gerekli eşitlikler verilmiştir. Bu doğrultuda **Şekil 3.3** 'de yapılan ölçülendirmedeki her yay ve doğru parçaları parametreleri yukarıda verilen kabuller ve sınır şartları doğrultusunda tasarım, sayısal olarak gerçekleştirilecektir. Yapılacak bu hesaplamalar sonucu elde edilen veriler gerçek şartlarda tasarlanabilir.

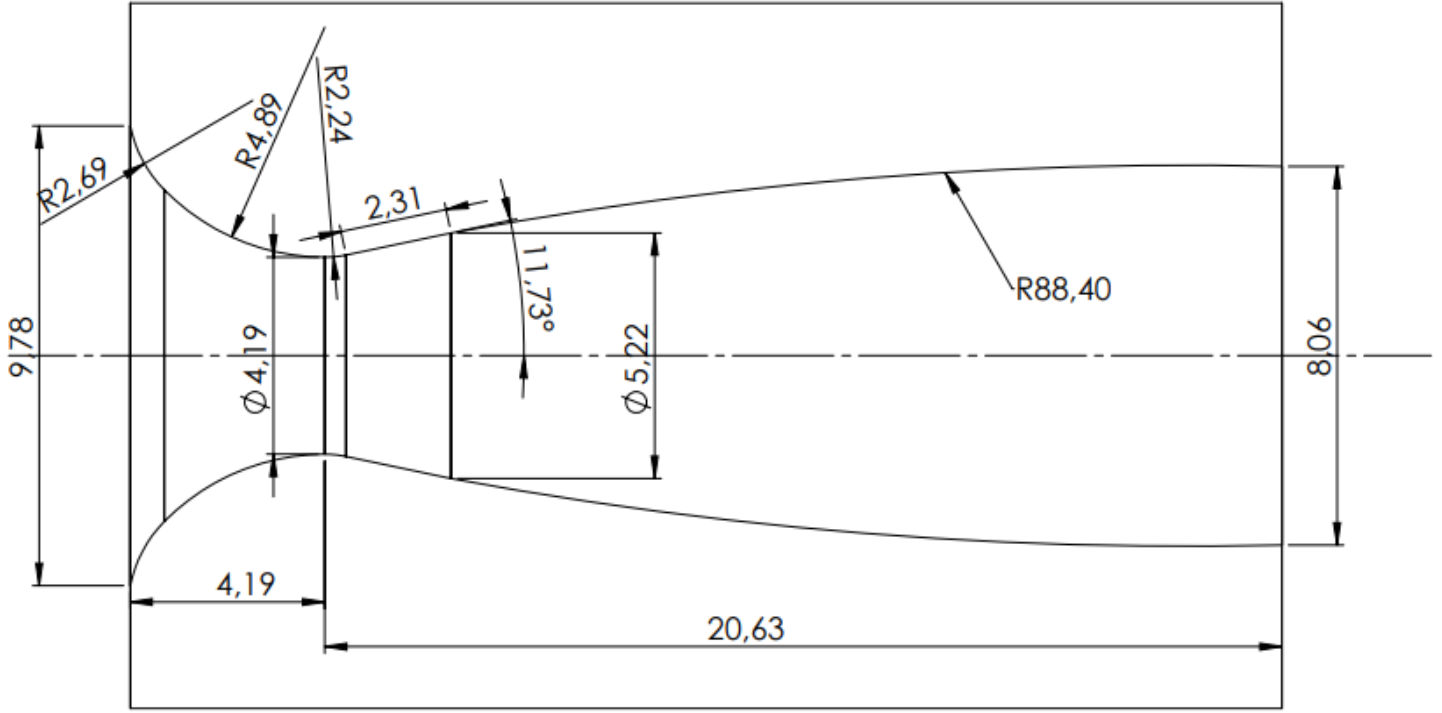
### 3.1.6 Yakınsak-Iraksak Lüle Eğrisinin Hesaplamaları

Yukarıdaki belirtilen bağıntıları kullanarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

**Tablo 2.** Lülenin belirtilen şartlara göre tasarım parametreleri

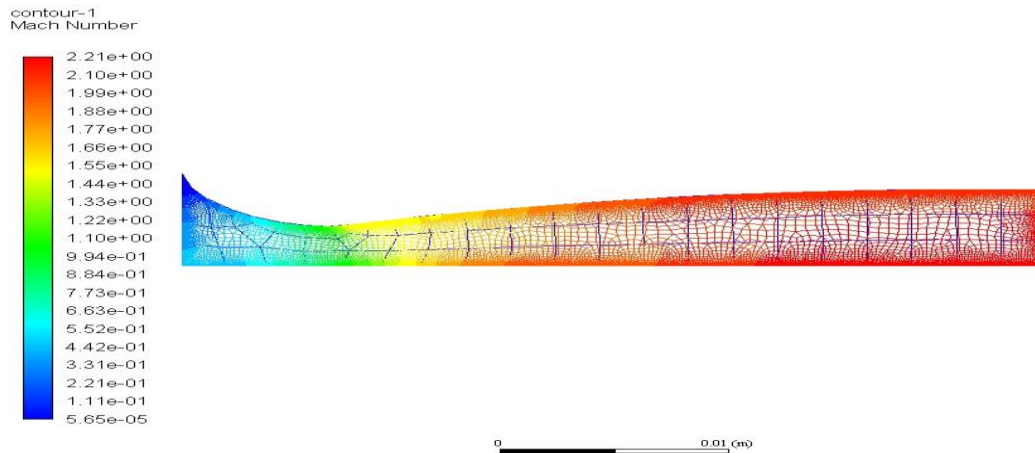
Lüle Tasarım Parametreleri	
Giriş Basıncı, $P_0$	4 MPa
Giriş sıcaklığı, $T_0$	1073 K
Çıkış basıncı, $P_3$	101325.00 Pa
Akış Debisi, $V$	0.04167 m <sup>3</sup> /s
Yoğunluk, $\rho$	1.225 kg/m <sup>3</sup>
Gaz sabiti, $R$	287.00 J/kgK
Adyabatik üs, $k$	1.40
Boğaz çapı, $D_1$	4.19 mm
İç Çapı, $D_2$	5.2237 mm
Çıkış Çapı, $D_3$	8.0552 mm
İç Mach Sayısı, $M_2$	1.9
Çıkış Mach Sayısı, $M_3$	2.8572
İlk yakınsak bölüm Radyusu, $R_1$	2.685 mm
İkinci yakınsak bölüm Radyusu, $R_2$	4.89 mm
Boğaz Radyusu, $R_3$	2.2443 mm
Iraksak Düzleştirici Radyus, $R_4$	88.3972 mm
Iraksak Tepe Açısı, $A_2$	11.7312 °
Yakınsak kısım uzunluğu, $L_1$	4.19 mm
Iraksak kısım uzunluğu, $L_3$	20.6271 mm

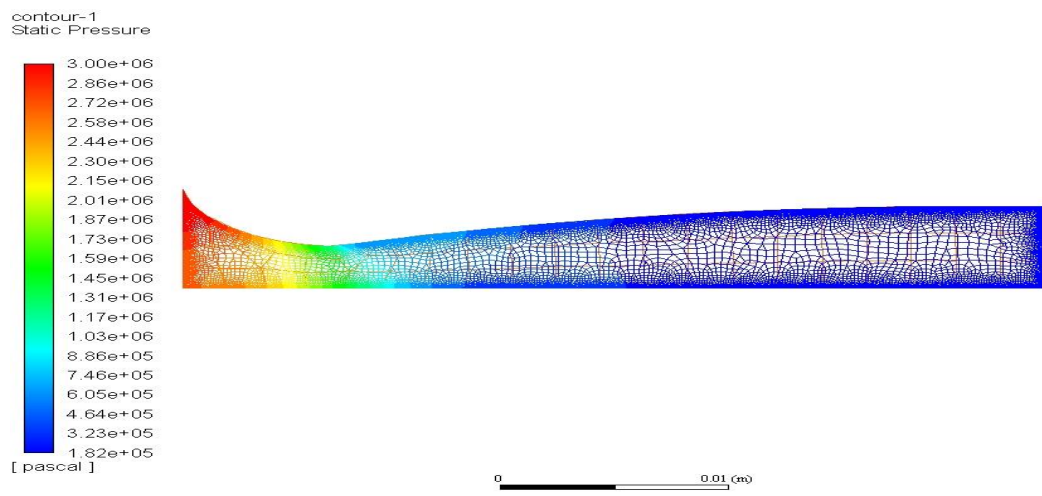
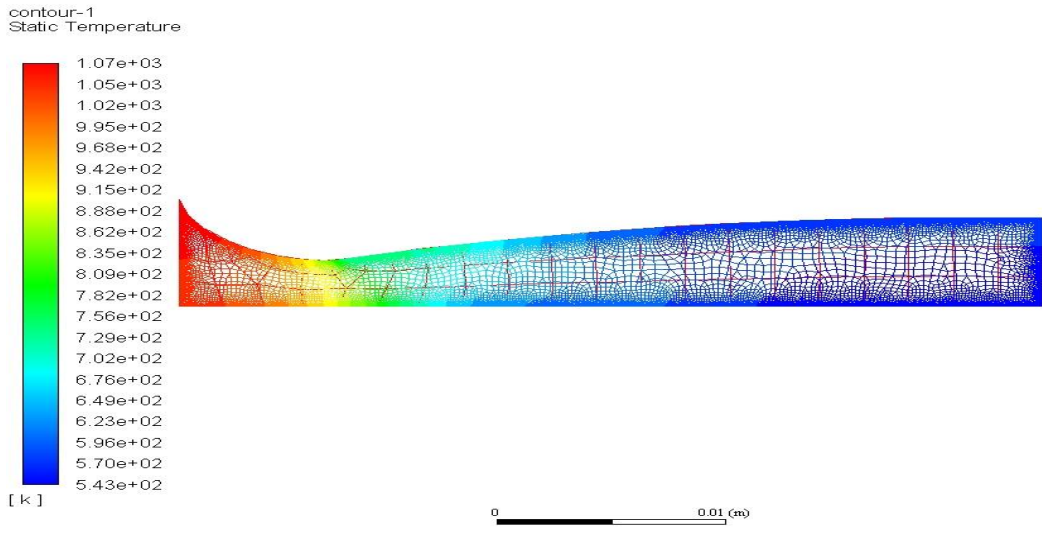
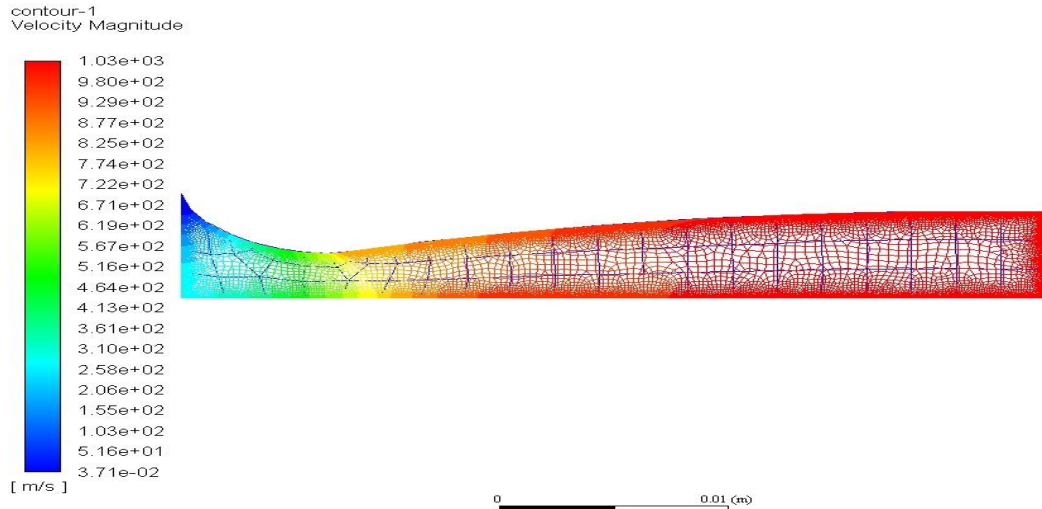
Elde edilen bu hesaplamalar doğrultusunda lüle profilinin ölçülendirilmesi **Şekil 3.4** de verilmiştir. Bu çalışmada, yakınsak - ıraksak lülenin üç boyutlu çizimi Solidworks programı kullanılarak, tek kesit için yapılmıştır.



