**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

# MİKRO TESLA TÜRBİNİ TASARIMI VE ÜRETİLMESİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fazlı NALCI**

**Anabilim Dalı :** **Enerji Bilim ve Teknoloji**

**Programı :** **Enerji Bilim ve Teknoloji**

**HAZİRAN 2010**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# MİKRO TESLA TÜRBİNİ TASARIMI VE ÜRETİLMESİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fazlı NALCI**
**(301081060)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2010**
**Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Haziran 2010**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Altuğ ŞİŞMAN (İTÜ)**
**Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU (İTÜ)**
**Yrd. Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN (İTÜ)**

**HAZİRAN 2010**

***Pes Etmeyenlere,***

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında bir tasla türbini projelendirilmiş, üretilmiş ve deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Tesla türbini fikri Nikola Tesla tarafından 1900'lerin başında geliştirilmiştir. Klasik türbinlere göre en büyük farklılığı kanatlar yerine disklerin bulunmasıdır. Teze konu olan tasarımda çift nozullu, değiştirilebilir hacimli bir tasarım uygulanmıştır. Bu tasarım bilgisayar kontrollü tasarım ve üretim araç ve imkanları kullanılarak üretilmiştir.

Nisan 2010

Fazlı Nalcı

Makine Mühendisi

**İÇİNDEKİLER**

**Sayfa**

**ÖNSÖZ** ..... **v**
**İÇİNDEKİLER** ..... **vii**
**KISALTMALAR** ..... **ix**
**ÇİZELGE LİSTESİ** ..... **xi**
**ŞEKİL LİSTESİ** ..... **xiii**
**ÖZET** ..... **xv**
**SUMMARY** ..... **xvii**
**1. GİRİŞ** ..... **1**
1.1 Tezin Amacı ..... 2
1.2 Literatür Özeti ..... 2
1.3 Nikola Tesla ..... 10
**2. TESLA TÜRBİNİ** ..... **13**
2.1 Tesla Türbini Gelişimi ..... 13
2.2 Çok Kademeli Tesla Türbinleri ..... 15
2.3 Otomotiv Tesla Disk Türbini ..... 16
2.4 Hava Kompresörü, Vakum Pompası ve Hava Motoru olarak Tesla Türbini ..... 17
2.5 Hafif Tesla Uçak Türbinleri ..... 18
2.6 Çift Yönlü Çalışabilme Özelliği ..... 19
2.7 Türbin Çeşitleri, Bileşenleri ve Tesla Türbinindeki Farklılıklar ..... 19
2.7.1 Türbin çeşitleri ..... 19
2.7.1.1 Buhar türbinleri ..... 19
2.7.1.2 Gaz türbinleri ..... 20
2.7.1.3 Transonik türbinleri ..... 21
2.7.1.4 Ljungström türbini ..... 21
2.7.1.5 Seramik kanatlı türbin ..... 21
2.7.1.6 Kanatsız türbin ..... 22
2.7.1.7 Pelton türbini ..... 22
2.7.1.8 Francis türbini ..... 22
2.7.1.9 Kaplan türbini ..... 22
2.7.1.10 Rüzgar türbinleri ..... 23
2.7.2 Türbin bileşenleri ve tesla türbinindeki farklılıklar ..... 23
2.7.2.1 Rotor ..... 23
2.7.2.2 Stator ..... 24
2.7.2.3 Kanat ve diskler ..... 25
2.7.2.4 Yanma odası ..... 27
2.7.2.5 Nozul ..... 28
2.7.2.6 Şaft ..... 28
2.7.2.7 Eksoz ..... 29
**3. BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIM** ..... **31**
3.1 İki Boyutlu Çizim Sistemi ..... 31
3.2 Üç Boyutlu Modelleme ..... 32
3.2.1 Tel çerçeve yöntemi ..... 32

3.2.2 Yüzey metodu ..... 33
3.2.3 Katı modelleme ..... 33
3.3 Parametrik Tasarım ..... 34
3.4 Tesla Türbini Bileşenlerinin Tasarımı ve Ansys Yapısal Analizleri ..... 34
3.4.1 Nozul ..... 34
3.4.2 Nozul kapağı ..... 40
3.4.3 Yüksek verimli nozul ..... 41
3.4.4 Türbin yatağı ..... 42
3.4.5 Rotor ..... 44
3.4.6 Kaplin ve yataklama bileşeni ..... 44
3.4.7 Türbin yatağı kapağı ..... 45
3.4.8 Eş disk delme aparatı ..... 46
3.4.9 Kullanılan malzemelerin özellikleri ..... 47
**4. BİLGİSAYAR DESTEKLİ ÜRETİM (CAM) ..... 49**
4.1 Otomasyon ..... 50
4.4.1 Katı otomasyon ..... 51
4.4.1 Esnek veya programlanabilir otomasyon ..... 51
4.2 Bilgisayar Destekli Üretim Prosesinde Kullanılan Yazılımlar ..... 52
4.3 Türbin Bileşenlerinin Üretilmesi,Takım Yollarının Yaratılması ve Optimum Kesme Değerlerinin Belirlenmesi ..... 56
4.4 Üretim Esnasında Kullanılan Kimyasallar ..... 62
**5. DENEYSEL SONUÇLAR ..... 63**
**6. SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 69**
**KAYNAKLAR ..... 71**
**EKLER ..... 73**

**KISALTMALAR**

**CNC** **:** Computer Numerical Control
**CAD** **:** Computer Aided Design
**CAM** **:** Computer Aided Manufacturing
**PIV** **:** Particle Image Velocitymeter
**LDV** **:** Laser Doppler Velocitymeter
**MRI** **:** Magnetic Resonance Imaging
**CAPP** **:** Computer Aided Process Planning
**MRP** **:** Material Requirements Planning
**NC** **:** Numerical Control
**CAQC** **:** Computer Aided Quality Control
**CAT** **:** Computer Aided Testing
**CAI** **:** Computer Aided Inspection

## ÇİZELGE LİSTESİ

**Sayfa**

**Çizelge 2.1 :** Rüzgar türbini çeşitleri.....23
**Çizelge 4.1 :** Türbin yatağı optimum kesme parametreleri.....56
**Çizelge 4.2 :** Nozul optimum kesme parametreleri.....57
**Çizelge 4.3 :** Şaft bağlantı bileşeni optimum kesme parametreleri.....57
**Çizelge 4.4 :** Eş delik delme aparatı optimum kesme parametreleri..... 58
**Çizelge 4.5 :** Nozul kapağı optimum kesme parametreleri.....59
**Çizelge 4.6 :** Türbin yatağı kapağı optimum kesme parametreleri.....59
**Çizelge 4.7 :** Türbin yatağı nozul girişi yan görünüş optimum kesme parametreleri.....60
**Çizelge 4.8 :** Türbin yatağı nozul girişi ön görünüş optimum kesme parametreleri.....61
**Çizelge 4.9 :** Kaplin ve yataklama bileşeni kapağı optimum kesme parametreleri....61
**Çizelge 4.10 :** Kaplin ve yataklama bileşeni optimum kesme parametreleri.....62

## ŞEKİL LİSTESİ

**Sayfa No**

**Şekil 1.1 :** Tahsin Ergin v.d. tesla fanı deney düzeneği.....3
**Şekil 1.2 :** Tahsin Ergin v.d. deneysel çalışma çıktıları: (a) Debi – verimlilik değişimi. (b) Radyal koordinat – reynolds sayısı değişimi.....3
**Şekil 1.3 :** Gerald E. Miller v.d. çalışması: (a) Deney düzeneği. (b) Disk kalp pompası.....4
**Şekil 1.4 :** P.J.Roddy v.d. akış – verimlilik grafiği.....5
**Şekil 1.5 :** Chyi Soong v.d. çalışması: (a) Deney düzeneği. (b) Disk parametreleri...5
**Şekil 1.6 :** Chyi Soong v.d. çalışması: (a) G = 0.08. (b) G = 0.1. (c) G = 0.133.....6
**Şekil 1.7 :** Chyi Soong v.d. çalışması disk aralığı ve dönüş yönü etkileri.....7
**Şekil 1.8 :** Chyi Soong v.d. çalışması disk aralığı ve dönüş yönü etkileri.....7
**Şekil 1.9 :** Y.S. Tsai v.d. çalışması deney düzeneği.....8
**Şekil 1.10 :** Y.S. Tsai v.d. çalışması diskler üzeri akış.....9
**Şekil 1.11 :** Danny Blanchard v.d. çalışması: (a) Mikro Tesla Pompası. (b) Türbin bileşenleri.....9
**Şekil 2.1 :** Tesla türbini bileşenleri.....13
**Şekil 2.2 :** Tesla türbini çizimleri.....14
**Şekil 2.3 :** Çok kademeli tesla türbini.....15
**Şekil 2.4 :** Otomotiv tesla türbini.....16
**Şekil 2.5 :** Tesla kompresör ve güç rotoru. .....17
**Şekil 2.6 :** Tesla vakum pompası.....18
**Şekil 2.7 :** Rankine çevirimi.....20
**Şekil 2.8 :** Brayton çevirimi.....21
**Şekil 2.9 :** Gaz türbini ve tesla türbini rotoru.....24
**Şekil 2.10 :** Kanat malzeme dayanımları.....25
**Şekil 2.11 :** Türbin sıcaklık dayanımı gelişimi.....25
**Şekil 2.12 :** Gaz türbini kanat yapısı.....26
**Şekil 2.13 :** Gaz türbini yanma odası.....27
**Şekil 3.1 :** Nozul tasarımları: (a) Tasarım 1. (b) Tasarım 2... .....35
**Şekil 3.2 :** Nozul tasarımları: (a) Mesh uygulaması . (b) Basınç uygulaması.....35
**Şekil 3.3 :** Gerilme analizi – Al 7075, 25 bar..... .....36
**Şekil 3.4 :** Yer değiştirme analizi – Al 7075, 25 bar.....36
**Şekil 3.5 :** Gerilme analizi – Paslanmaz çelik, 25 bar.....37
**Şekil 3.6 :** Yer değiştirme – Paslanmaz çelik, 25 bar.....38
**Şekil 3.7 :** Gerilme analizi – Titanyum, 25 bar.....38
**Şekil 3.8 :** Yer değiştirme – Titanyum, 25 bar.....39
**Şekil 3.9 :** Gerilme analizi – Al 7075, 35 bar.....39
**Şekil 3.10 :** Yer değiştirme – Al 7075, 35 bar.....40
**Şekil 3.11 :** Nozul kapağı: (a) CAD. (b) Mesh uygulaması.....40
**Şekil 3.12 :** Nozul kapağı gerilme analizi.....41
**Şekil 3.13 :** Geliştirilmiş nozul girişleri.....41
**Şekil 3.14 :** Türbin yatağı: (a) Tasarım 1. (b) Tasarım 2. .....42
**Şekil 3.15 :** Türbin yatağı gerilme analizi – Al 7075, 5 bar.....43

**Şekil 3.16 :** Türbin yatağı yer değiştirme – Al 7075, 5 bar.....43
**Şekil 3.17 :** Rotor tasarımı: (a) Tasarım 1 arka görünüş. (b) Tasarım 2 ön görünüş. (c) Tasarım 1.....43
**Şekil 3.18 :** Kaplin ve yataklama bileşeni: (a) Ön görünüş. (b) Arka görünüş. (c) Generatör bağlantısı.....45
**Şekil 3.19 :** Türbin yatağı kapağı: (a) Standart kapak. (b) 6 mm tasarımı. (c) 12 mm tasarımı.....46
**Şekil 3.20 :** Eş disk delme aparatı.....46
**Şekil 4.1 :** Üretim prosesi.....51
**Şekil 4.2 :** Vcarve Pro Cam yazılımı.....53
**Şekil 4.3 :** Takım Yolu Seçenekleri.....54
**Şekil 4.4 :** Cut3D Cam yazılımı.....54
**Şekil 4.5 :** Mach 3 CNC kontrol yazılımı.....55
**Şekil 4.6 :** Hassas Komparatör kullanımı.....55
**Şekil 4.7 :** Türbin yatağı (a) Takım Yolu. (b) Üretim.....56
**Şekil 4.8 :** Nozul (a) Takım Yolu. (b) Üretim. .....57
**Şekil 4.9 :** Şaft bağlantı bileşeni (a) Takım Yolu. (b) Üretim. .....57
**Şekil 4.10 :** Eş delik delme aparatı (a) Takım Yolu. (b) Üretim. .....58
**Şekil 4.11 :** Nozul kapağı (a) Takım Yolu. (b) Üretim. .....58
**Şekil 4.12 :** Türbin yatağı kapağı (a) Takım Yolu. (b) Üretim. .....59
**Şekil 4.13 :** Türbin yatağı nozul girişi yan görünüş (a) Takım Yolu. (b) Üretim.....60
**Şekil 4.14 :** Türbin yatağı nozul girişi ön görünüş (a) Takım Yolu. (b) Üretim.....60
**Şekil 4.15 :** Kaplin ve yataklama bileşeni kapağı (a) Takım Yolu. (b) Üretim.....61
**Şekil 4.16 :** Kaplin ve yataklama bileşeni (a) Takım Yolu. (b) Üretim.....62
**Şekil 4.17 :** Debi – güç (4 Bar).....63
**Şekil 4.18 :** Açısal hız – tork (4 Bar).....64
**Şekil 4.19 :** Güç – verim (4 Bar).....64
**Şekil 4.20 :** Debi – güç (4 Bar).....65
**Şekil 4.21 :** Açısal hız – tork (4 Bar).....65
**Şekil 4.22 :** Güç – verim (5 Bar).....66
**Şekil 4.23 :** Debi – güç (4 Bar).....66
**Şekil 4.24 :** Açısal hız – tork (4 Bar).....67
**Şekil 4.25 :** Güç – verim (6 Bar).....67
**Şekil A.1 :** Alüminyum 7075 malzeme özellikleri.....74
**Şekil A.2 :** Dijital komparator kalibrasyon sertifikası.....75
**Şekil A.3 :** Salgı tip komparator kalibrasyon sertifikası.....76
**Şekil A.5 :** Sieg KX3 CNC dik işleme merkezi.....79
**Şekil A.6 :** Kullanılan kimyasallar (a) Sızdırmazlık. (b) Soğutma Solüsyonu.....80

## MİKRO TESLA TÜRBİNİ TASARIMI VE ÜRETİLMESİ

## ÖZET

Bu tez çalışmasında bir Tesla türbini projelendirilmiş, tasarlanmış ve üretilmiştir. Tesla türbini tasarım aşamasında bilgisayar destekli tasarım ve üretim teknolojileri ve metodlarından yararlanılmıştır. Değiştirilebilir çift nozul girişli, hacim, disk sayısı, disk aralığı değişikliği imkanı sağlayan bir yatağa sahip yeni bir tasarım sunulmuştur. Bu tasarıma ait elemanlara sonlu eleman analizleri yapılmış olup maksimum gerilme, yer değiştirme değerleri farklı malzemeler için hesaplanmış, tasarım eksiklikleri giderilmiştir.

Literatür araştırması olarak dönen diskler arasındaki akış ve tesla fan teorisi incelenmiştir. Tesla türbini bölümünde tesla türbini çalışma prensipleri, kullanım alanları ve çeşitleri anlatılmıştır. Çok kademeli türbinler, otomotiv, uçak tesla türbinleri incelenmiştir. Ayrıca diğer türbin çeşitleri ve bileşenleri işlenmiş ve tesla türbini ile arasındaki farklılıklar belirtilmiştir. Bilgisayar destekli tasarım bölümünde tasarım prosesleri ve çeşitleri anlatılmış, iki boyutlu çizim sistemleri, üç boyutlu modelleme, parametrik tasarım özetlenmiştir. Sonlu elemanlar yazılımı çıktıları ve kullanılan malzemelerin özellikleri belirtilmiştir.

Bilgisayar destekli üretim başlığı altında, CAM prosesi ve otomasyon sistemleri anlatılmıştır. Bu bölümde tasarlanan türbin bileşenleri G kodlarını yaratmak için kullanılan yazılımlar özetlenmiştir. Daha sonra G kodları her bir bileşen için oluşturulmuş ve bir CNC dik işleme makinesi kullanılarak üretim gerçekleştirilmiştir. Üretim esnasında yine her bir bileşen için optimum kesme parametreleri saptanmıştır. Sonuç ve öneriler kısmında konu ile ilgili yapılması gereken ileri çalışmalar belirtilmiştir.

## DESIGN & MANUFACTURING OF A MICRO TESLA TURBINE


## SUMMARY

In this thesis study, a tesla turbine is designed and manufactured. In the design stage computer aided design (CAD) and Computer aided Manufacturing (CAM) technologies and methodologies are used. At the end, a double nozzle enterance turbine had been manufactured. This turbine has flexible volume, disk number, disk gap abilities and it is completely a new design. Finite element analysis had been performed for turbine parts and maximum stress and deflection are calculated. Different materials are used for these analysis. Design gaps have been eleminated.

In the literature survey, flow between rotating disks and tesla fan theory are investigated. Tesla turbine working principles, usage and types are explained in the Tesla Turbine part. Multi stage tesla turbines, automotive and airplane tesla turbines are mentioned. Furthermore, other turbine types and differences between tesla turbine are studied. In the computer aided design part, design processes, types are explained. Two and three dimensional drawing concepts, parametric design are summarized. FEM software outputs and material properties are presented.

In the computer aided manufacturing part, CAM process and automation systems are studied. Also G codes for every part of the tesla turbine are calculated. Sofware which are used to produce these G codes are summarized. After this step, parts are manufactured by using a CNC router machine. Optimum cutting parameters are presented for every part. At the conclusion paragraph, further studies related to subject is mentioned.

# 1.GİRİŞ

Tesla türbini sınır tabaka teorisine dayanarak çalışan bir türbin çeşididir. Paralel olarak dizilmiş ve biribirine bağlı olarak dönen disklerden oluşan bir rotora sahiptir. Bu diskler arasına basınçlı akışkan püskürtülmesi ile disk yüzeylerinde sınır tabaka oluşur ve tesla türbini kanadı olmayan bir türbin olmasına rağmen bu viskoz bölgeler kanat görevi görürler. Basıçlı akışkanın momentumu rotora aktarılır ve bir generatöre bağlı olan şaft elektrik üretime yarar. Tesla türbini için en önemli bileşenler nozul, türbin yatağı ve rotor tasarımıdır. Nozul deliklerinin mümkün olduğunca diskler arasına yönlendirilmesi gerekmektedir. Türbin yatağının mümkün olduğunca sürekli, köşesiz bir tasarıma sahip olması gerekmektedir.

Bu çalışma Giriş, Tesla Disk Türbini, Türbin Dizaynı, Türbin Üretimi ve Sonuç ve Öneriler başlıkları altında beş bölümden oluşmaktadır.

Giriş bölümünde raporun içeriği, tezin amacı ve literatür özetleri anlatılmaktadır. Tesla türbini ile alakalı çok zengin kaynaklar olmaması nedenleri dolayısıyla tesla fanı, diskler üzerindeki akış gibi türbin ile alakalı konular işlenmiştir.

Tesla Türbini kısmında tesla türbini tipleri, kullanım amaçları, çeşitleri arasındaki farklılıkları anlatılmıştır. Buna ek olarak diğer türbin çeşitleri, bunların bileşenleri ve tesla türbini ile arasındaki farklılıklar da işlenmiştir.

Tesla Türbininin Bilgisayar Destekli Tasarımı başlığı altında genel olarak CAD konusu işlenmiştir. İki boyutlu çizim sistemleri, üç boyutlu modelleme, tel çerçeve yöntemi, yüzey metodu, katı modelleme, parametrik tasarım bu başlık altında incelenen konulardandır. Ayrıca tesla türbini bileşenlerinin tasarımı ve ansys yapısal analizleri bu bölümde işlenmiştir. Kullanılan malzeme özellikleri de yine anlatılan konular arasındadır.

Tesla Türbininin Bilgisayar Destekli Üretimi başlığı altında bilgisayar ile izleme, denetim ve üretim destek uygulamaları anlatılmıştır. Otomasyon, katı otomasyon, esnek veya programlanabilir otomasyon konuları bu kısımda bulunmaktadır.

CAM prosesinde kullanılan yazılımlar özetlenmiştir. Bu yazılımlar Vcarve Pro, Cut 3D ve Mach 3 tür.

Türbin bileşenlerinin üretilmesi, her bir parça için takım yollarının belirlenmesi bu başlık altında işlenmiştir. Optimum kesme parametreleri her bir parça için tablolar halinde verilmiştir ve üretim esnasında kullanılan kimyasallar özetlenmiştir.

### 1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında yeni bir tesla türbinin projelendirilmesi hedeflenmiştir. Üretilen prototip tesla türbini değiştirilebilir çift nozullu olup, tek veya iki nozulu aynı anda çalıştırma imkanı vermektedir. Nozullar değiştirilebilir olduğu için farklı nozul dizaynlarının etkilerini görmek mümkündür.

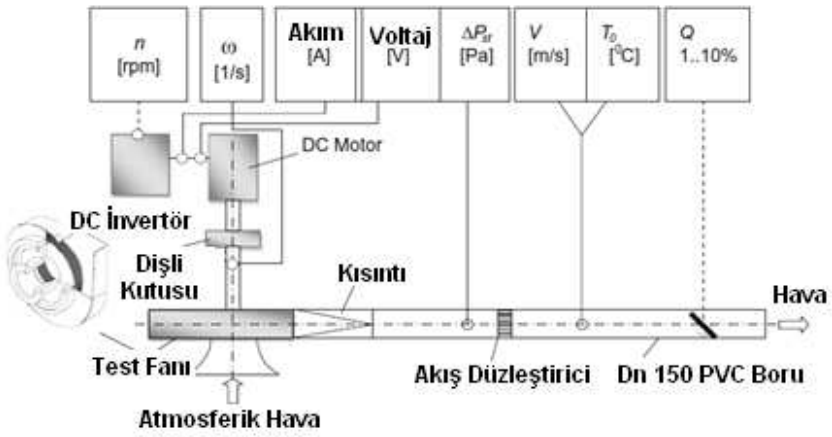
Türbin yatağı da nozul tasarımı gibi esnek olarak kullanılabilmektedir. Üretilen farklı yatak kapakları türbin iç hacminin değiştirilmesini sağlar. Böylece farklı disk sayısı ve disk aralıklarında deneysel çalışma yapmak mümkün olabilir. Rotor da bu esneklikte tasarlanmış ve üretilmiştir.

### 1.2 Literatür Özeti

Tesla türbini 1900'lerin başında çalışılmış ve üzerinde detaylı çalışmalar yapılmayıp, seneler boyunca ihmal edilmiş bir türbin olması sebebiyle literatürde bu konuyla alakalı yeterli bilgiye rastlama ihtimali düşüktür. Genel olarak bu tezin literatür kısmını tesla fanı, diskler üzerindeki akış gibi tesla türbini ile alakalı olabilecek çalışmalar oluşturmaktadır.

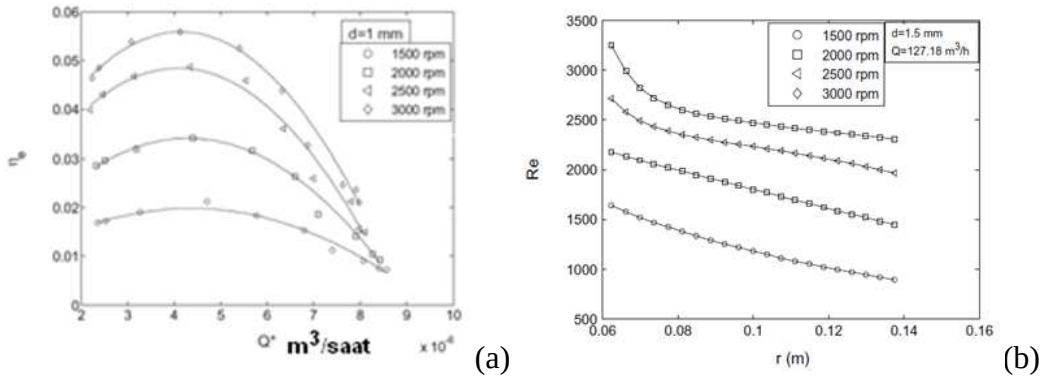
Bunlardan ilki Tahsin Ergin v.d.'nin yazmış olduğu, "Bir tesla fanının tasarımı, testi ve iki boyutlu akış modeli" adlı makalesidir. Bu makalede bir tesla fanı tasarlanmış ve test edilmiştir. Deneysel olarak düşük verim değerleri elde edilmiş bunlar düşük akışkan viskozitesine, emiş ve eksoz kısımlarındaki mekanik kayıplara bağlanmıştır.

Teorik olarak bölgesel ve toplam kesme gerilimleri, radyal ve teğetsel hızlara göre incelenmiştir. Tasarlanan fan farklı debi, disk aralıklarında ve açısal hızlarda çalıştırılmış, disklerden havaya aktarılan güç hesaplanmıştır. Bunun sonucunda disk verimliliğine ulaşılmıştır.




**Şekil 1.1 :** Tahsin Ergin v.d. tesla fanı deney düzeneği [4].

Şekil 1.1'de deney düzeneğine ait resmi görmek mümkündür. Testlede elektrik motoru üzerindeki akım ve voltaj, şaft açısal hızı, akışkan debisi, akışkan sıcaklığı gibi parametreler ölçülmüştür. Şekil 1.2'de Toplam verimlilik – Akış ve Reynold sayısı – Radyal koordinat grafiklerini görmek mümkündür.



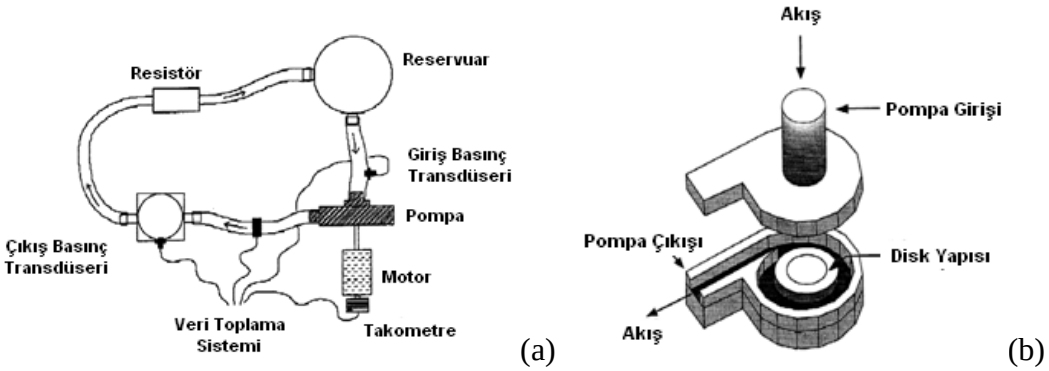

**Şekil 1.2 :** Tahsin Ergin v.d. deneysel çalışma çıktıları: (a) Debi – verimlilik değişimi. (b) Radyal koordinat – reynolds sayısı değişimi [4].