**Şekil 3.4.** Belirtilen sınır şartlarına göre hesaplanmış lüle profili ölçüleri

Ampirik bağıntılarla hesaplanan nozzle tasarımının, Ansys programında analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları şu şekildedir:





Şekil 3.5 Ampirik bağıntılarla hesaplanan nozzle tasarımının Ansys programında analizi.



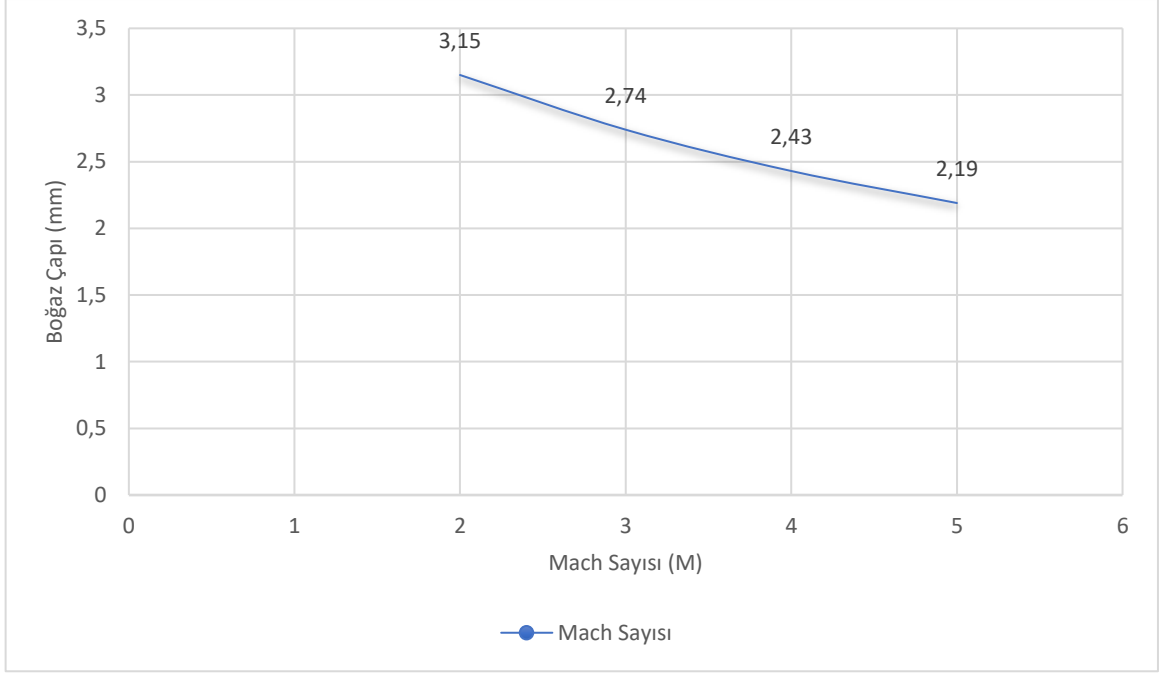
### 3.1.7 Değişen Lüle Geometrisinin Etkileri

Ampirik bağıntılara göre hesaplanan lüleden sonra lüle geometrileri değiştirilerek ANSYS'de yeniden analizler yapılmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar aşağıdaki tabloda verilmiştir.

**Tablo 3.** Geometri ile Mach sayısı değişim tablosu

Lüle No	Giriş Çapı, $D_g$ (mm)	Çıkış Çapı, $D_ç$ (mm)	Boğaz Çapı, $D_b$ (mm)	Lüle Uzunluğu, $l_1$ (mm)	Boğaz Mesafesi, $l_2$ (mm)	Mach Sayısı (M)
1	9.78	8.06	4.19	24.82	4.19	2.14
2	10	10	2	50	25	3.15
3	10	10	3	50	25	2.74
4	10	10	4	50	25	2.43
5	10	10	5	50	25	2.19
6	10	10	2	50	12.5	3.16
7	10	6	2	50	25	2.63
8	10	6	4	50	25	1.85
9	10	6	2	75	25	2.62
10	10	6	4	75	25	1.66
11	10	5	2	115	20	2.40
12	6.40	6.40	3.18	40	6	2,24

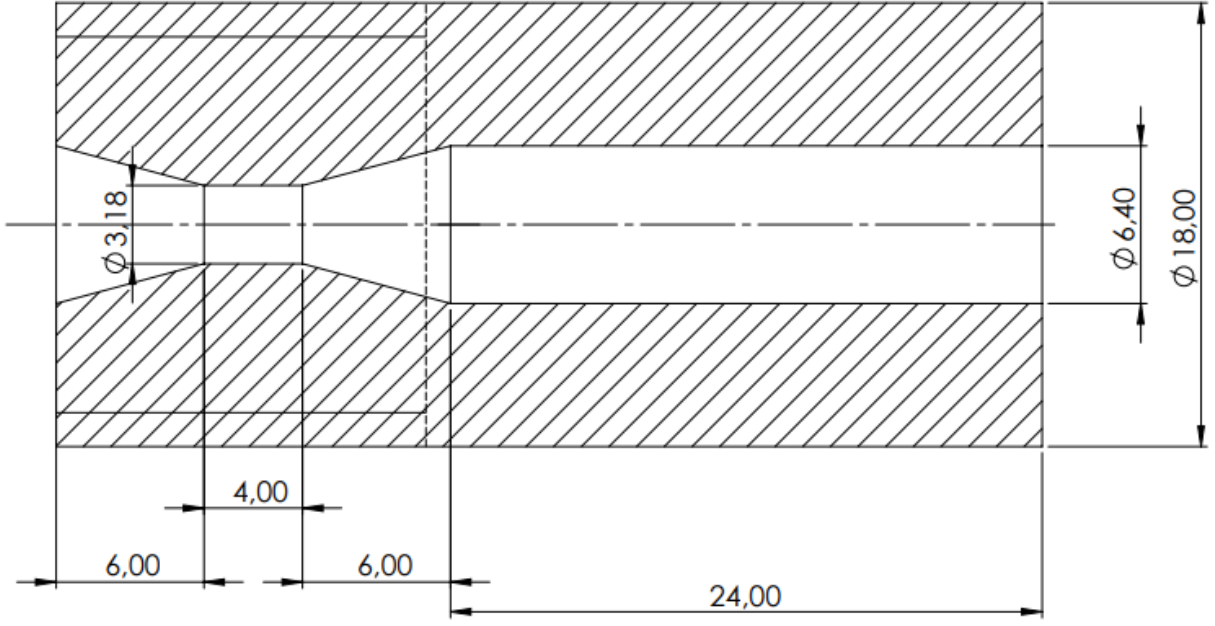
Yapılan hesaplamalar sonucunda oluşturduğumuz Geometri ile Mach sayısı değişim tablosuna göre, diğer tüm parametrelerin aynı olduğu durumda sadece boğaz çaplarının değiştirilmesiyle aşağıdaki grafik oluşturulmuştur.



**Şekil 3.6** Boğaz Çapı – Mach Sayısı değişimi

Oluşturulan grafik sonucunda Boğaz Çapı – Mach Sayısı değişimi;  
Boğaz çapındaki genişleme Mach sayısının azalmasına sebep olur.

Yapılan tüm bu hesaplamalar ve analizler sonucunda gerek imal edilebilirlik gerekse proje amaçlarımıza uygunluk açısından en ideal lüle tasarımı tablodaki 12 numaralı lüle olarak belirlenmiştir. Teknik resim ve analiz sonuçları aşağıda belirtilmiştir.

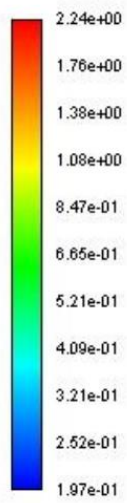


Şekil 3.7 Seçilen lüenin teknik resim görüntüsü.

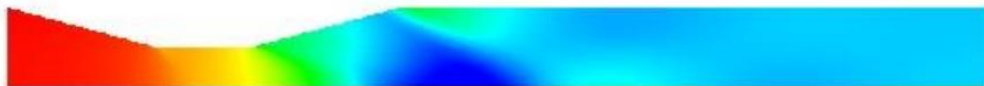


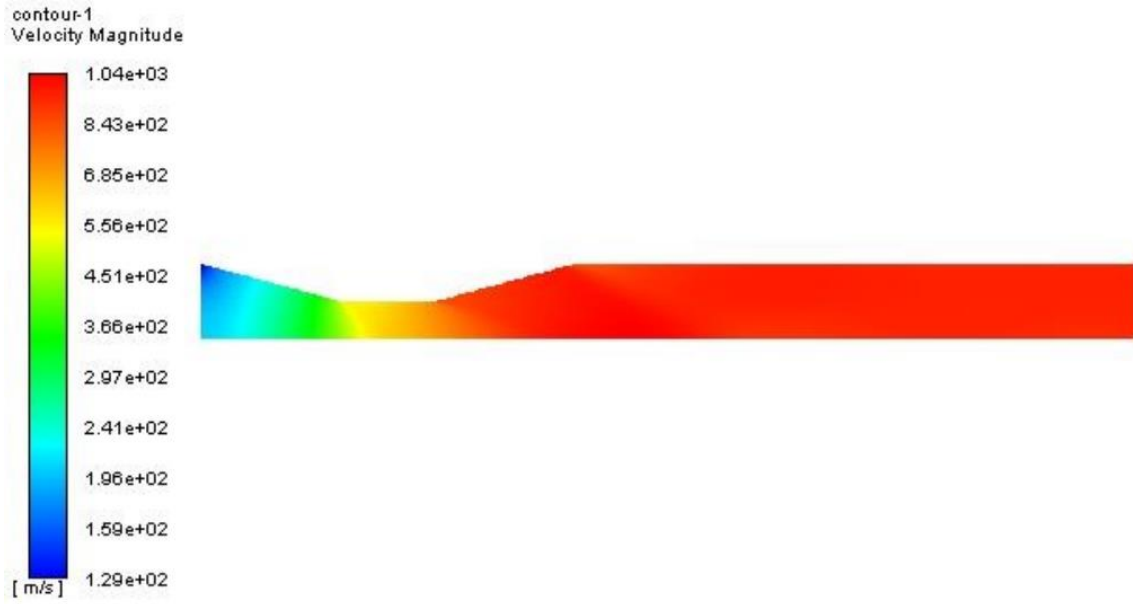
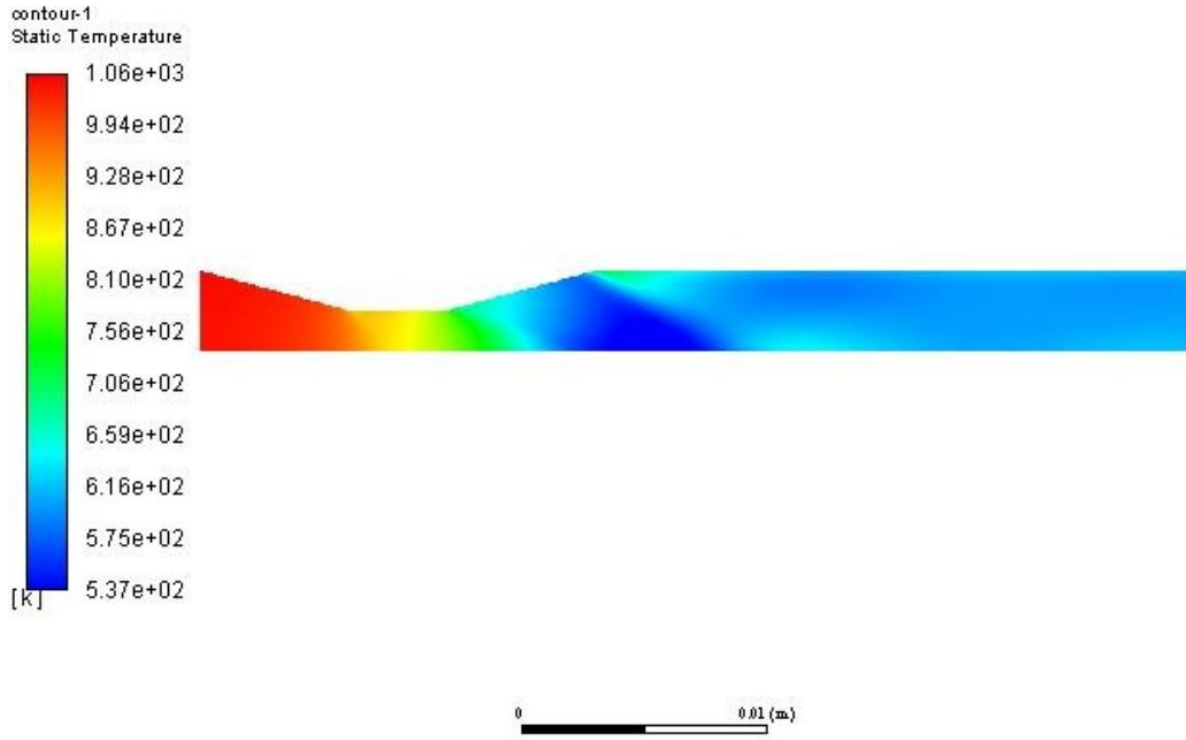
Şekil 3.8 Lüenin imalat fotoğrafı.