Verimlilik grafiğinde diskler arasındaki boşluklar 1 mm olarak kabul edilmiş ve 4 farklı açısal hızda verimlilik değeri hesaplanmıştır.

Sonuçta fan verimliliğinin açısal hız arttıkça arttığı ve maksimum %5,5 değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Reynolds sayısının ise radyal koordinat arttıkça düştüğü anlaşılmıştır [4].

Gerald E. Miller, "Bir disk kan pompası için optimum tasarım koşulları" isimli makalesinde disk rotoru kullanarak bir kalp pompası tasarlamıştır. 4, 5, 6 diskli ve 0.38, 0.5 ve 0.63 cm disk boşluklu konfigürasyonlar denenmiş ve degregasyonun en

düşük olduğu konfigürasyonun 5 diskli ve 0,38 cm aralıklı pompa olduğunu saptamıştır. Burada degregasyon olarak pompanın kana verdiği zarar anlaşılmalıdır [5].

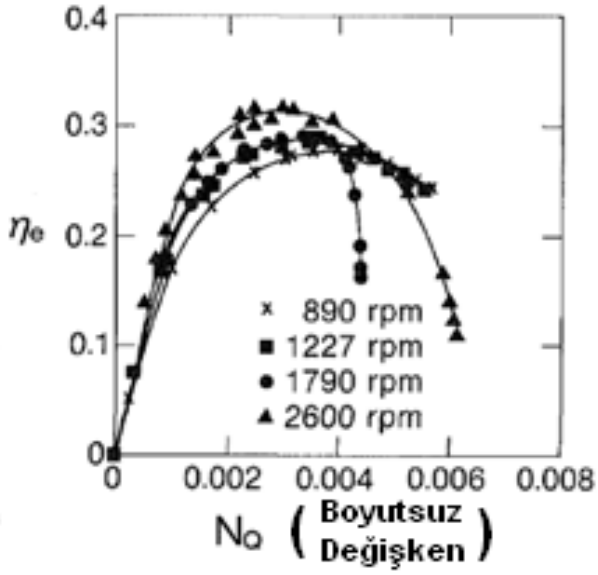



**Şekil 1.3 :** Gerald E. Miller v.d. çalışması: (a) Deney düzeneği. (b) Disk kalp pompası [5].

Şekil 1.3'de kalp pompası düzeneğini görmek mümkündür. Kan pompaya girmeden önceki ve çıktıktan sonraki basınçları, pompanın açısal hızı ölçülmüştür.

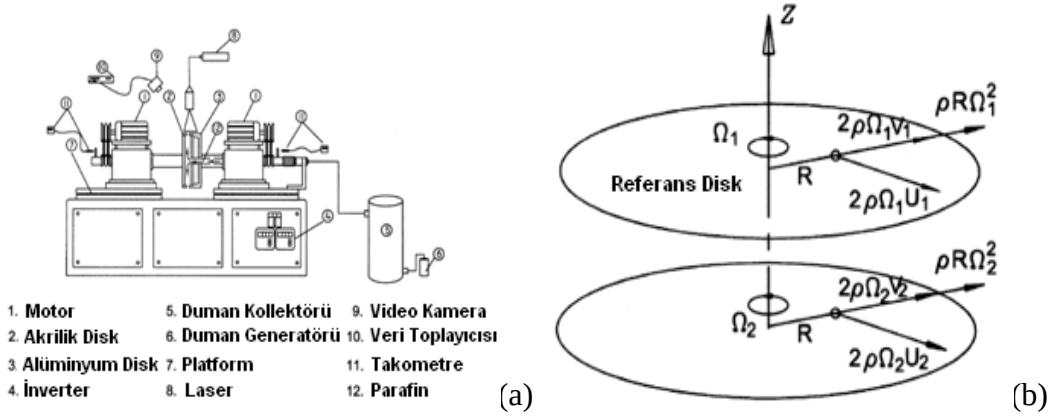
P.J. Roddy'nin yazmış olduğu "Bir disk santrifrüj pompanın performans karakterleri" isimli makalede ise yine bir disk pompa tasarlanmış ve karakteristiği belirtilmiştir. Bu çalışmanın Tahsin Ergin çalışmasına göre en büyük farkı daha büyük çaplı disklerin kullanılmasıdır (36 cm çapında). Şekil 1.4 'de P.J Roddy'nin çalışması sonucunda elde edilen verim – boyutsuz akış değerini görmek mümkündür. $N_Q$ boyutsuz bir akış oranıdır ve $Q/\Omega D^3$ 'e eşdeğerdir. Bu denklemde $\Omega$ açisal hız, Q akış D ise disk çapıdır.

Tahsin Ergin çalışmasına benzer bir şekilde açısal hızın arttığı zaman verimliliğin arttığı görülmektedir. Ayrıca belirli bir akış değerinden sonra verimliliğin düştüğü de görülmektedir.



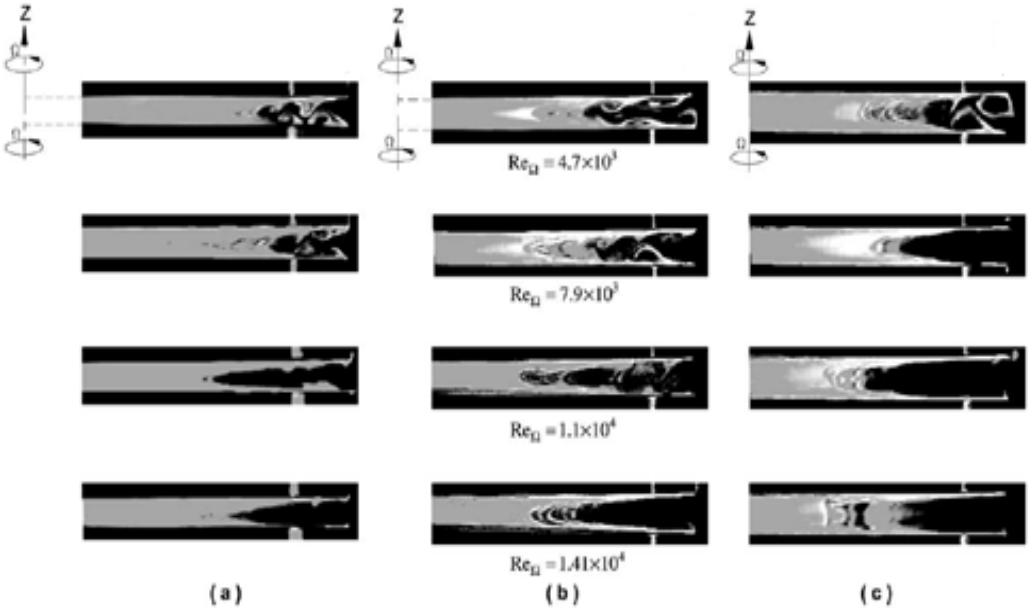

**Şekil 1.4 :** P.J.Roddy v.d. akış – verimlilik grafiği [7].

Chyi Soong'un "Ayrı eksenli dönen iki disk arasındaki akış" isimli makalesinde ise iki ayrı elektrik motoruna bağlı diskler arasındaki akış incelenmiştir. Bu disklerin aynı yöne veya farklı yönlerde döndüğü, aralarındaki uzaklıkların değiştiği senaryolarda diskler arasına duman enjekte edilmiş ve akış yapısı incelenmiştir




**Şekil 1.5 :** Chyi Soong v.d. çalışması: (a) Deney düzeneği. (b) Disk parametreleri[8].

Şekil 1.5 (a)'da deney düzeneğine ait resim ve diskler görülmektedir. İki adet motor akrilik diskleri döndürmektedir ve bir duman yaratıcı diskler arasına duman püskürtmektedir. Video kamera yardımı ile diskler arasındaki akış profili kayıt edilmiştir. Şekil 1.5 (b)'de ρ yoğunluğu, Ω açısal hızı, V radyal ,U teğetsel hızları, R yarıçapı ifade etmektedir.

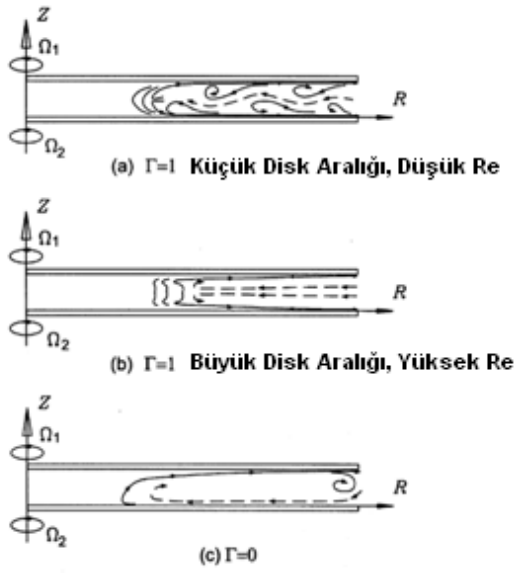



**Şekil 1.6 :** Chyi Soong v.d. çalışması: (a) G = 0.08. (b) G = 0.1. (c) G = 0.133 [8].

Chyi Soong'un çalışmasında ayrıca G olarak adlandırılan bir katsayı mevcuttur ve S / $R_o$ dan oluşmaktadır. Burada S diskler arasındaki mesafeyi ve $R_o$ disk yarıçapını ifade etmektedir.

Şekil 1.6'da gösterilen a sütunundaki resimlerde G katsayısı 0.08, b sütununda 0.1 ve c sütununda 0.133 olarak kabul edilmiştir. Kısaca, disk aralığının a dan c ye doğru gittikçe azaldığı söylenebilir. Aynı zamanda Reynolds sayısı da yukarıdan aşağıya doğru gittikçe artmaktadır. Şekil 1.6'dan da görülebileceği gibi Reynolds sayısı arttıkça akış profili daha düzgün bir şekil almaktadır [8].

Ancak burada reynolds sayısının daha da arttırılması durumunda akış profilinin düzgün olarak kalacağı söylenemez, türbulanslı akışta profilin değişmesi muhtemeldir. Ayrıca yine aynı çalışmada yapılan deney sonrasında akış profilleri çıkartılmış ve Şekil 1.7'de gösterilmiştir. Burada belirtilen r iki disk arasındaki açısal hızlar oranını vermektedir. Bu çalışma boyunca r değeri 1,0 ve -1 olarak alınmıştır. Bu değerin 1 olarak alınması disklerin aynı açısal hızla aynı yönde döndüklerini göstermektedir. Bu durum Tesla türbini için geçerli olandır. Aynı zamanda tesla türbini rotorunun en dışındaki diskler için de r = 0 senaryosundan yararlanılabilir. Bu durumun Chyi Soong çalışmasındaki karşılığında bir disk durmaktadır ve diğer disk dönmektedir.




**Şekil 1.7 :** Chyi Soong v.d. çalışması disk aralığı ve dönüş yönü etkileri [8].




**Şekil 1.8 :** Chyi Soong v.d. çalışması disk aralığı ve dönüş yönü etkileri [8].

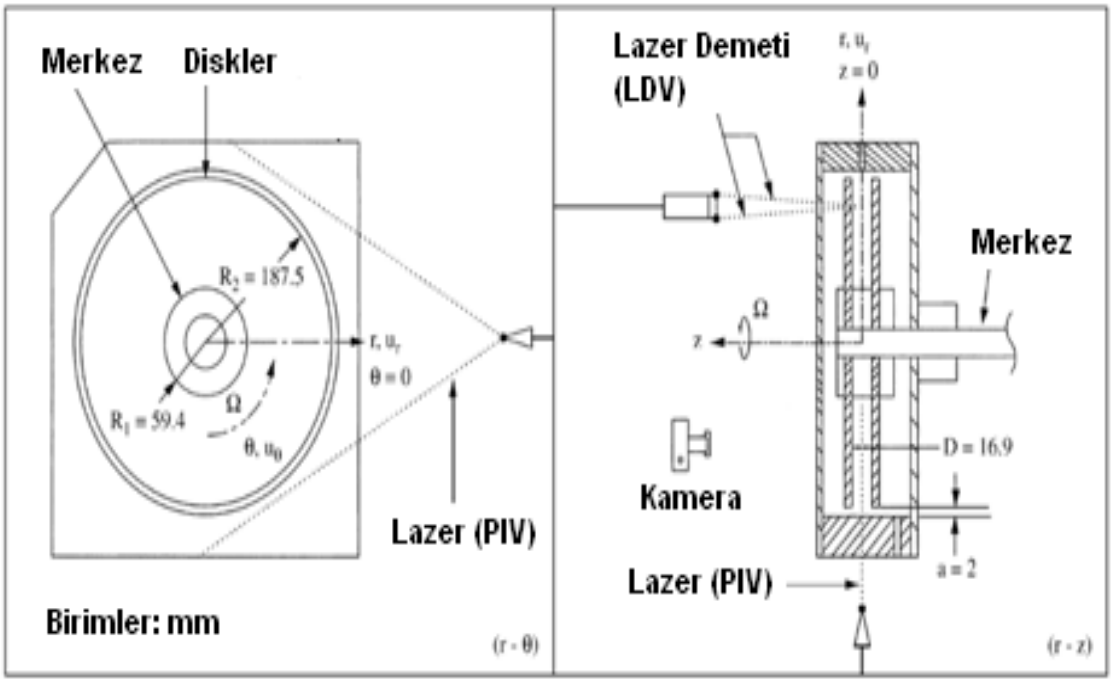
Chyi Soong'un çalışmasının tesla türbinine göre bir diğer farkı da dumanın iki diskin arasına bir diskin ortasındaki duman enjeksiyon deliğinden yapılmasıdır. Tesla türbininde akışkan disklerin arasına bir nozul yardımı ile dışarıdan verilmektedir ve disklerin ortasındaki eksoz deliğinden dışarıya atılmaktadır. Her ne kadar Chyi Soong deneyi ters bir prosese sahip olsa da dönen diskler arasındaki akış hakkında yapılmış az çalışmalardan birisidir ve tesla türbini için fikir sahibi olmak mümkündür.

Şekil 1.7'de (a) ve (b)'de aynı hızda ve aynı yönde dönen diskler incelenmiş ve reynolds sayısının artması ile akışın daha düzgün bir rejime girdiği gözlenmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş değeri aşıldığında bu düzgün akış rejimine rastlanması beklenmemektedir.

Chyi Soong'un çalışmasında türbülanslı akışa geçiş reynolds değeri 1.2 x $10^4$ olarak belirtilmiştir. Yine Şekil 1.7'de (c)'de aynı çalışma bir diskin dönmediği durum için yapılmıştır.

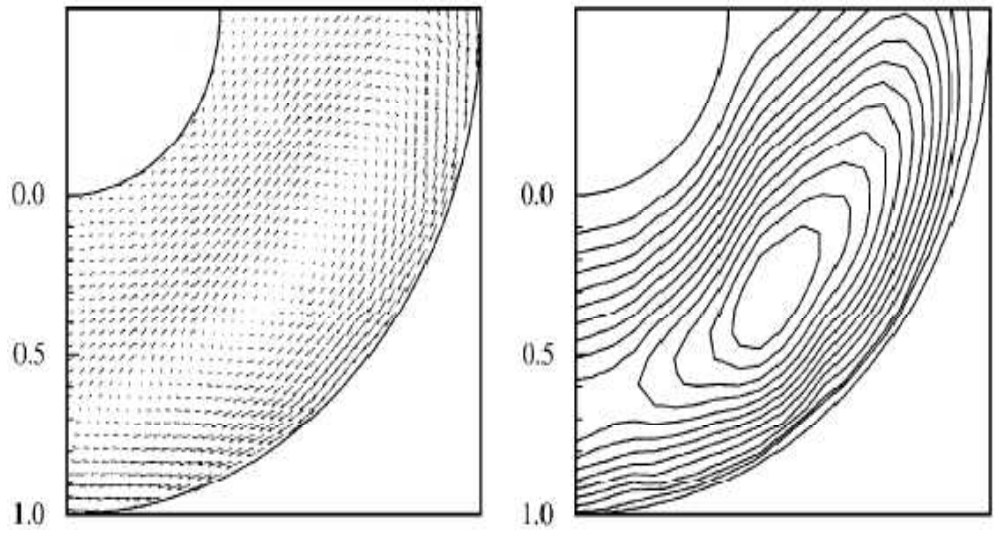
Şekil 1.8'de ise disklere kuşbakışı bakılmış ve akış profilleri incelenmiştir. Reynols sayısının büyümesi ve disk aralıklarının küçülmesi durumunda düzgün akış profillerinin türbin merkezine doğru yaklaştığı görülmektedir [8].

Y.S. Tsai ise "Silinirik bir kap içerisinde dönen iki disk arasındaki akışın partikül hız ölçeri aracılığıyla ölçülmesi" isimli makalesinde aynı yönde dönen iki disk arasındaki akışı PIV (Particle Image Velocimety) ve LDV (Laser Doppler Velocitmeter) aracılığıyla ölçmüştür. Buradan elde edilen veri ile reynolds stresleri görüntülenmiştir. Çalışma sonucunda akışkanın bölgesel rotasyonlarının momentum transferini etkilediği gözlemlenmiştir. Şekil 1.9'da Y.S. Tsai'nin deney düzeneğini görmek mümkündür [10].




**Şekil 1.9 :** Y.S. Tsai v.d. çalışması deney düzeneği [10].

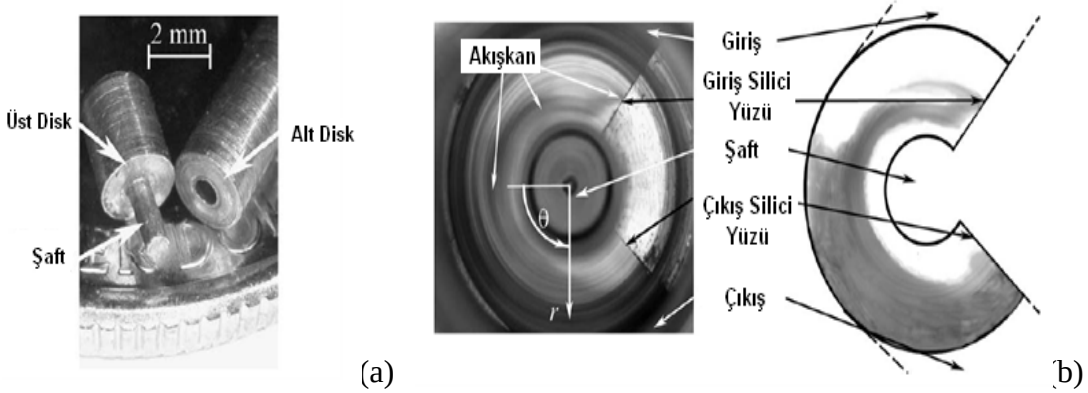
Deney düzeneğinde iki adet disk kullanılmıştır, disk yarıçapı 187.5 mm dir. Şekil 1.10'da ise diskler üzerinde oluşan ve momentum transferine etki eden vorteksler görülmektedir.




**Şekil 1.10 :** Y.S. Tsai v.d. çalışması diskler üzeri akış [10].

Bu deneme Reynolds sayısı 5.25 x $10^5$ iken yapılmışıtır. Şekil 10 (a) vektör alanını ve (b) akış profilini göstermektedir.

Danny Blanchard'ın yazmış olduğu "Tek ve çift diskli viskoz mikro pompalar" adlı makalede ise yine tesla disk pompası tasarımı yapılmış, tek ve çift diskli tesla pompaları diskleri üzerindeki merkez kaç kuvvetleri ve statik basınç değişimleri incelenmiştir. 1 ml/dakika'lık akış oranları ve 5000 rpm'lik açısal hızlarda bu deneyler yapılmıştır. Disk çapları 2.38 mm'dir ve 7 w'lık bir elektrik motoru diskleri çevirmek için kullanılmıştır. Aşağıdaki Şekil 1.11 (a)'da mikro disk pompasının bir bozuk para üzerindeki resmini görmek mümkündür. Şekil 1.11 (b)'de ise disk pompasının çalışırken ve bir akışkanı pompalar durumdaki resmi gösterilmiştir.




**Şekil 1.11 :** Danny Blanchard v.d. çalışması: (a) Mikro Tesla Pompası. (b) Türbin bileşenleri [1].

### 1.3 Nikola Tesla

10 Temmuz 1856’da Smiljana-Hırvatistan dünyaya gelmiştir. 7 Ocak 1943’de New York’da hayatını kaybetmiştir. 19. ve 20. yüzyılın en üretken mucitlerinden birisidir. Kendisine ait patent aldığı 700 buluşu vardır ve en çok patent sahibi kişi olarak tarihe geçmiştir [16].

Graz'daki Politeknik okuluna ve Prag Üniversitesi'nde eğitim almıştır. Anadili olan sırpça ve almancaya ek olarak ingilizce, fransızca ve italyanca da bilmekte idi. Budapeşte'de lisans üstü çalışması yapmıştır. Paris’te çalıştığı bir telefon şirketinde doğru akım motorları ve dinamolar konusunda geniş ve önemli tecrübeler edinmiştir.

Nikola Tesla, Graz Üniversitesi'nde de fizik ve matematik üzerine çalışmalar yapmıştır. Daha sonra Prag Üniversitesi'nde felsefe öğrenimi görmüştür. Tesla elektrik mühendisidir ve uzun süre geçimini elektrik mühendisliği ile sağlamıştır [16].

Tesla florasan lambayı, neon ışıklarını, otomobillerdeki ateşleme sistemini, radarın temellerini, elektron mikroskobunu, mikrodalga fırını, AC akım genaratörleri ve motorlarını, radyoyu bulmuştur. Bu teknolojilere MRI , laser teknolojisi, robot teknolojisi de eklenebilir.

Tesla doğru akım uygulanan motordaki komütatörü ortadan kaldırmak istemiştir. Ona göre alternatif akımı tüm sistemlerde kullanmak daha uygundu.

Tesla, alternatif akım elektrik sistemleri ile tanınır. Alternatörler, gerilim yükseltici ve alçaltıcı transformatörler ve mekanik güç sağlamak için kullanılan alternatif akım motorları teslanın tasarladığı sistemlerdendir. Tesla hidroelektrik enerji hakkında da araştırmalar yapmıştır.

Tesla’nın yaşadığı dönemde genellikle doğru akımın; ısıtma, aydınlatma, güç sağlama ve iletim en uygun olduğu sanılıyordu. Ancak doğru akımın direnç kayıpları büyüktü. Neredeyse her kilometre kare için bir güç santralına gerek duyuluyordu. Güç santralına yakın olan akkor ampüller parlak yanabiliryor ve bir kilometreden daha uzaktakiler ise gücün kaybolmasına bağlı olarak sönük yanıyorlardı.

Tesla New York‘ta yaşadığı dönemde A.K.Brown ile tanıştı. Nikola Tesla'nın alternatif akımla alakalı parlak fikirlerine inandılar ve yatırım yapmaya karar verdiler. Ortaya belirli bir miktar para koydular.

Nikola Tesla Batı Broadway'de bir deney laboratuvarı kurma imkanı buldu. Burada Tesla jeneratör, transformatörler, iletim hattı, motorlar ve ışıklar gibi tasarladığı sistemleri kurdu ve planlarını hazırladı. Cornell Üniversitesi'nden Profesörü W.A. Anthony Tesla'nın alternatif akım sistemini test etti ve Nikola Tesla'nın senkron motorunun en iyi doğru akım motoru kadar iyi olduğunu onayladı [16].

Nikola Tesla tek bir patent altında sistemini tescil ettirmek istedi ve patent bürosuna başvurdu. 1887'nin kasım ve aralığında Nikola Tesla dilekçelerini teslim etti. Daha sonra da altı ayda yedi tane A.B.D. patenti aldı. Çok fazlı sistemleri de içeren dört ayrı patent için 1888 nisan ayında patent bürosuna tekrar başvurdu. O yıl 18 patent daha aldı. Aynı zamanda Avrupa'da da patentler alıyordu.

Bu telle yapılan elektrik enerjisi iletimindeki sınırlamaların sonu idi. Tesla bu sırada New York'da AIEE'nin (Şimdiki IEEE) toplantılarında tek ve çok fazlı alternatif akım sistemleri hakkında konferanslar veriyordu.

George Westinghouse, Nikola Tesla ile tanıştı ve Tesla'nın laboratuvarına giderek alternatif akım patentleri için bir milyon dolar nakit para teklif etti ve ayrıca satış payı vereceğini söyledi. Bu Westinghouse'un yapmış olduğu başarılı bir yatırımdı. [16].

1890'da, uluslararası Niagara komisyonu Lord Kelvin öncülüğünde Niagara çağlayanının gücünü kullanarak elektrik üretmek için çalışmaya başladı. Lord Kelvin ilk olarak doğru akımın en iyi seçenek olduğunu düşünse de elektriğin 30 km uzaklıktaki Buffalo'ya iletilecek olduğunu düşününce alternatif akımda karar kıldı.

Bu iş için Westinghouse ve General Electric ile sözleşme imzalandı. Westinghouse on tane 3728 kW gücündeki hidroelektrik generatörü üretecekdi. General Electric ise iletim hattı için kontrat yaptı. Bu sistem iletim hattı, yükseltici ve alçaltıcı transformatörler düşünüldüğünde Nikola Tesla'nın fikirleriyle uyum sağlıyordu.

Bu tarihi proje o zaman heyecan yaratmışdı, çünkü o zamana kadar böyle bir proje yapılmamıştı. Herbiri 1775 amper ve dakikada 250 devir yapabilen 2250 Volt'luk on büyük alternatörden oluşan proje, 37284 kW lik bir güce sahipti. Rotor çapları 3 metre idi, 4,5 metre uzunluğunda ve 34 ton ağırlığındaydılar. Sabit parçaların herbiri 50 ton idi. İletim hattı gerilimi ise 22 kW idi. [16].