contour-1  
Mach Number



contour-1  
Static Pressure

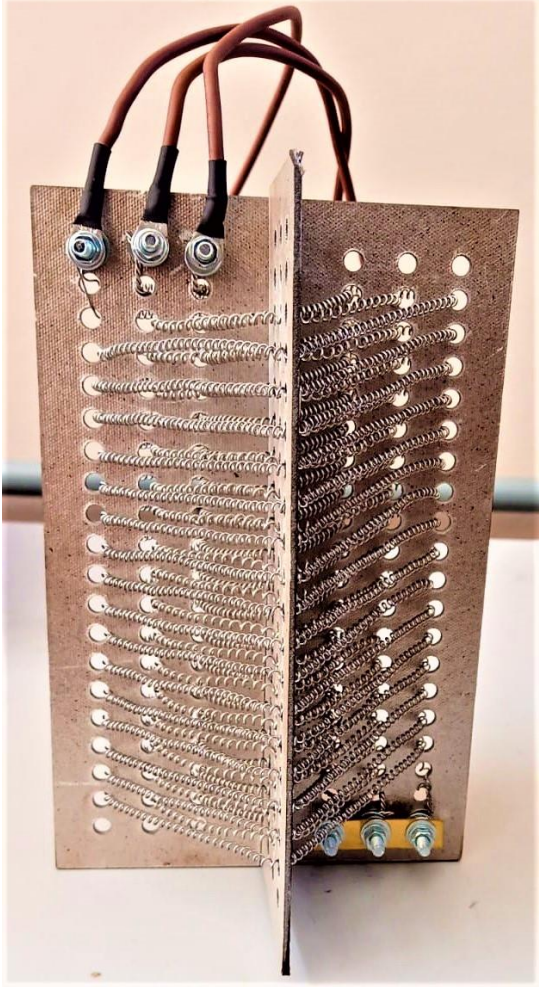




Şekil 3.9 Lüle tasarım analizleri

### 3.2 Isıtıcı Tasarımı

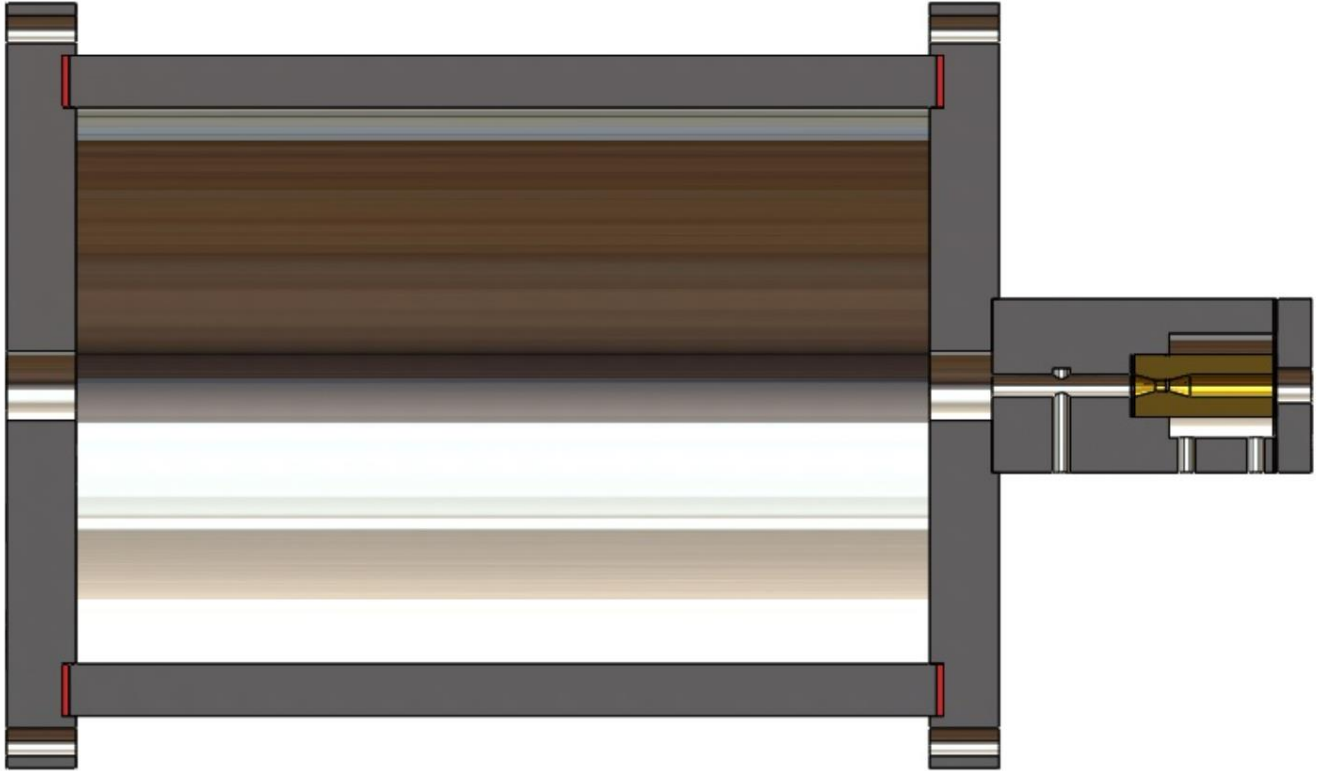
Kompresörden 40 bar basınçta ve 0.003 m<sup>3</sup>/s debisinde gelen havayı 600-900 °C sıcaklıklara ulaştırmak için bir rezistanslı ısıtıcı tasarlanmıştır. Isıtıcı  $\Phi$  160x240 mm boyutlarında, 380 V gerilim ve 10 kW gücündedir. Rezistanslı ısıtıcı bir ısıtma odasının içine montajlanmıştır. Çalışma koşullarını sağlayabilmesi için ısıtma odasının cidar kalınlığı 15 mm alınmıştır.



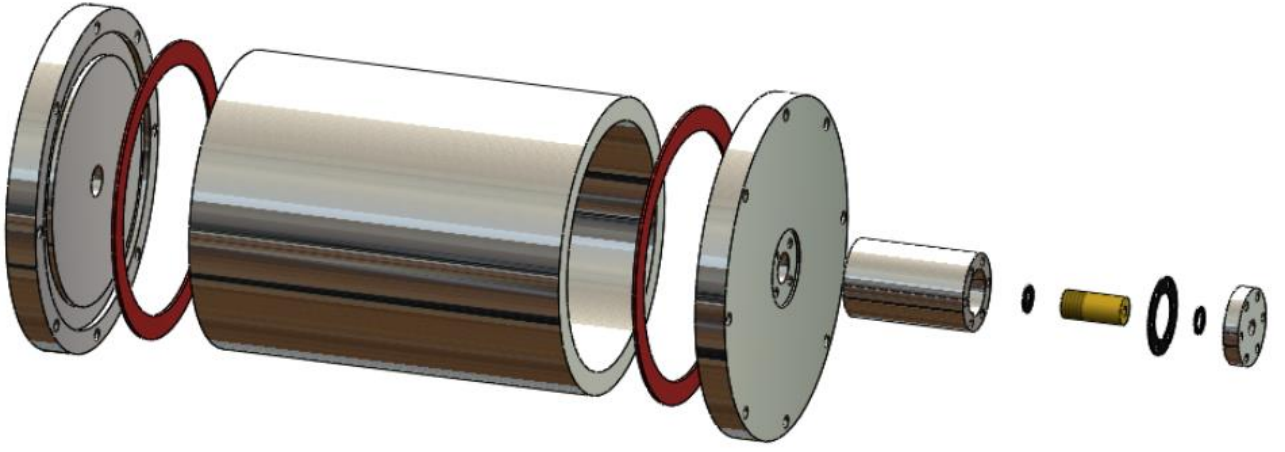
Şekil 3.10 Kullanılan ısıtıcı görüntüsü.