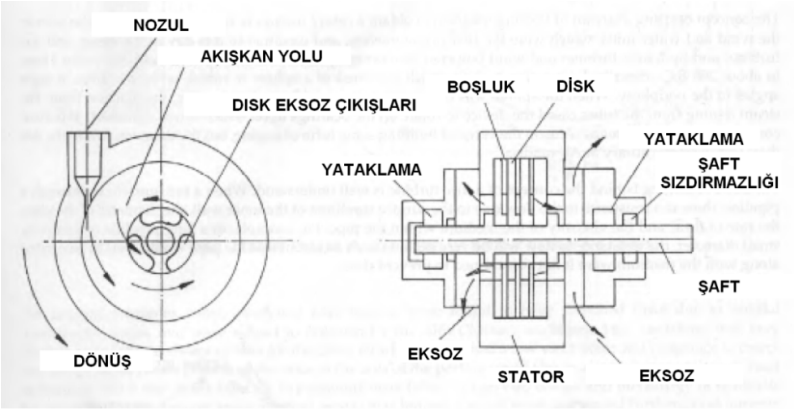
# 2. TESLA TURBİNİ

## 2.1 Tesla Türbini Gelişimi

Tesla türbini Hırvatistan doğumlu bilim adamı Nikolai Tesla tarafından 6 Mayıs 1913 yılında patentlenmiş (Amerika Birleşik Devletleri patent no: 1.061.206) bir tür türbin çeşitidir. Tesla fanı adı altında kullanılan bir pompa versiyonu da bulunmaktadır. Yan yana dizilmiş disklerden oluşan bir rotora sahiptir. Çalışma prensibi sınır tabaka prensibine dayanmaktadır. Diskler arasında oluşan viskoz tabaka, kanat etkisine benzer bir etki oluşturmaktadır. Bu nedenle kanatsız türbin diye de anılmaktadır.

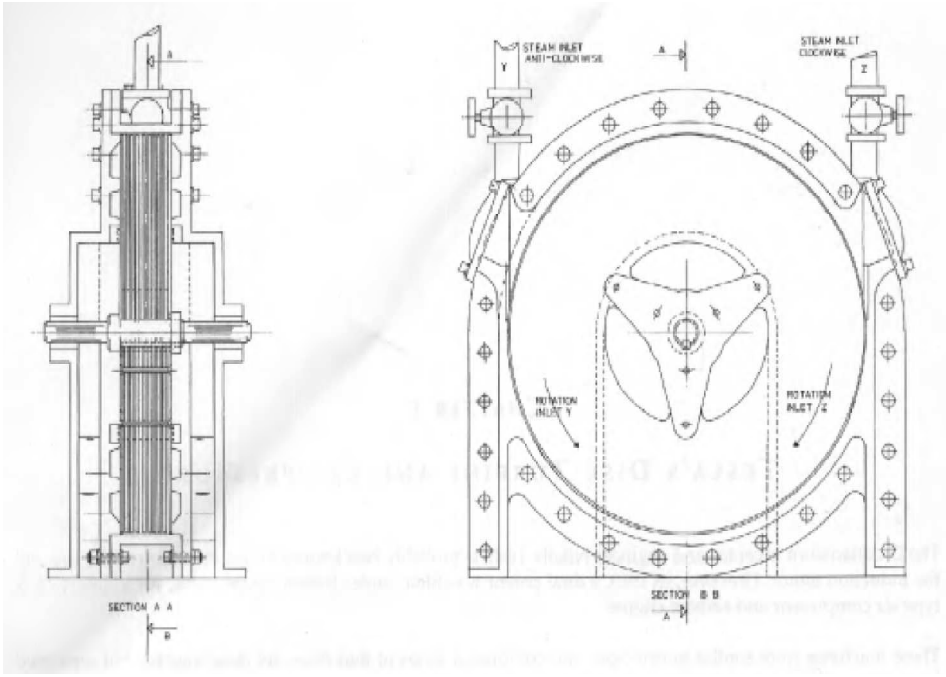
Tesla türbini rotoru momentumu olan bir akışkan ile döndürülmektedir. Bu akışkan buhar ya da basınçlandırılmış hava olabilir. Bu akışkan türbin üzerinde bulunan nozuldan geçerek diskler arasına girmektedir. Bu nozulun dizaynı türbinin verimliliğini büyük ölçüde belirlemektedir. Diskler arasından geçen akışkan daha sonra rotorun ortasında bulunan eksoz deliğinden dışarıya atılmaktadır. Rotor bir kaplin vasıtası ile jeneratöre bağlanmaktadır. Bu sayede rotorun akşıkan üzerinden kazandığı kinetik enerji, elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir.

Tesla türbini ile yapılan ilk deneyler 8 disklik 15 cm çapında disklerle yapılmış, daha sonra 45 cm çapında 149 kW gücünde prototipler üretilmiştir. Bugune kadarki en büyük tesla türbini Amerikan Allis Chalmers Şirketi tarafından üretilmiştir. Bu türbin 500 kW gücündendir [2].




**Şekil 2.1 :** Tesla türbini bileşenleri [2].

Nikolai Tesla'nın asıl amacı 18 kW lik, 170.000 rpm açışal hızı ile dönebilen bir türbin üretip bunu kullanılabilir hale getirmekti. Ancak Tesla patentinden sonra ve Allis Chalmers şirketinin ürettiği türbinden sonra bu konu ile ilgili çalışmalar azaldı. Bunun en büyük nedeni küçük ölçekli gaz türbinlerinin kullanılabilir hale gelmesi idi. Aşağıdaki resimde Tesla tarafından patentlenen disk türbinin çizimlerini görmek mümkündür.




**Şekil 2.2 :** Tesla türbini çizimleri [2].

Tesla türbininin bir diğer özelliği ise küçük hacimlerde yüksek güç elde edilmesine imkan tanımasıdır. Bu nedenle bir çok alanda kullanımı öngörülmüştür. Bunlar; hava kompresörü, uçak gaz türbini başlatıcısı, hava motoru, araç motoru vb.

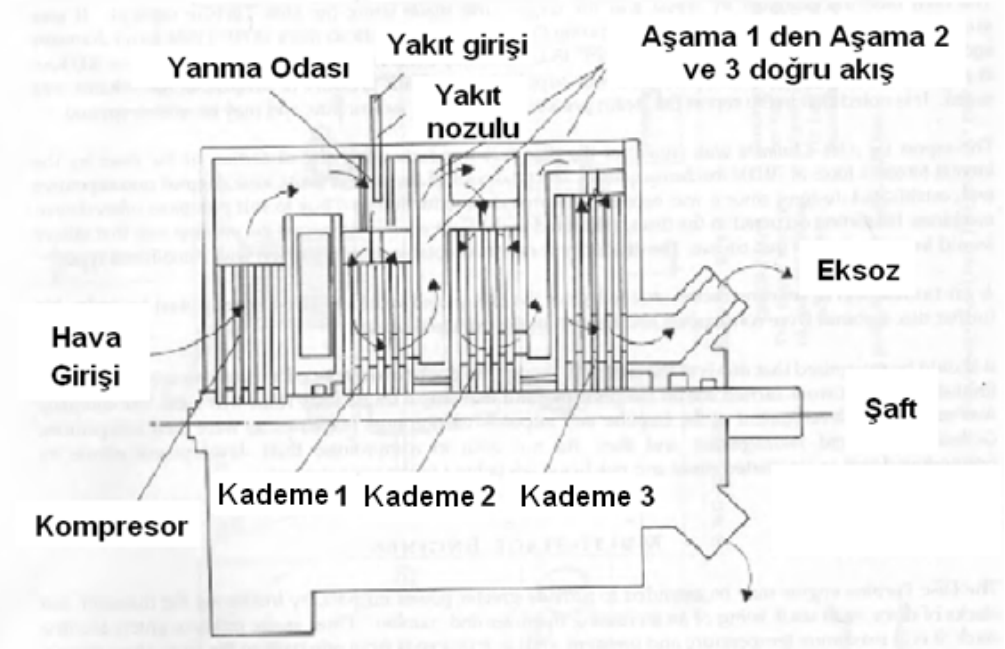
Tesla türbinini daha büyük üretmek de mümkündür. Buna Thomas Edison'un şirketinin Waterside santralinde denediği 149 kW lik türbin örnek olarak gösterilebilir. 9000 rpm ile dönebilen bu türbine 860.000 Pa basıncı ile buhar enjekte edilmiştir.

Daha önce de belirtildiği gibi Allis Chalmers şirketi bugüne kadarki en büyük tesla türbinini üretmiştir (500 kW). Bu türbine 80 psi basıncında buhar enjekte ediliyor idi. 3600 rpm açısal hızı ile döndürülüyordu. Allis Chalmers şirketinin bu türbin için yazmış olduğu rapor incelendiğinde disklerde bozulma olduğu söylenmiştir, ayrıca düşük verimlilik ve bunu neden olduğu düşük rekabet gücü de not edilmiştir [2].

Tesla'dan sonra kesintiye uğrayan bilgi transferinden sonra, bir tesla gaz türbini üretilememiştir. Allis Chalmers da rakipleri General Elektrik ve Wesinghouse'un daha verimli türbinler ile çalışması karşında, tesla türbinini daha fazla çalışmaya imkan bulamamıştır.

## 2.2 Çok Kademeli Tesla Türbinleri

Tesla türbinlerinden daha fazla verim almanın bir yolu da çok kademeli (multi-stage) türbinler üretmektir. Buna ihtiyaç duyulmasının en büyük nedeni çok diskli bir türbine giren akışkanın sıcaklık, basınç gibi parametrelerinin türbin içerisinde ilerlerken değişmesi ve düşen bu değerlerin her diskin verimini maksimize etmemesidir. Bu nedenle özelliği değişen akışkan için farklı karakteristiklere uygun aşamalar üretilmiştir. Böylece çürük buhar (basıncı düşmüş) bile en verimli şekilde kullanılabilmektedir. Ayrıca modern Kombine çevirim santrallerinde olduğu gibi tesla buhar türbinini bir gaz türbini ile senkronize çalıştırmak da verimliliği arttırabilecek bir konfigürasyondur. Şekil 2.3'de çok aşamalı içten yanmalı bir tesla türbininin çalışma prensibini görmek mümkündür [2].

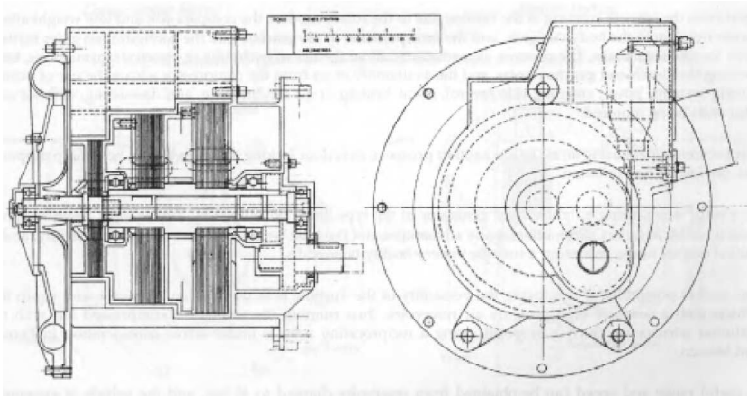



**Şekil 2.3 :** Çok kademeli tesla türbini [2].

## 2.3 Otomotiv Tesla Disk Türbini

Tesla disk türbininin en büyük özellikleri olan sabit tork, düşük titreşim seviyeleri, valf gereksinimi duymaması, yüksek güç/ağırlık oranı gibi nedenler, tesla türbinini otomotiv endüstrisi için bir alternatif haline getirmiştir. Tesla türbinlerin araştırıldığı dönemlerde bu ihtimal bazı otomotiv üreticileri tarafından incelenmiş ancak hayata geçirilememiştir.

Bunun en büyük nedeni düşük verimliliktir. Şekil 2.4'de görülen türbin bir otomobil için tasarlanmış, 30 kg ağırlığında 75 bg güç üreten bir taslak çizimdir. Tesla türbinlerinin yüksek devirle çalışması sebebi ile şaft çıkışına bir redüktör eklenmiştir [2].



**Şekil 2.4 :** Otomotiv tesla türbini [2].

Yukarıda resmi gösterilen araç tesla türbini de yakıt olarak kerosen kullanılan içten yanmalı bir modeldir. Öncelikle hava kompressör tarafından türbin içerisine çekilir daha sonra yanma odasında yakıt-hava oranı doğru bir şekilde ayarlanarak yanma gerçekleşir. Yükşek basınçlı sıcak hava disk aşamalardan geçerek eksoz dışarısına atılır. Yakıtın yanma odasına püskürtülme oranı FADEC adı verilen uçak gaz türbinlerinde de kullanılan bir kontrol sistemi tarafından ayarlanmaktadır. Bu sistem eksoz sıcaklık değerlerini, şaft hızını, yakıt tüketimini ve gaz değerlerini görüntüleyerek çalışan bir sistemdir.

Tesla otomotiv türbinin en önemli avantajlarından biri de üretim maliyeti ve zorluklarının düşük olmasıdır. Yaklaşık olarak kullanılan malzeme normal bir motoru üretmek için kullanılacak malzemenin yarısıdır.

Diğer başka bir avantaj ise bakım kolaylığıdır. Böyle bir yapıda en fazla aşınması beklenen parça yanma odasıdır. Bunun da yaklaşık ömrü 7.500 saattir. Bu rakam yüksek özellikli, korozyona dayanıklı malzemelerin kullanılması ile 20.000 saate kadar çıkarılabilir.

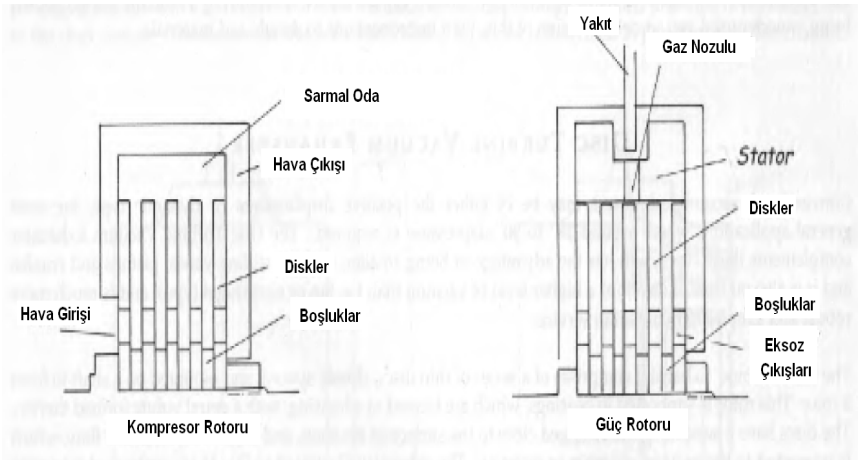
Tesla Türbini kullanılan bir araçta vites kutusu kullanımı ile de bazı avanjlar sağlamak mümkündür. Deybriyaj'a ihtiyacı olmayan hidrolik ya da elektrikli aktarma organları kullanmak mümkün olabilir. Ayrıca Tesla türbininin basınçlı hava ile çalıştığı da düşünüldüğünde, yanma odası, deybriyaj sistemi olmayan ancak basıçlı havayı depolayabilen araçlar ile araç türbinini döndürmek mümkün olabilecektir [2].

Böyle bir araç üzerinde ekstra ekipmanlar olmadığı düşünüldüğünde çok hafif olacağını tahmin etmek mühtemeldir.

### 2.4 Hava Kompresörü, Vakum Pompası ve Hava motoru olarak Tesla Türbini

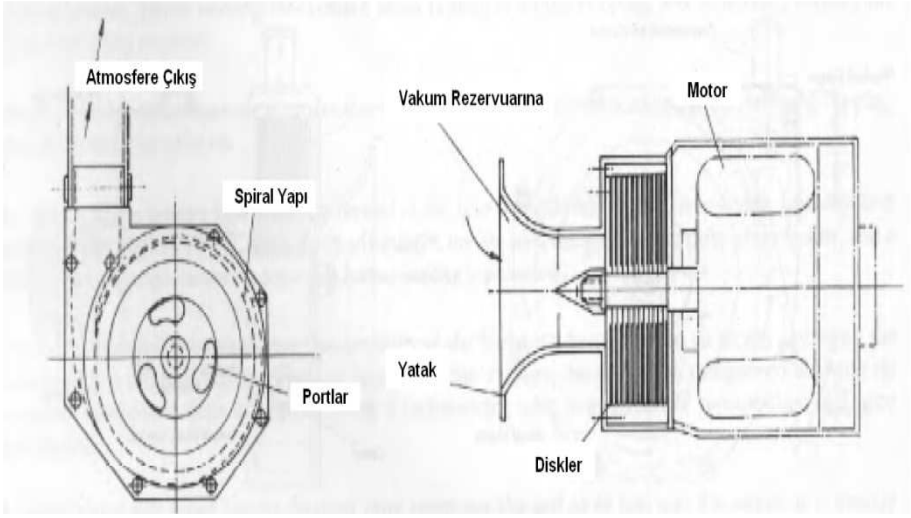
Tesla türbini hava kompresörü, vakum pompası ve hava motoru olarak da kullanılabilir. Disklerden oluşan rotorun bir elektrik motoru ile çevirildiği düşünülürse, tesla türbini tesla pompasına dönüşmüş olur.

Kompresör rotoru ile güç rotoru arasındaki fark ise güç türbininde yanma odasının mevcut olmasıdır. Şekil 2.5'de kompresör ve güç rotoru arasındaki farkı görmek mümkündür.




**Şekil 2.5 :** Tesla kompresör ve güç rotoru [2].

Vakum pompası olarak kullanılabilecek tesla türbini de diğer tesla uygulamaları gibi basitdir. Örneğin haraketli valflere, pistonlara, krank ve yağa ihityaç duymaz (shaft yağlaması kast edilmiyor). Diskler yine paralel olarak yerleştirilmiştir ve vakum rezervuarına yakın tutulmuştur. Şekil 2.6'da tesla vakum pompasının çizimini görmek mümkündür.




**Şekil 2.6 :** Tesla vakum pompası [2].

Tesla türbininin başka bir kullanım alanı da hava başlangıç motorudur. Bu genellikle uçak motorlarının başlanıgıcı esnasına ihtiyaç duyulan bir motor tipidir. Tesla hava başlangıç motoru, klasik tipteki motorların statorlarındaki vana pozisyonlama zorluğuna sahip olmadığı için torkun daha kolay uygulanabilmesine olanak sağlamaktadır [2].

## 2.5 Hafif Uçak Tesla Türbinleri

Tesla türbinlerinin uçaklarda uygulanması diğer uygulamalara kıyasla daha zordur. Uçaklarda bu türbinlerin atalet kuvvetleri ve bazı geometrik limitasyonlar, yüksek özellikli malzemelere ihtiyaç duyulmasına neden olmuştur. Bu tip motorlarda optimum performansı yakalamak için kompresor ve türbin aşamaları için ayrı şaftlar kullanılabilmektedir. Ayrıca disk tipli kompresor yerine, klasik tipli kanatlı bir kompresor kullanmak da mümkündür. Böylece disk türbin aşamasına daha yüksek debilerde hava enjekte edilebilir ve sonuçta uçağın ihtiyaç duyduğu pervane hızlarına ulaşılabilir. Sekil A.7'de iki aşamalı bir hafif uçak tesla türbininin çizimi gösterilmektedir. Bu aşamalar yüksek basınç ve orta dereceli basınç odaları ya da rotorlarıdır.

Bu iki aşama öncesinde disk türbin şeklinde tasarlanmış kompresor bulunmaktadır. 44 kW gücündedir ve çıkış şaft açışal hızı 15.000 rpm'e kadar çıkabilmektedir. İki şaftdan oluşan bu sistemdeki kompresor şaftı açısal hızı 22.000 rpm'e kadar çıkabilmektedir. Bu iki şaft sistem için tasarlanmış vites kutusunda birleşmektedir [2].

## 2.6 Çift Yönlü Çalışabilme Özelliği

Tesla türbinlerinin bir diğer özelliği ise çift yönlü çalışabilmeleridir. Bu nozulun disklerle olan açışını değiştirmekle mümkün olabilir, ayrıca bir vites kutusuna yada dişli sistemine ihtiyaç duyulmaz. Böyle bir sistemin avantajı en fazla buhar lokomotiflerinde görülebilir. Buhar lokomotiflerinde ileriye doğru gidebilmek için bir büyük türbin, geriye doğru gidebilmek için ise küçük başka bir türbin bulunmaktadır. Tesla buhar türbini kullanılması ile bu ekstra ağırlık ve sistem karmaşıklığından kaçınılabilir [2].

Enerji üretimi için kullanılcak tesla türbinlerinde ise bu özelliğe çok fazla ihtiyaç yoktur. Genellikle dönme yönü tek bir yön olarak şeçildiğinden ve turbin yatağı ve nozul tasarımı buna göre yapıldığından çift taralı çalıştırma özelliği kullanılmamaktadır.

## 2.7 Türbin Çeşitleri, Bileşenleri ve Tesla Türbinindeki Farklılıklar

### 2.7.1 Türbin çeşitleri

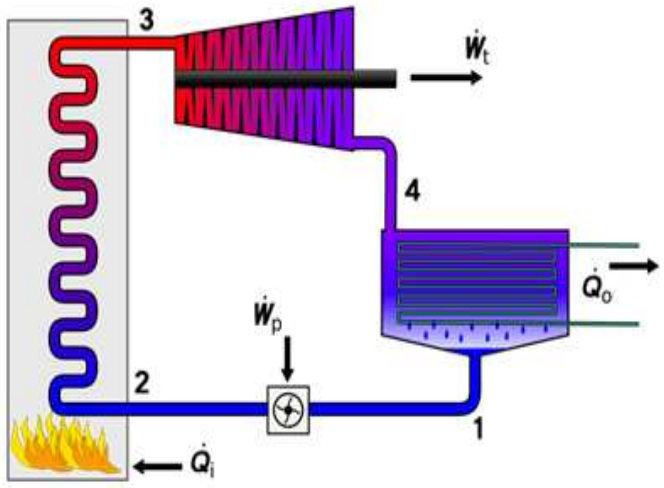
Türbinler potansiyel yada kinetik enerji taşıyan, sıkıştırılabilir yada şıkıştırılamaz akışkanların taşıdıkları enerjiyi, kullanılabilir başka bir enerji formuna dönüştürmeye yarayan mekanik sistemlerdir.

Çalışma prensibi olarak türbinleri etki (impulse) ve tepki (reaction) olarak ikiye ayırmak mümkündür. Etki türbinleri akışkanın yönünü değiştirirler ve türbin rotoru üzerine aktardıkları etkide türbini çevirmektedir. Tepki türbinlerinde türbin akışkanın basıncına ya da ağırlığına tepki oluşturur ve bu esnada tork üretir.

#### 2.7.1.1 Buhar türbinleri

Buhar Türbinleri kömür, doğalgaz çevirim, nükleer santral gibi termal güç santrallerinde kullanılan ekipmanlardır.

Isıl enerjisi yüksek yani yüksek sıcaklık ve basınca sahip bir akışkanın ısıl enerjisini mekanik enerjiye çevirirler. Akışkan olarak su buharı kullanılmaktadır, elde edilen mekanik enerji genellikle, bir jeneratör yardımıyla elektrik enerjisine çevrilir. Rankine çevrimi prensibi ile çalışırlar. Şekil 2.7'de $\dot{w}_t$ türbin gücünü, $\dot{w}_p$ pompa gücünü, $\dot{Q}_i$ kazan gücünü $\dot{Q}_o$ konderser de dışarıya verilen gücü ifade eder [3].




**Şekil 2.7 :** Rankine çevirimi.

### 2.7.1.2 Gaz türbinleri

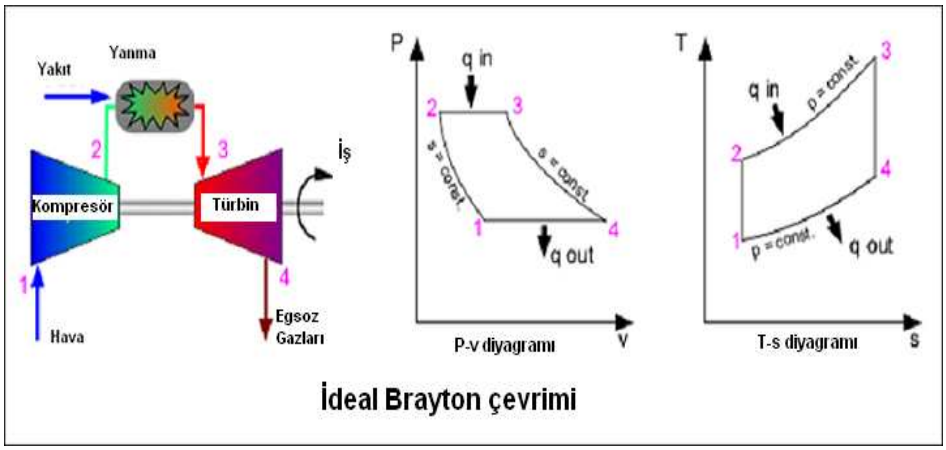
Yanma ile açığa çıkan ısı enejisini mekanik enerjiye çevirmeye yarayan bir ekipmandır. 3 bölümden oluşur, kompresör, yanma odası ve türbin.

Kompresör tarafından türbine giren havanın basıncı arttırılır ve yanma odasına gönderilir. Yanma gerçekleşir ve sonucunda yüksek basınç ve sıcaklığa erişen hava türbin kanatlarına çarparak türbini döndürür.

Uçak motoru olarak kullanılan gaz türbinlerinde uçak için gereken itme etkisini oluşturumak için türbin yalnızca kompresörü çalıştıracak kadar enerji üretir ve yüksek enerjili hava türbinden hızla ve yüksek basınçla dışarıya atılır ve uçağın hareket etmesini sağlar. Başka uygulamalarda şaftı çevirmek için üretilen enerji elektrik üretmek için de kullanılır.

Bu tip gaz türbinlerinde çok sayıda türbin kanadı vardır ve türbine aktarılan kinetik enerji kompresörü çalıştırmaya yeterli enerjiden çok daha fazladır. Türbinin şaftı döndürmesi ile elektrik enerjisi üretilir. Uçak motorları güç/ağırlık ve güç/hacim oranları yüksek olduğu için verimlilikleri düşük olmasına rağmen tercih edilirler.

Gaz türbinleri için yakıtın önemi, düşük sıcaklıklarda akışkanlıklarını kaybetmemeleri ile ilgilidir. Önemli olan yanma odasında yüksek basınçlı havayı sağlayabilmektir. Şekil 2.8'de Brayton çevirimi grafiklerini görmek mümkündür.




**Şekil 2.8 :** Brayton çevirimi.

Bu nedenle uçak yakıtı olarak kerosen kullanılır, kerosen düşük sıcaklıklarda akışkanlığını korur. Tekrar ısıtma (reheat), eşanjör kullanma (heat exchanger) vb. yöntemler gas türbini verimini arttırmak için kullanılabilir. Ayrıca havadan daha iyi termodinamik özellikleri olan bazı gazlar türbinleri çevirmek için kullanılabilirler. Gaz türbini Bryton çevirimi prensibine dayanarak çalışır [3].

### 2.7.1.3 Transonik türbinler

Genellikle türbinler içerisinde akan akışkanlar ses altı hızlarda hareket ederler. Transonik türbinlerin farkı, içerisindeki akışkanın ses üstü hızlara çıkabilmesidir. Transonik türbinler yüksek sıkıştırma oranlarında çalışırlar.