### 3.3 Isıtma Odası Tasarımı

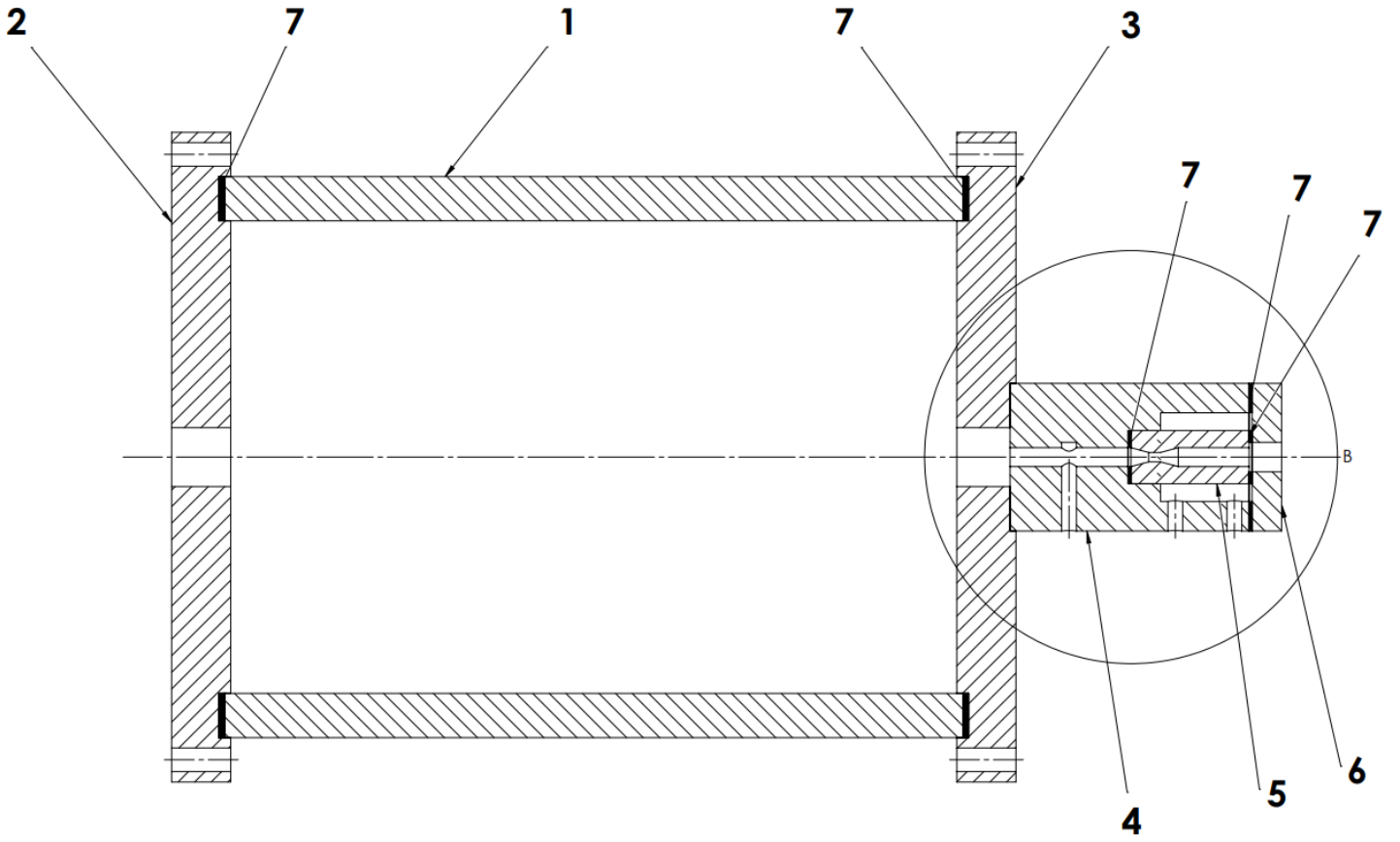
Isıtma odasının maliyeti düşük, montajı kolay, verimli ve dayanıklı olması için tasarım yapılmıştır. Tasarlanan odanın teknik resim görüntüsü aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.11 Isıtma odası kesit görünümü.

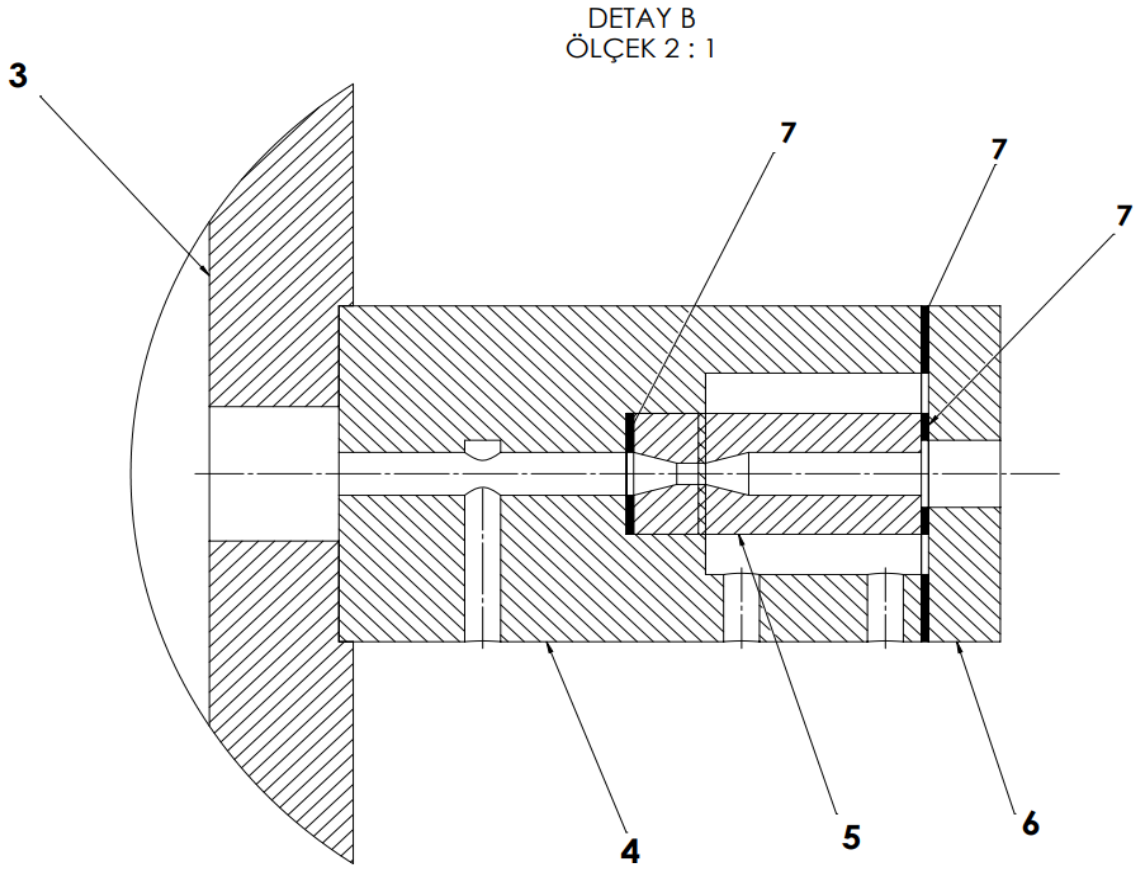


Şekil 3.12 Isıtma odası montajı izometrik görünümü.



Şekil 3.13 Isıtma odası teknik resim görüntüsü





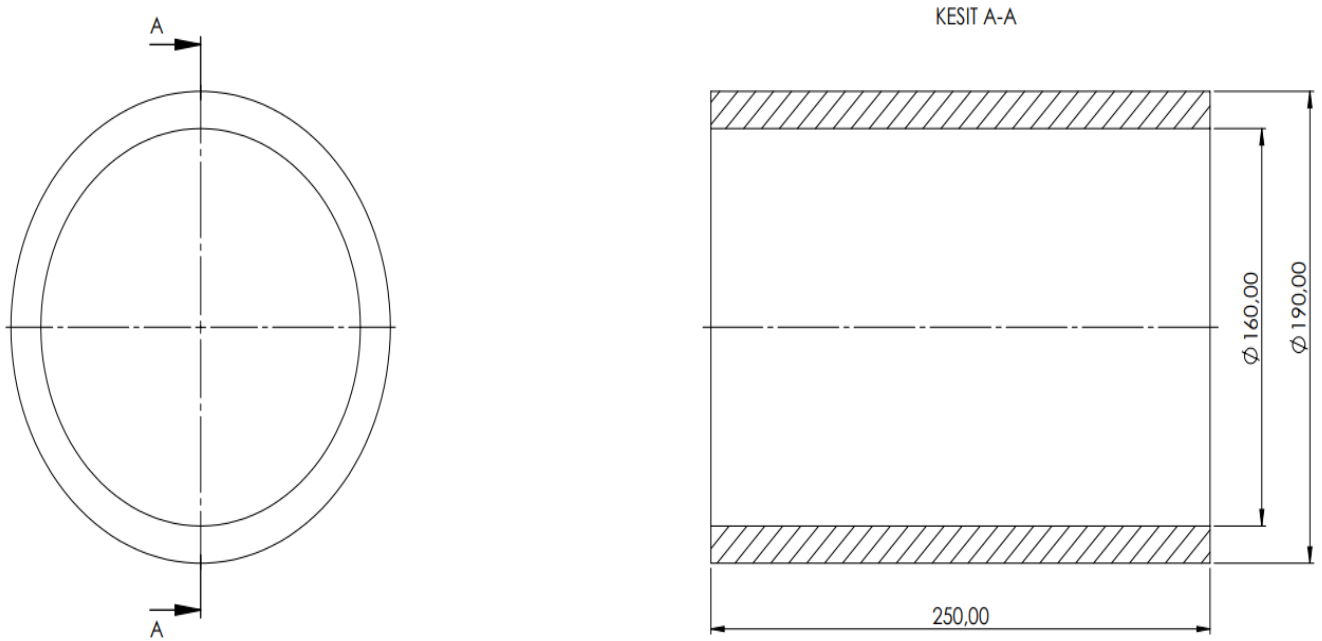
**Şekil 3.14** Isıtma odası teknik resim detay görünümü.

**Tablo 4.** Isıtma odası teknik resim bileşen tablosu.

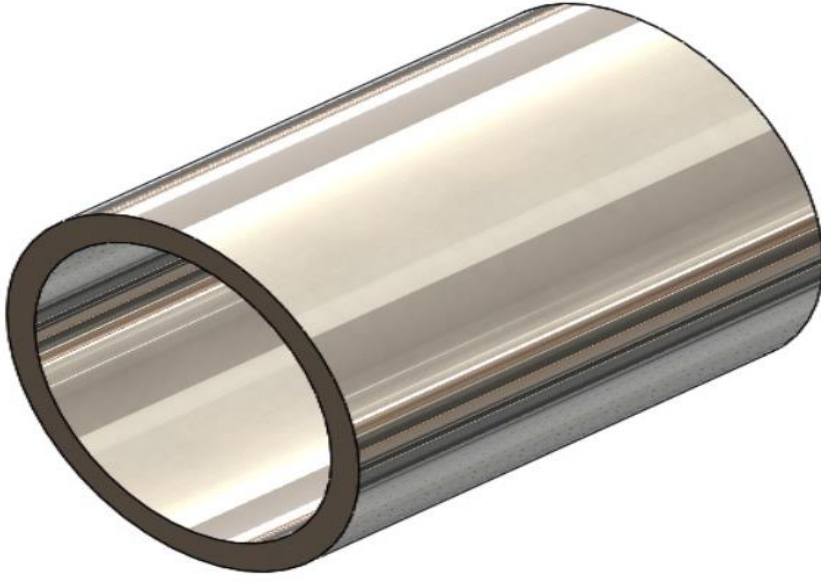
7	Termal Conta	1		HAZIR
6	Besleme Kapağı	1	Çelik	İMALAT
5	Lüle	1	4140 Islah Çeliği	İMALAT
4	Besleme	1	Çelik	İMALAT
3	Arka Kapak	1	Çelik	İMALAT
2	Ön Kapak	1	Çelik	İMALAT
1	Isıtma Tüpü	1	Çelik	İMALAT
<b>Sıra No.</b>	<b>Parça Adı</b>	<b>Adet</b>	<b>Malzeme</b>	<b>Açıklama</b>

### 3.3.1 Isıtma Tüpü

Isıtma tüpü, kompresörden gelen havanın ve ısıtıcı rezistansın içinde bulunduğu parçadır. Burada 40 bar basınçta gelen hava ısıtıcı rezistans sayesinde 600-900 °C sıcaklıklara ulaşması amaçlanmıştır. Çalışma koşullarının sağlanabilmesi için ısıtma odasının cidar kalınlığı 15 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Teknik resmi aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.15 Isıtma tüpünün teknik resmi.