### 2.7.1.4 Ljungström türbini

1894'de İsveçli mühendis Fredrik Ljungström ve kardeşi Birger Ljungström tarafından patentlenmiş bir çeşit çok aşamalı radyal buhar türbinidir. Buharlı tren ve gemilerde kullanılmıştır.

Genel olarak Parsons ve Laval türbinlerinden verimleri düşüktür.

### 2.7.1.5 Seramik kanatlı türbin

Geleneksel türbin kanatları nikel, titanyum bazlı malzemeler kullanılarak üretilmektedir.

Bu tip bir yapıdaki limit, akışkan gazın sıcaklığı ile ilgilidir. Daha yüksek sıcaklıklarda türbinleri daha verimli çalıştırmak mümkün olabilecek iken metalik bazlı türbin kanatları bunu limitleyebilir. Seramik kanatlar bu soruna çözüm olabilecek bir yaklaşımdır. Ancak seramik metal bazlı malzemelere göre kırılgandır ve bu ciddi kazalara yol açabilir. Bu konu ile ilgili araştırmalar halen devam etmektedir.

#### 2.7.1.6 Kanatsız türbin

Bu tezin de konusu olan sınır tabaka teorisi ile ilişkili çalışan türbin tipidir, yüksek açısal hızlarda çalışır.

#### 2.7.1.7 Pelton türbini

Pelton türbini yüksek düşü koşullarında düşük debi kapasitesi basınçlarında yöntemi ile yüksek verimde enerji üretimi için tercih edilir. Pelton turbini, kanat tasarımının verim üzerindeki etkisi büyüktür. Genellikle döküm halinden işlenip mamul hale getirilir. Verimin arttırılabilmesi için; yatay akslı tasarımlarda 1 ila 3 nozul dikey akslılarda 3 ila 6 nozul uygulamaları olabilir.

#### 2.7.1.8 Francis türbini

Francis türbini bir tip tepki türbinidir. Suyun basıncı, türbin boyunca ilerlerken değişir ve enerjisi kanatlara aktarılır. Su akışını kontrol altına alabilmek için bir türbin mahfazası kullanılır. Yüksek basınçlı su girişi ile düşük basınçlı su çıkışı arasına yerleştirilen Francis türbinleri genellikle barajların temellerine yakın yerlerine kurulur [6].

Sarmal şeklinde bir girişi vardır. Kanatlar suyu türbin çarkına teğetsel olarak yönlendiririr, bunun nedeni klavuz biçiminde kanatların varlığıdır. Radyal akış tesiri ise çark kanatlarında oluşur. Bu etki çarkın dönmesine neden olur. Verimli bir çalıştırma için ayarlanabilir yapıya sahip klavuz kanatlar kullanılır.

Dönme yarıçapı, su türbin çarkına doğru ilerlerken azalır. Bu özellik suyun basıncına ek olarak türbinin verimli çalışmasına tesir eder.

#### 2.7.1.9 Kaplan türbini

Kaplan türbini düşük düşü ve yüksek debiler için uygundur. Kaplan türbininin dönmesi pelton türbininde olduğu gibi itme kuvvetinden değil, suyun rotor

çıkışındaki tepki kuvvetine bağlı olarak oluşur. Bu kuvvetler çıkış esnasında suyun momentumunun sebep olduğu ivmelenmeye bağlıdır.

#### 2.7.1.10 Rüzgar türbinleri

Temel olarak rüzgar türbinlerini yatay eksenli ve dikey eksenli olarak ikiye ayırmak mümkündür. Bu ayırım türbin şaftının rüzgar doğrultusuna dik yada paralel olması ile alakalıdır. Yatay eksenli türbinleri kendi içerisinde tek, çift, üç ve çok kanatlı türbinler olarak ayırmak mümkündür. Dikey eksenli türbinler ise savonius ve darrierus olarak ayırmak mümkündür. Savonius rüzgar türbini, 1925 yılında Finlandiya'lı mühendis Sigurd J. Savonius tarafından geliştirilmiştir. İki yatay disk arasına yerleştirilmiş "kanat" adı verilen iki yarım silindirden meydana gelmiştir. Bu diskler birbirlerine simetrik olarak kaydırılmıştır. Şekil 2.9' da kanat çeşitlerine göre türbinlerin karşılaştırması verilmiştir.

**Çizelge 2.1 :** Rüzgar türbini çeşitleri [12].

| | Tek Kanatlı (Yert) | İki Kanatlı (Yert) | Üç Kanatlı (Yert) | Çok Kanatlı (Yert) | Savonius (Dert) | Darrierus (Dert) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Maliyet | Yüksek | Yüksek | Düşük | Düşük | Düşük | Yüksek |
| Estetik Görünüm | Kötü | Kötü | İyi | İyi | İyi | Kötü |
| Gürültü | Yüksek | Yüksek | Düşük | Az | Az | Yüksek |
| Çalışma Hızı | Yüksek | Düşük | Yüksek | Düşük | Düşük | Yüksek |
| Kule İhtiyacı | Var | Var | Var | Var | Yok | Var |
| Kullanım Amacı | Elektrik | Elektrik | Elektrik | Elektrik & Su Pompalama | Elektrik & Su Pompalama | Elektrik & Su Pompalama |
| Günümüzde Kullanımı | Yok | Yok | Var | Var | Az | Az |
| Rotorun Dönmesi için Rüzgarı | Kaldırır | Kaldırır | Kaldırır | Kaldırır & Sürükler | Kaldırır & Sürükler | Kaldırır & Sürükler |

### 2.7.2 Türbin bileşenleri ve tesla türbinindeki farklılıklar

#### 2.7.2.1 Rotor

Rotor bir türbin yada pompanın kanat yada disklerden oluşan ve bir şafta bağlı olarak dönen kısmına verilen isimdir. Buhar yada gaz türbinlerinde rotor üzerine kanat bileşenleri mevcuttur, ancak tesla türbininin en büyük farkı üzerinde kanatlar bulunmaması bunun yerine diskler bulunmasıdır. Şekil 2.10'da bir gaz türbinine ait rotoru görmek mümkündür.



**Şekil 2.9 :** Gaz türbini ve tesla türbini rotoru [13].

Temel olarak gaz veya buhar türbinlerinde basınçlı akışkan turbin içerisinde şaft doğrultusunda ilerler, ancak tesla turbininde akışkan yönü ve şaft ekseni birbirine paraleldir.

Modern kanatlı türbinlerde rotor; kompresor, yüksek basınç ve düşük basınç aşamalarından oluşur. Çok kademeli tesla türbininde de buna benzer bir yapı vardır, ancak en büyük farklılık tesla türbininde bu kademeler farklı şaftlara bağlı olarak ve bir vites kutusu yardımı ile birleştirilebilmektedir. Gaz veya Buhar türbini roturu tek bir shaft üzerine bağlıdır.

#### 2.7.2.2 Stator

Stator türbin veya pompa rotorunun döndüğü sabit yapıya verilen addır. Gelişmiş buhar yada gaz türbinlerinde stator üzerinde bazı yardımcı üniteler görmek mümkündür.

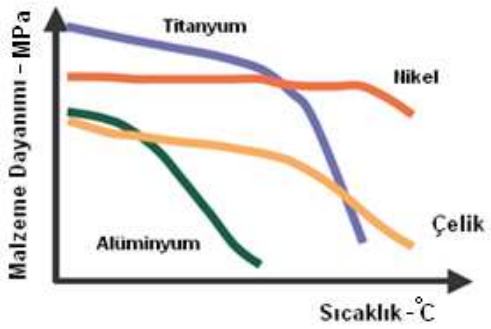
Bunlar yağlama, sızdırmazlık ve veri toplama ile alakalı olabilir. Hatta stator iç yüzeyinde akışı düzenlemek için kanatçıklar monte edilmiş türbin tipleri mevcuttur.

Tesla türbini statoru ise gelişmiş türbin tiplerine göre daha basit bir yapıya sahiptir. Bu yapı nozulların türbine nasıl yerleştirileceğine göre değişiklik gösterebilir. Örneğin bu teze konu olan ve nihai olarak üretilen tesla türbin prototipindeki stator (türbin yatağı) iki adet nozul giriş yuvasına sahiptir. Türbin tasarım kısmında da açıklanacağı üzere bu girişlerin türbin içerisinde türbülans yaratmayacak şekilde statora entegre olmaları önem arz etmektedir. Bugüne kadar yapılmış tesla türbin stator tasarımları ise silindirik bir malzemeden yaratıldıkları için daha kolay üretilebilir ancak nozul implementasyonu daha zordur.

### 2.7.2.3 Kanat ve diskler

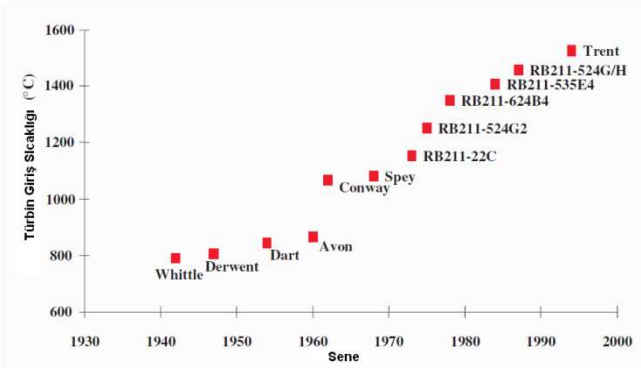
Geleneksel buhar ve gaz türbinlerinde kanat türbin verimini belirleyen en önemli parçadır. Bir gaz türbini kanadında bugünlerde aşılmaya çalışılan en büyük teknik zorluk 1500 ˚C'lere dayanabilecek türbin kanat malzemesi bulabilmektir. Gaz türbinlerindeki bir başka zorluk ise türbinin farklı noktalarında farklı sıcaklıklarda çalışılmasıdır. Örneğin, kompresör yada fan girişindeki sıcaklık uçağın bulunduğu yükseltiye bağlı olarak değişir.

Fan kanatlarına etki eden sıcaklığı -50 ˚C olarak kabul edersek, türbin kanatlarına 1000 ˚C ve üzerinde bir sıcaklıkta akışkan temas ettiği de düşünüldüğünde, yüksek özellikli malzemeler kullanmak kaçınılmaz hale gelmiştir. Şekil 2.11'de malzeme dayanımının sıcaklığa bağlı grafiğini görmek mümkündür.



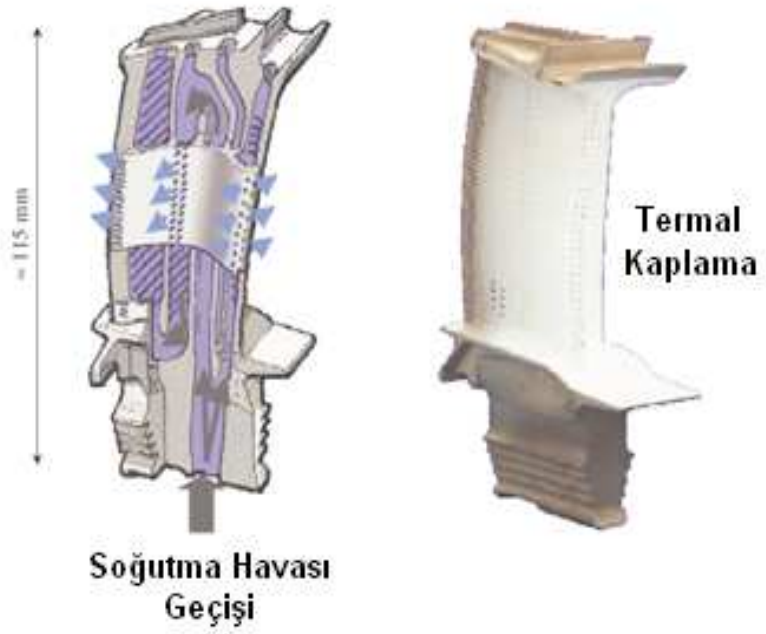

**Şekil 2.10 :** Kanat malzeme dayanımları [9].

Ayrıca bu kanatların 3000 rpm gibi açısal hızlarda döndüğü de düşünüldüğünde, kanatlar üzerindeki stress yoğunluğunun da çok fazla olduğu söylenebilir. Şekil 2.12'de türbin giriş sıcaklıklarının senelere bağlı olarak değişimi verilmiştir.




**Şekil 2.11 :** Türbin sıcaklık dayanımı gelişimi [9].

Ayrıca yine turbin kanadı üzerindeki sıcaklığı düşürebilmek için çeşitli geometrilerde soğutma kanalları ve lazer ile açılmış bazı soğutma kanalları da kanat geometrisine eklenmiştir. Buna ek olarak kanat yüzeyini soğuk tutmaya yarayacak bazı kaplama malzemeleri de uygulanmıştır.




**Şekil 2.12 :** Gaz türbini kanat yapısı [9].

Tesla türbini disklerinde ise gaz türbinine benzer bir gelişme örneğine rastlanmamıştır. Tesla diskleri de gas türbini kanatlarına benzer atalet kuvvetlerine maruz kalmış ve bazı başarısız denemelerden sonra gelişim ticari sebeplerden dolayı durmuştur. Örneğin tesla buhar türbininde yaşanan atalet kuvvetlerine bağlı sorunları çözmek için farklı malzemelerden yapılmış diskler kullanılmış ancak 1900'lerin başındaki malzeme teknolojisindeki eksiklikler nedeni ile sonuç alınamamıştır.