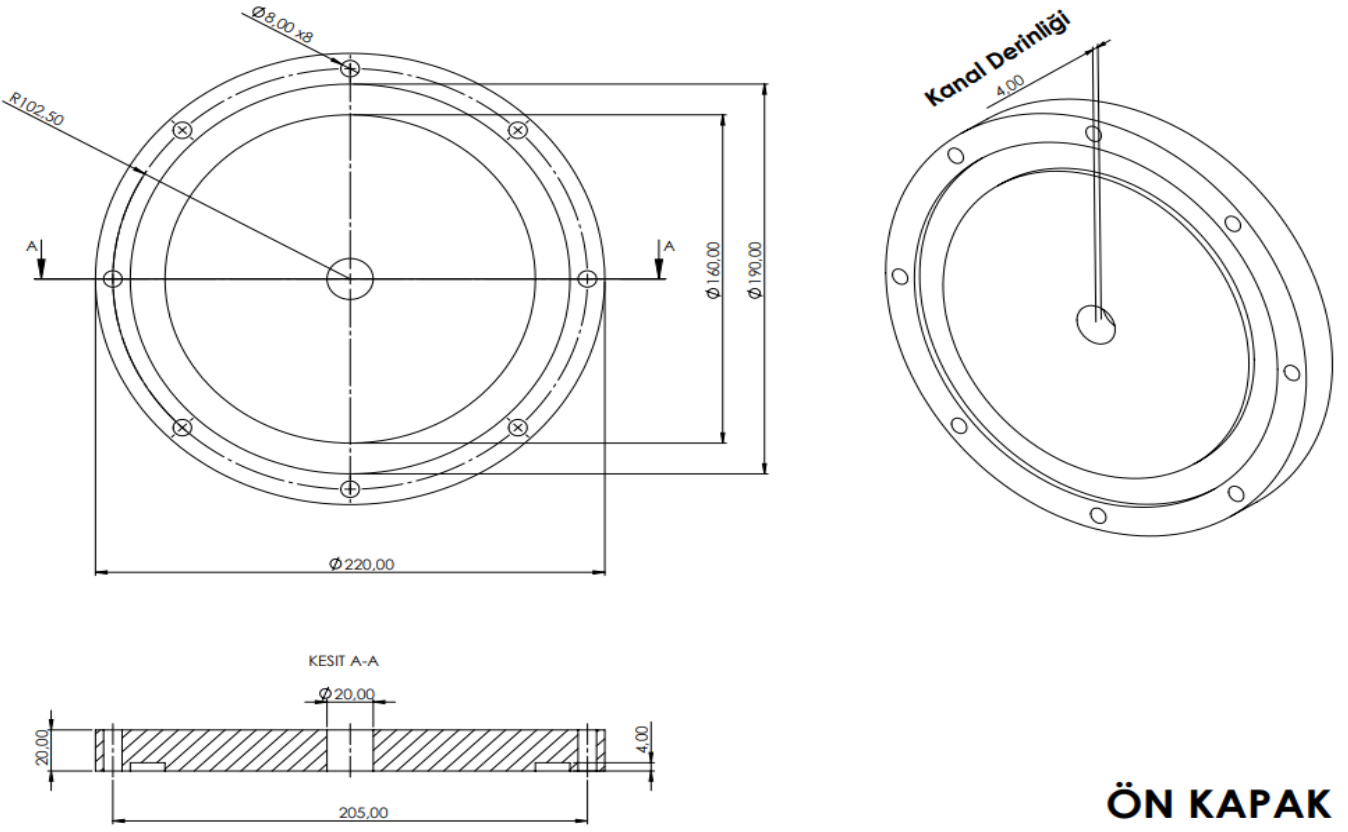
**Şekil 3.16** Isıtma tüpünün izometrik görünüşü.

### 3.3.2 n Kapak

n kapak  $\Phi$  220 mm çapındadır. Çalışma koşullarında kalınlığı 20 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Merkezinde 20 mm'lik hava girişini sağlayacak delik açılmıştır. Isıtma tüpünün merkezlenebilmesi ve şekil bağlı olarak bağlanabilmesi için 4 mm kanal genişliği açılmıştır. Isıtma tüpünü sabitlemek ve kolayca montajlanabilmesi için 8 adet m8 saplama delikleri açılmıştır.



**Şekil 3.17** n kapak izometrik görünüşü



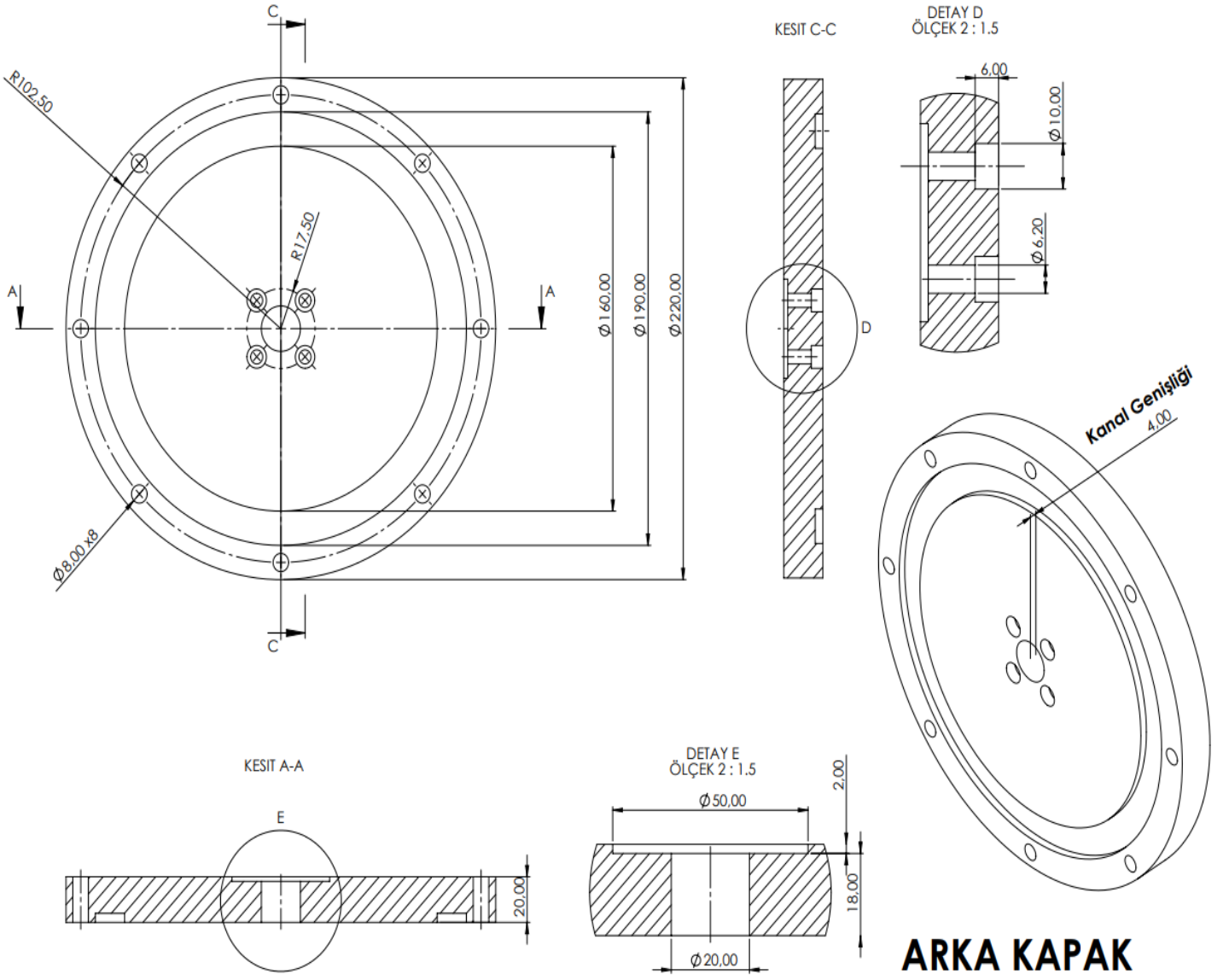
Şekil 3.18 Ön kapak teknik resim görünümü.

### 3.3.3 Arka Kapak

Ana boyutları ön kapaktaki boyutlar ile aynıdır. Beslemeler ile montajlanabilmesi için merkezine ek 4 adet M6 imbus başlı cıvata deliği açılmıştır ve arka tarafında beslemelerin merkezlenebilmesi için 2 mm'lik bir kanal açılmıştır.



Şekil 3.19 (A) Arka kapağın izometrik görünüşü. (B) Kesit görünüşü.

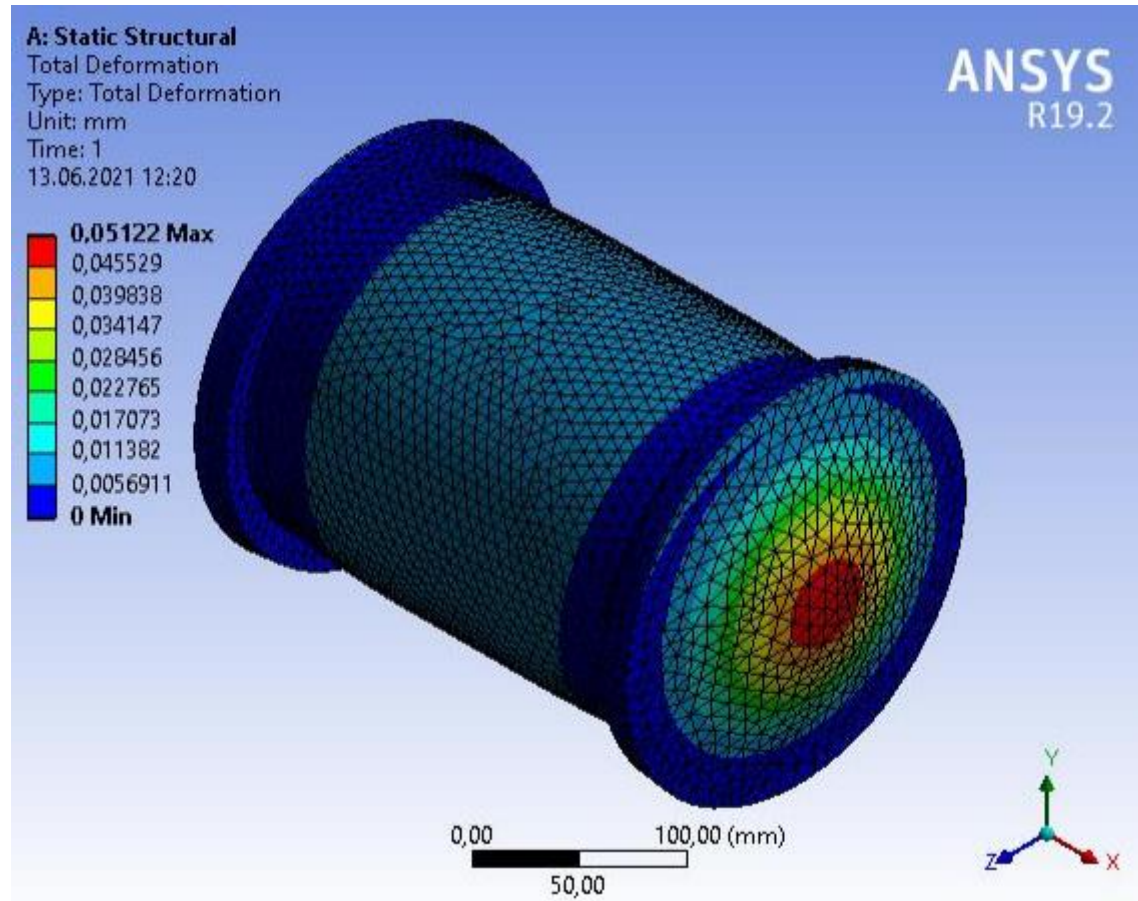
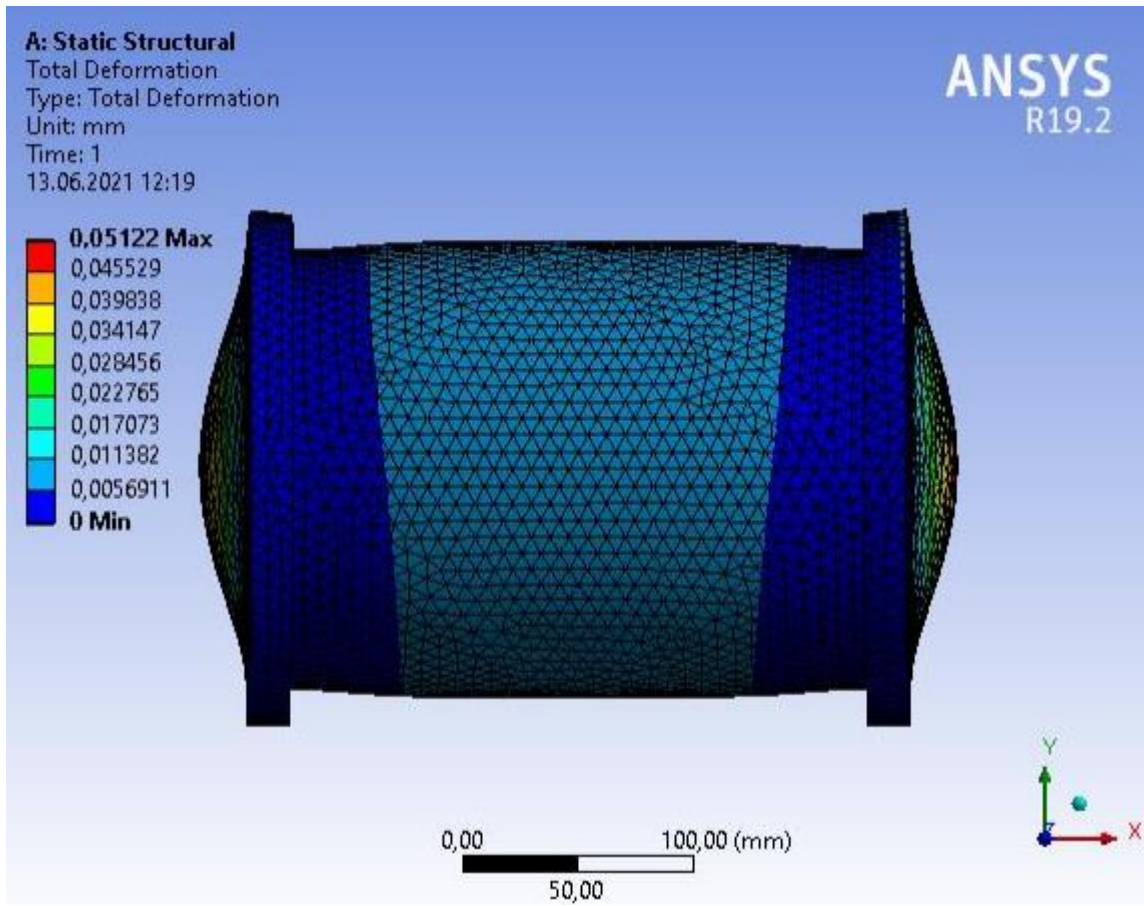


Şekil 3.20 Arka kapak teknik resim görünümü.

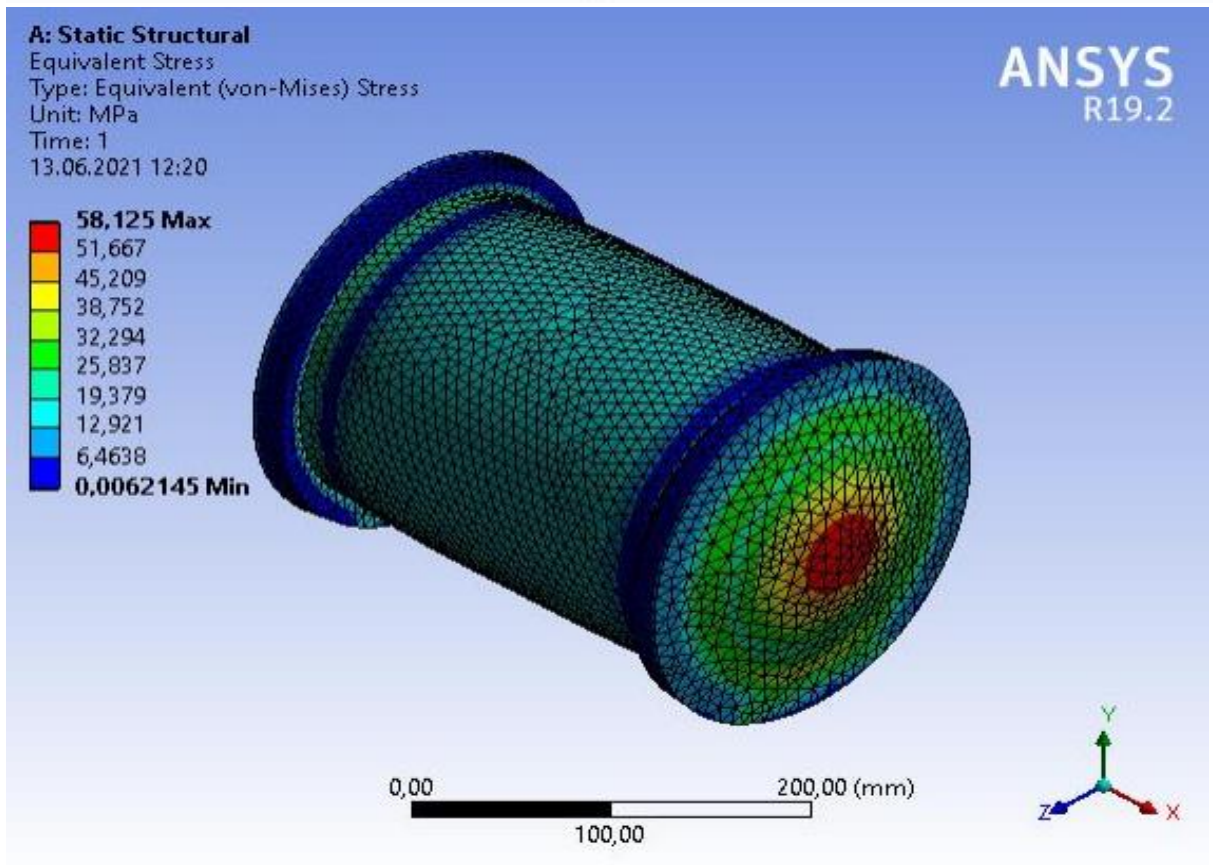
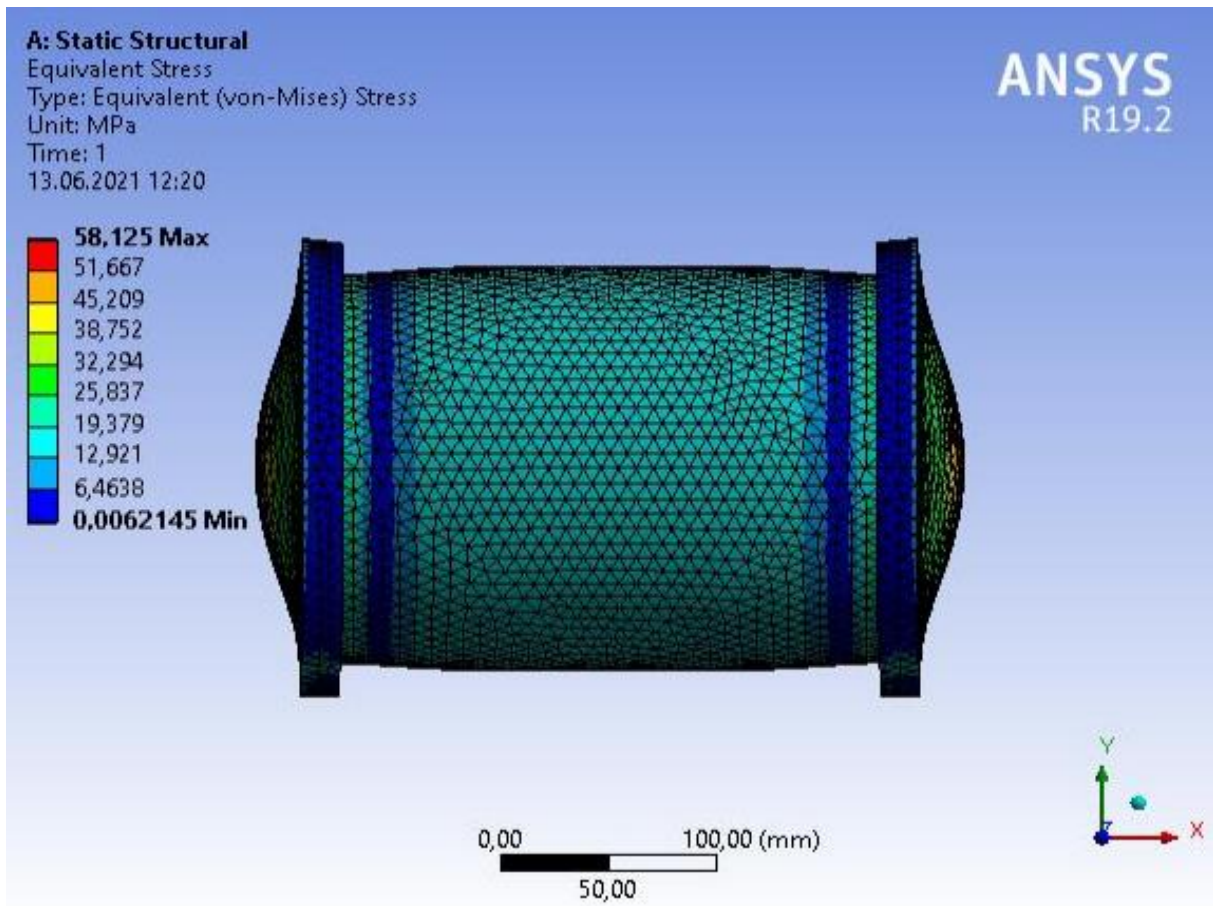
### 3.3.3.1 Isıtma Tüpü Analizi

Isıtma tüpünün kapaklar ile montajının 40 bar basınç altındaki davranışları analiz edilmiştir. Sonuçları aşağıdaki gibidir.





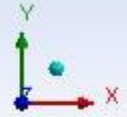
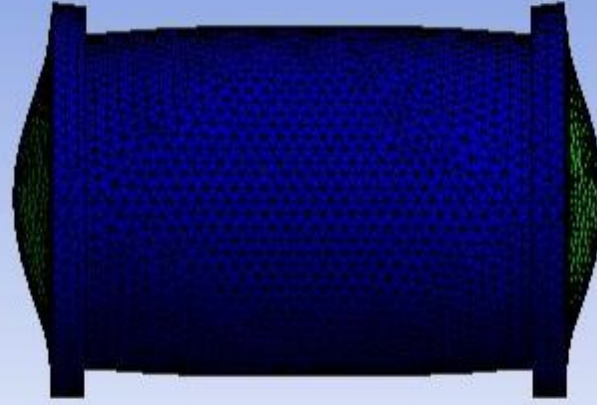
Şekil 3.21 Toplam deformasyon dağılımı.



Şekil 3.22 Eş değer gerilmeler dağılımı.

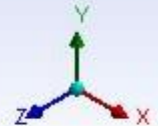
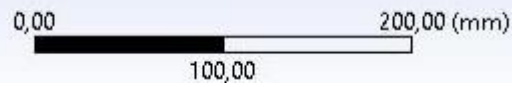
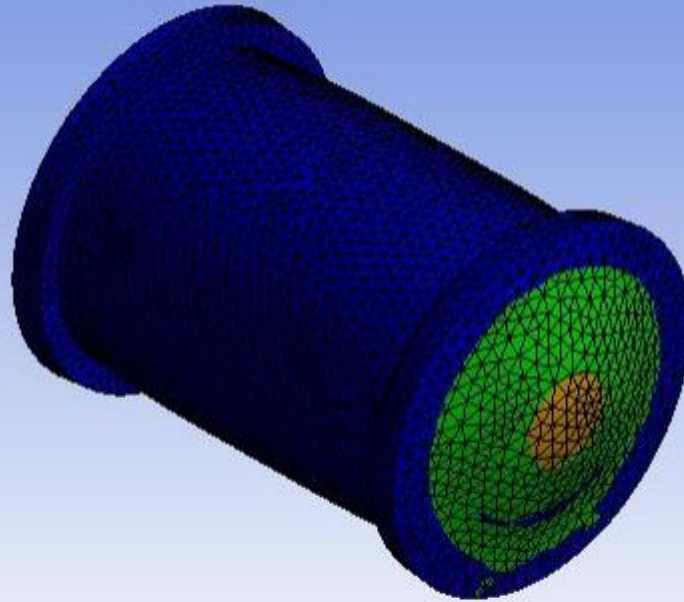
**A: Static Structural**  
Safety Factor  
Type: Safety Factor  
Time: 1  
13.06.2021 12:21

**ANSYS**  
R19.2



**A: Static Structural**  
Safety Factor  
Type: Safety Factor  
Time: 1  
13.06.2021 12:21

**ANSYS**  
R19.2

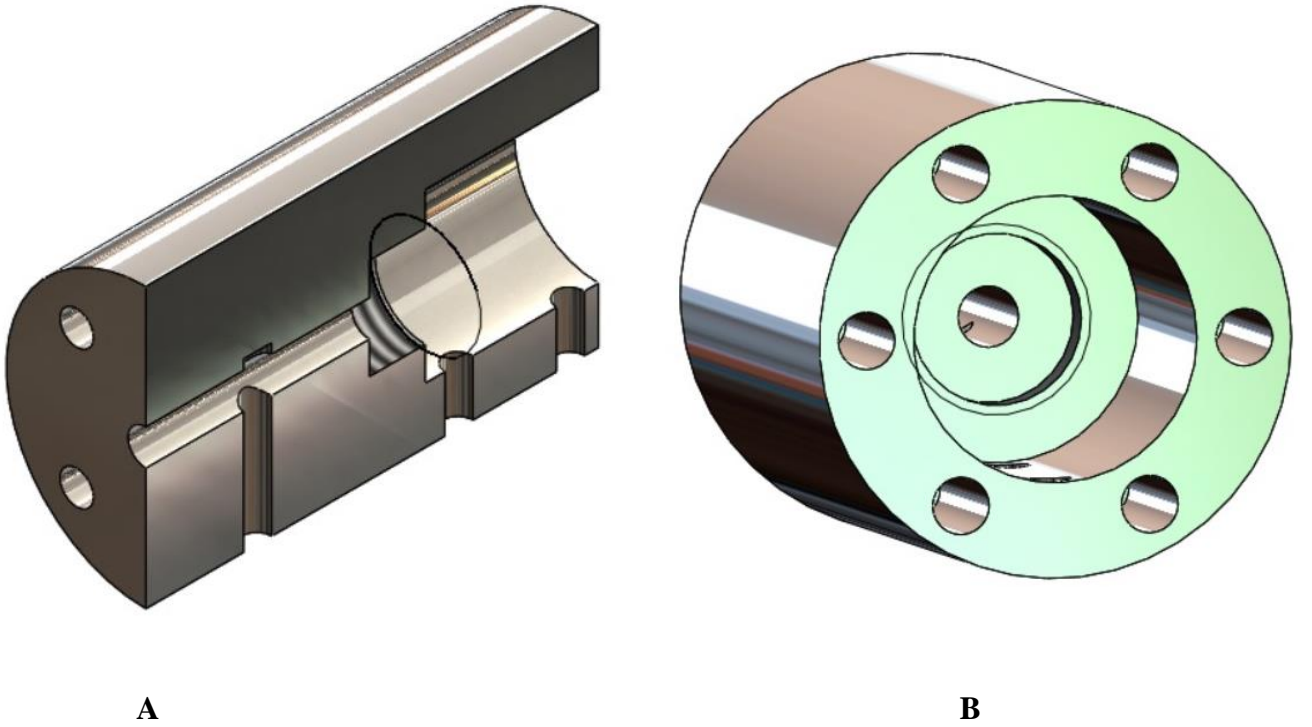


**Şekil 3.23** Emniyet Katsayısı.

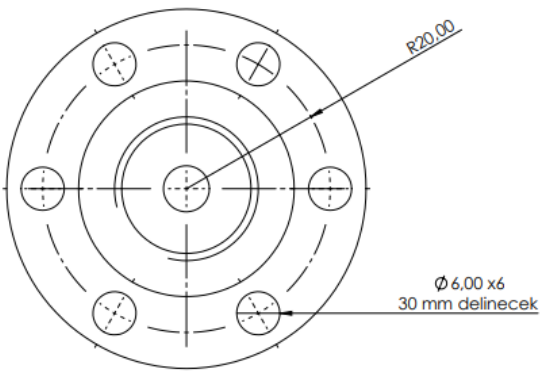
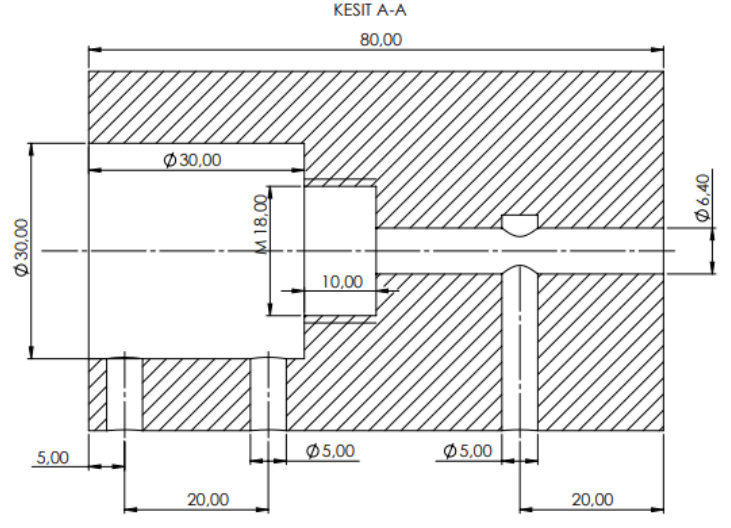
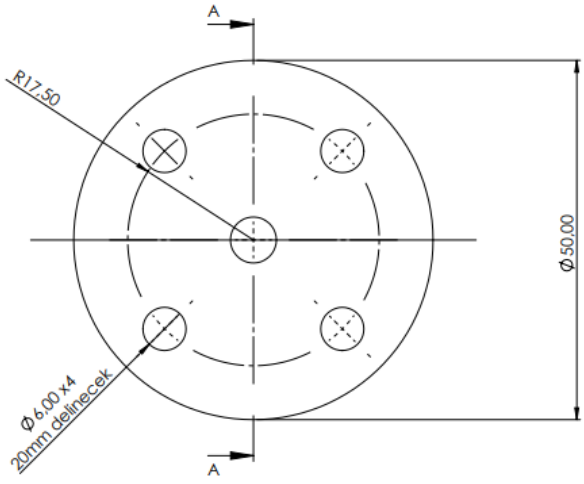


### 3.3.4 Besleme

$\Phi$  50-80 mm boyutlarındadır. Sisteme toz girişi bu parça üzerinden sağlanmaktadır. 5 mm toz besleme kanalı açılmıştır. Lülenin montajlanabilmesi için 10 mm M18 diş açılmıştır. Lülenin soğutulabilmesi için  $\Phi$ 30 mm boyutunda 30 mm uzunluğunda kanal açılmıştır. Kanalin giriş ve çıkış kısımlarına lüleyi boydan boya soğutabilmek için 5 mm boyutlarında 2 adet su besleme kanalları açılmıştır. Ön kısmında 4 adet 20 mm uzunluğunda, arka kısmında 6 adet 30 mm uzunluğunda besleme kanallarına denk gelmeyecek şekilde M6 cıvata delikleri açılmıştır.



Şekil 3.24 (A) Besleme kanalının kesit görünüşü. (B) İzometrik görünüşü.

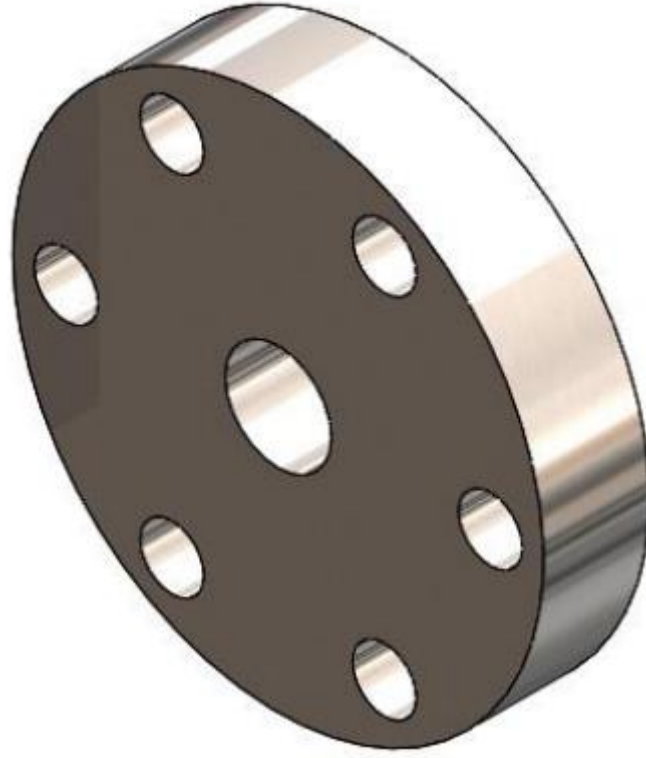


## BESLEMELER

Şekil 3.25 Beslemenin teknik resim görüntüsü.

### 3.3.5 Besleme Kapağı

Besleme kapağı, besleme ile arada sızdırmazlık elemanı kullanılarak montajlanıp, lülenin soğutma işlemine yapabildiği için tasarlanmıştır.



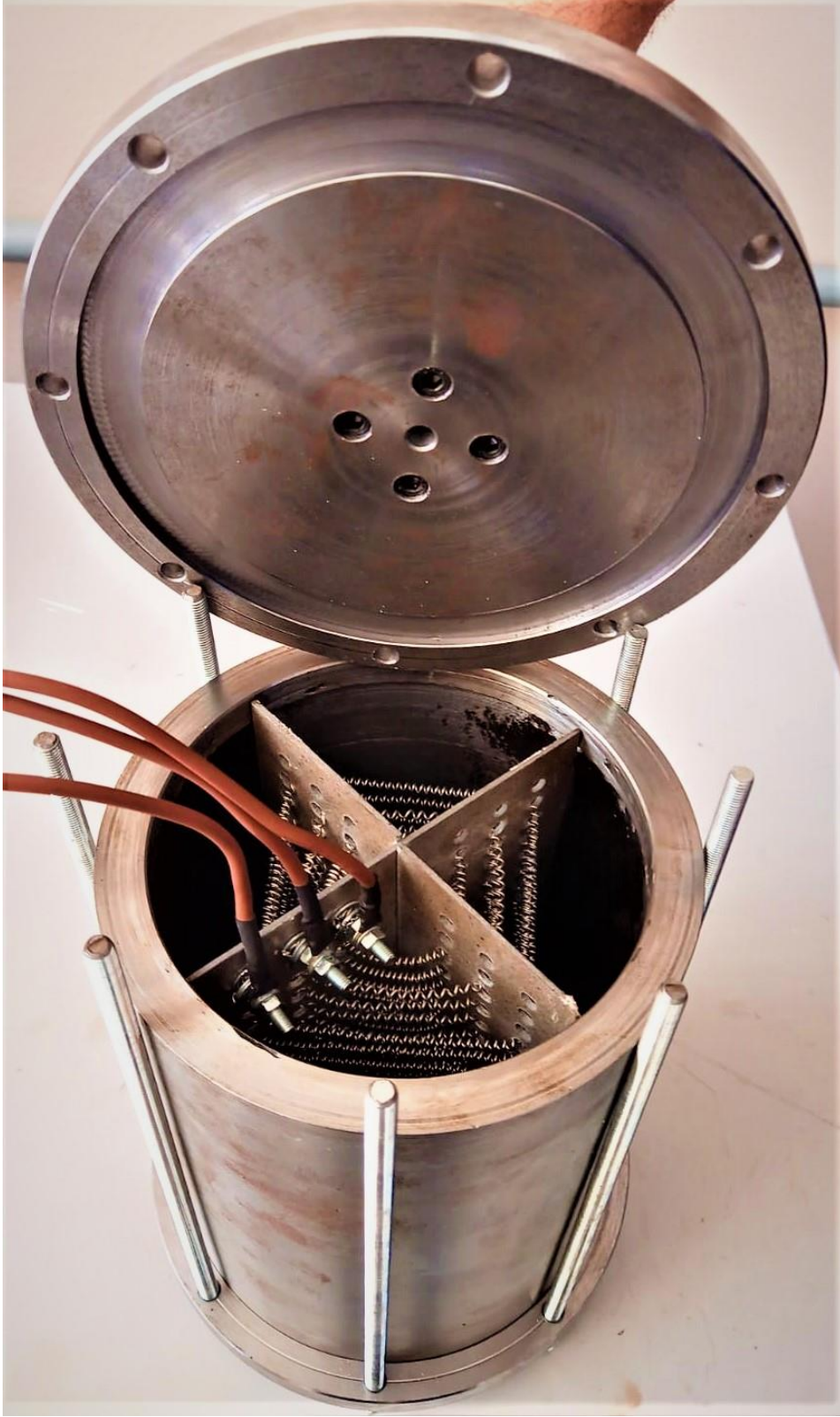
şekil 3.26 Besleme kapağının izometrik görünüşü.

### 3.4 Yapılan Çalışmanın İmalat Görüntüleri

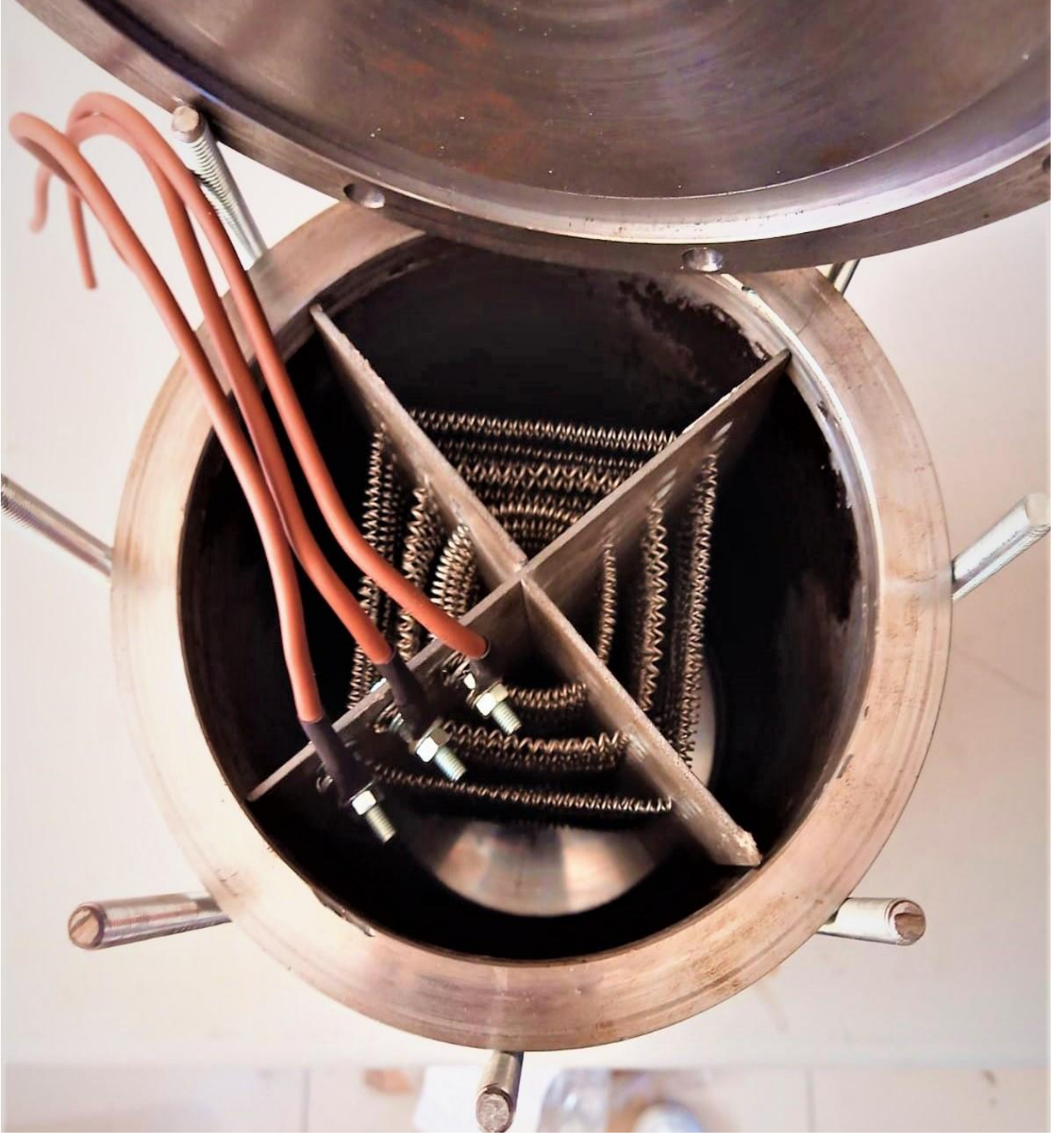


Şekil 3.27 Isıtma odası ve ısıtıcı.





Şekil 3.28 Isıtıcının, ısıtma odası içindeki görünümü.



Şekil 3.29 Isıtıcı detay görünüm.





Şekil 3.30 Montaj görünüm.

#### 4.Çevresel Etki Değerlendirmesi

**Proses emniyeti:** Uygulama açısından düşük ısı girdisi sayesinde pratik uygulama avantajı oldukça yüksek ve güvenilir bir prosestir.

**Çevre dostu proses:** Proses esnasında etrafa zehirli bir gaz veya kimyasal bir reaksiyon ürünü çıkmaması nedeniyle çevre dostu bir prosestir.



## 5. Maliyet Hesabı

**Tablo 4.** Maliyet hesabı tablosu.

PARÇA ADI	ADET	BİRİM FİYAT ( TL )	TOPLAM FİYAT ( TL )
Isıtıcı	1	1600	1600
Isıtma Odası	1	900	900
Ön Kapak	1	450	450
Arka Kapak	1	600	600
Besleme	1	250	250
Besleme Kapağı	1	100	100
Termal Conta	2	90	180
M8 Saplama	8	8	64
M8 Somun	8	0,5	4
M6 Civata	10	2,5	25
<b>Toplam Fiyat</b>		<b>4.173 ₺</b>	

Makina da bulunan diğer parçalar hazır olarak elimizde mevcuttur.

## 6. SONUÇ

Termal sprej ailesine yeni katılan soğuk sprej prosesi, diğler ısısal püskürtme tekniklerinden kaplama tozlarının ergitilmesinde ekstra bir enerji kaynağına ihtiyaç göstermemesiyle ayrılmaktadır. Kaplama uygulamasında kullanılan yüksek püskürtme hızlarıyla üretilen kinetik enerji yardımıyla püskürtülen tozlar plastik deformasyonla yüzeye biriktirilmekte olup kaplamalar üretilmektedir. Günümüzde soğuk sprej teknolojisiyle düşük ergime noktasına sahip metaller başarıyla püskürtülmektedir. Soğuk sprej kaplama teknolojisinin gelecekte daha da yaygınlaşacağı düşünülmektedir.

Bu projede nozül tasarımı yaparken, nozül için en önemli olan kısım boğaz çapıdır. Boğaz çapının azalması ile mach sayısının ve kinetik enerji miktarının artmış olduğu gözlemlenmiştir.

Projemizde yaptığımız bir diğler tasarım rezistanslı ısıtıcıdır. Rezistanslı ısıtıcımızı yüksek debide geçen havanın kısa bir süre içinde yüksek sıcaklıklara ulaştırmak için tasarladık. Isıtıcımızın tasarımında ısıl iletkenliği yüksek plakalar kullanılmıştır. Elektrik enerjisini ısı enerjisine dönüştüren rezistanlar plakaların içine montajlanıp plakalara ısı geçişi sağlanmıştır. Isıtma odasına giren hava plakalara çarparak istenilen sıcaklıklara ulaştığı gözlemlenmiştir.

## 7. KAYNAKLAR

1. Roman Gr. Maev & Volf Leshchynsky, COLD GAS DYNAMIC SPRAY, 2016
2. C.M. Kay & J. Karthikeyan, HIGH PRESSURE COLD SPRAY PRINCIPLES AND APPLICATIONS, 2016
3. Julio Villafuerte, MODERN COLD SPRAY, 2015
4. 'Karla K. Quintao, Design Optimization of Nozzle Shapes for Maximum Uniformity of Exit Flow', Florida International University USA, 2012
5. H. Singh et alii, Frattura ed Integrità Strutturale, 22 (2012) 69-84
6. Manufacturing Review 6, 25 (2019) © S.T. Oyinbo and T.-C. Jen, Published by EDP Sciences 2019
7. Murrough Murnaghan, Study of minimum length, supersonic nozzle design using the Method of Characteristics, Universitat Politècnica de Catalunya, 2019
8. Jean-Baptiste Mulumba Mbuyamba, CALCULATION AND DESIGN OF SUPERSONIC NOZZLES FOR COLD GAS DYNAMIC SPRAYING USING MATLAB AND ANSYS FLUENT, University of the Witwatersrand, 2015
9. Beena D. Baloni, Sonu P. Kumar, S. A. Channiwala, Computational Analysis of Bell Nozzles, India, 2017
10. Devyn Yoshio Kapukawai Uyeki, A Design Method for a Supersonic Axisymmetric Nozzle for Use in Wind Tunnel Facilities, San José State University USA, 2018
11. J. C. Crown and W. H. Heybey, Supersonic Nozzle Design, U. S. NAVAL ORDNANCE LABORATORY White Oak, Silver Spring 19, Maryland, 1950
12. Toufik Zebbiche & ZineEddine Youbi, Supersonic Two-Dimensional Minimum Length Nozzle Design at High Temperature. Application for Air, Department of Aeronautics, Faculty of Sciences of Engineer, University SAAD Dahleb of Blida, B.P. 270 Ouled Yaich, 09470 Blida, Algeria, 2005

13. COŞAR İ., SESÜSTÜ AKIŞ ELDE EDİLEBİLEN BİR LÜLENİN TASARIMI VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ, T.C FIRAT ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ, Elazığ, TÜRKİYE, 2018
14. Anatolii Papyrin, Vladimir Kosarev, Sergey Klinkov, Anatolii Alkhimov, Vasily Fomin, COLD SPRAY TECHNOLOGY, 2006
15. Eric Irissou, Jean-Gabriel Legoux, Anatoly N Ryabinin, Bertrand Jodoin & Christian Moreau, Review on Cold Spray Process and Technology: Part I—Intellectual Property, 2007
16. T. Stoltenhoff, H. Kreye, and H.J. Richter, An Analysis of the Cold Spray Process and Its Coatings, USA, 2001.
17. SCHMİDT T., GARTNER F., ASSADI H, KREYE H., Development of a generalized parameter window for cold spray deposition, Acta Mater., 2006, 54, 729-742.