Bu teze konu olan prototip tesla türbininde harddisk diskleri kullanılmıştır. Bu diskler alüminyumdan yapılmış olup üzerleri seramik bazlı bir malzeme ile kaplanmıştır. Bu disklerin kırılgan olduğu anlamına gelir. Ancak bu diskleri kullanmanın en büyük avantajı hafif olmaları nedeni ile düşük atalet kuvvetlerine sahip olmalarıdır. Diğer başka bir avantaj ise yüzeylerin pürüzsüz olmasıdır. Üretilen prototipin basınçlı hava ile çalıştırılacağı öngörülmüştür, bu nedenle disklerin alüminyum olması buharla çalıştırma koşullarına uygun değildir (Yüksek sıcaklıktaki buhar). Ayrıca düşük sıcaklıklarda da kırılganlıkla ilgili sounlar yaşanması da muhtemleldir. Bunun nedeni disklerin seramik bazlı bir malzeme ile kaplı olmasıdır.

Günümüzdeki gaz türbinlerinde bir diğer yapılan test ise kanat kopma testidir. Bir gaz türbini tasarlandığında fan kanadına bağlı bir patlayıcı ateşlenerek, böyle bir durumda türbine verilecek zarar öngörülmeye çalışılır. Benzer bir disk kopma-kırılma testi de tesla türbininin ileri geliştirme safhalarında uygulanabilir.

Böylelikle en kötü seneryolardan birinde türbinin nasıl davranacağı, çevreye ne düzeyde zarar verip vermeyeceği önceden tahmin edilebilir. Son 10 sene içeriside üretilen Tesla türbinlerinde disk malzemesi olarak paslanmaz çelik kullanıldığı da görülmüştür. Paslanmaz çelik kullanımın buharla yapılacak denemeler için uygun olduğu düşünülmüştür. Ancak çeliğin yoğunlu yüksektir ve bu da atalet kuvvetlerini artırıcı bir etkiye sebep olur.

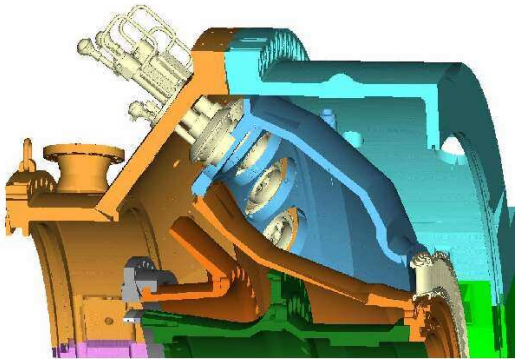
#### 2.7.2.4 Yanma odası

Gaz türbinlerinde yanma odası türbinin önemli bir kısmını teşkil eder. Yüksek başınçlı havanın kinetik enerjisi burada arttırılır. Tesla türbinlerininde yanma odalı olan tipleri tasarlanmış ancak yaygınlaşamamıştır.

Teze konu olan prototip tesla türbini malzeme özelliği arttırılırsa buhar ile çalıştırılabilir. Yanma odası mevcut olan çok aşamalı bir tesla türbini üretmek de mümkündür.

Şekil 2.13'de bir gaz türbinine ait yanma odasının şeklini görmek mümkündür. Gaz türbinlerinin tesla türbinlerine göre bir diğer avantajı ise şaftın akış yönüne paralel olması sebebi ile yanma odalarının türbin çevresine homojen olarak dağıtılabilmeleridir.

Tesla türbininde ise bu homojen durumu sağlamak daha zordur.



**Şekil 2.13 :** Gaz türbini yanma odası [15].

#### 2.7.2.5 Nozul

Nozul bir gaz yada tesla türbininin performansını belirleyen en kritik ekipmandır. Gaz türbinlerinde yanma verimliliğini nozul geometrisi belirler. Yanma odalarında yakılacak gazın ne şekilde pulvarize olacağı nozulun yapısına bağlıdır. Eğer gaz türbinlerinde nozul doğru şekilde dizayn edilmemiş ise yanma tam gerçekleşmez ve ciddi verim kayıplarına yol açar.

Tesla türbini nozulu da türbin verimi için kritiktir, eğer nozuldan çıkan basınçlı hava yada buhar rotorla doğru şekilde buluşmaz ise verimlilik kayıpları gerçekleşir. Klasik tesla türbinlerinde nozula gelen basıçlı akışkan nozul içerisinde 90 derecelik dönüşler yapmaktadır. Bu durum türbulasa yol açar ve yine türbin performansını düşürür.

Tesla türbin nozulundaki en büyük zorluk nozul üzerinde çok ince delikler açmaktır. Bu deliklerin çapı küçüldükçe ve diskler arasına püskürtme yapılıyor ise türbin verimini yükseltmenin mümkün olabileceği söylenebilir.

#### 2.7.2.6 Şaft

Şaft gaz, buhar yada tesla türbini için de çok kritik olmayan bir bileşendir. Gas ve buhar türbinleri üzerindeki kompresor ve türbin kanatları tek bir şaft üzerine oturtturulmuş iken bu durum çok aşamalı tesla türbinlerinde farklılık gösterebilir. Tesla türbinlerinde Birden fazla şaft kullanılabilir. Bu şaftlar daha sonra bir vites kutusu yardımıyla birleştirilebilir.

Tesla türbinlerinde şaft ve eksoz arasında da bir ilişki olduğu söylenebilir. Bu durum diskler arasından geçen havanın tahliyesi ile ilgilidir.

Temel olarak tesla türbininde iki tip şaft tasarımı olduğunu söylemek mümkündür. Bunlardan bir tanesi direkt olarak disklerin ortasından geçen şaft tipidir. Diğer bir tip ise şaftın disklerin ortasndan geçmediği vidalar yardımı ile disklerin üzerine monte edildiği bir alternatifdir. Vida kullanılan alternatifte disklerin ortası da eksoz olarak kullanılacağından, çürük buhar yada basıncı düşük havanın tahliyesinde ciddi bir avantaj sağlayacağı söylenebilir.

#### 2.7.2.7 Eksoz

Eksoz Tesla ve buhar türbinlerine kıyasla gas türbini için daha önemli bir ekipmandır. Bunun nedeni 500-550 ˚C lere çıkan eksoz sıcaklıkları atık ısı kazanlarında değerlendirilerek kojenerasyon sistemleri oluşturmanın mümkün olmasıdır. Tesla türbininde de böyle bir imkan vardır. Ancak öncelikle çok aşamalı tesla türbinleri geliştirilmelidir. Böylece türbin içerisinde karakteristiği değişen akışkanın potansiyelinden maksimum düzeyde faydalanmak mümkün olabilecektir.

Tesla türbininde eksoz genellikle ana gövdeye bağlanmış kapak üzerinde açılır. Çürük buhar yada kinetik enerjisi azalmış akışkanın tahliyesi türbinden eksoz vasıtası ile gerçekleşir, dolayısıyla eksoz türbin performansı için önemli bir kriterdir.

# 3. BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIM (CAD)

Tasarımın çeşitli aşamalarında çizimler kullanılır. Tasarım detaylarını belirleyen ve imalatla tasarım arasındaki ilişkiyi sağlayan çizimlerdir. Teknik resim çizim mantığı, cetvel, çizim tahtası gibi çizim aygıtlarının kullanımıyla ve teknik resim prensiplerine bağlıdır. Tasarımda fikrin çizgilere dönüşmesi gerekmekte ve detaylandırma yapılması gerekmektedir. İmalatla olan iletişimin tasarımcı tarafından kurulması gerekmektedir. Bunun için üretilecek ekipman yada malzemenin çalışma koşulları ve çalışma mantığı ile ilgili tasarımcının bir ön bilgi birikimine ihtiyacı vardır. Özellikle daha önce yapılmış tasarım çalışmalarının iyi irdelenmesi eksik ve avantajlı noktalarının en iyi şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Böylece bazı kısımlarının değiştirilmesi gerektiğinde çok fazla zaman kaybetmeden çizimlerin ve detayların yeniden oluşturulması mümkün olur. Yeni fikir üretme dinamizminin alt düzeye inmemesi için bu zaman kaybını mümkün olduğu kadar azaltmak gerekmektedir. Bu nedenle üç boylu tasarıma ihtiyaç duyulmuştur. Klasik iki boyutlu yöntem hem işin verimliliğini düşürmekte hem de kolay değiştirilebilirliğini azaltmaktadır.

CAD mantığı klasik mantığın olumsuzluklarını gidermek için geliştirilmiştir. Bu çizim mantığında klasik çizim araçları yerini bir cismi iki veya üç boyutlu görüntüleyecek bilgisayar yazılımları almıştır. Bu terimleri CAD (computer aided design and drafting: bilgisayar destekli tasarım ve çizim) olarak özetlemek mümkündür. CAD mantığı ile klasik mantık arasındaki ortaklık teknik resim prensipleridir. CAD çizim mantığı üç temel gruba ayrılabilir.

## 3.1 İki Boyutlu Çizim Sistemi

CAD çizim sistemlerinin temelini iki boyutlu çizim modülleri oluşturur. Bu modülü eski elle, cetvelle, cizim tahtasında yapılan çalışmaların bilgisayar versiyonu gibi düşünmek mümkündür. Birçok uygulamada tasarımın iki boyutlu yapılması yeterlidir. Bu sistemlerin klasik araçlarla yapılan çizimlere göre birçok avantajı vardır. Bunlar; kopyalama, otomatik boyutlandırma, elemanların tekrarı, standart makine elemanlarının çizimlerinden oluşan hazır çizim kütüphanelerinden

yararlanma olarak sıralanabilir. Bu sistemin sağladığı en büyük kolaylık çizimlerde kolaylıkla ve hızlı bir şekilde değişiklik yapılabilmesidir. Cismin iki boyutlu görüntülenmesinde yardımcı çizgiler üzerinde değişiklik yapmak ve bir görüntüden diğerine geçilmesi klasik çizim tekniklerine göre oldukça kolaydır.

## 3.2 Üç Boyutlu Modelleme

CAD çizim sistemlerinin sağladığı en büyük kolaylık ve avantaj üç boyutlu görüntüleme imkanıdır. Bu sistem üç boyutlu cisimlerin iki boyutlu ekranda incelenebilmesi için geliştirilmiştir. Üç boyutlu modelleme cismin iki boyutlu çizimlerini kullanarak veya önceden oluşturulmuş geometrik model elemanlarını birleştirilmesi ile oluşturulur. CAD/CAM programlarının içerlerinde barındırdıkları bir çok özellik vardır ve bulardan faydalanmanın ilk basamağı üç boyutlu modellemedir. En büyük avantajı iki boyutlu sistemlerde görülemeyecek gerçeğe yakın görüntülerinin üç boyutlu sistemler tarafından oluşturulmasıdır. Böyle bir sistemin avantajı çizim sırasında fark edilemeyen hataların imalata geçmeden önüne geçilmesidir. Ayrıca maliyetli bir olabilecek bir tasarım yenileme prosesinin önlenmesi mümkün olur. Üç boyutlu (3D) sistemlerde tasarımdan imalata geçiş de kısa zaman alır ve mühtemel hatalarının önüne geçildiği maliyetleri düşürücü etkisi vardır. Üç boyutlu sistemlerde modelleme için üç yöntem sıralanabilir;

a. Tel çerçeve modeli (Wire frame)

b. Yüzey modelleme (Surface model)

c. Katı modelleme (Solid modelling)

### 3.2.1 Tel çerçeve yöntemi

Yüzey kenar çizgilerinin kullanılmasıyla tel çerçeve yöntemi ile modelleme yapılabilir. Bu metodun bu şekilde adlandırılmasının nedeni tel çerçeveye benzemesidir. Çelik konstrüksiyon modellerini bu şekilde görüntülemenin daha uygun olduğu söylenebilir. Tel çerçeve yöntemi birçok mühendislik uygulaması için uygun olan ve en basit modelleme yöntemlerinden birisidir. Bu nedenler çok tercih edilir. Bilgisayar kullanılarak yapılan modellemelerde hafıza ve işlem zamanı da gözetilmelidir. Tel çerçeve yönteminin bu bakımdan da faydalı olduğu söylenebilir. Yüzeylerde oluşabilecek süreksizliklerin belirtilmesinde de yardımcı olur. Karmaşık

yapıya sahip modellerde şeklin anlaşılması zorlaşabilir, daha ziyade basit çizimler için kullanılır. Tel çerçeve modelleme uzayda noktalar ve çizgilerin tanımlanması ile oluşturulur.

### 3.2.2 Yüzey metodu

Tel çerçeve yöntemi kullanımında daha önce de bahsedildiği gibi karmaşık modellerde bazı zorluklar yaşanabilir. Yüzey Metodu bu dezavantajları gidermek üzere geliştirilmiştir. Cismin dış görüntüsünün açıkça tanımlanması ve ayrıca NC kodu üretilirken bazı avantajlara sahiptir. Bu metodta yüzeyler modeli oluşturur ve kullanıcı tarafından belirtilen çizgiler esas alınır. Görüntüleme yapısı tel çerçeve yönteminine benzerlik gösterir. Yöntemin esası çeşitli şekildeki yüzeylerin dijital formda bilgi bloklarına aktarılmasından ibarettir. Bu şekilde NC parça programı ile CAD arasında gerekli olan bağlantıda sağlanmış olur. Kesicinin hareketleri tanımlanan yüzey üzerinde kolaylıkla canlandırılabilir. Modelin tanımlanmasındaki eksiklik bu yöntemin zayıf noktalarından birisidir. Her yüzey birbirinden ayrı tanımlanmıştır bu nedenle yüzeyler arası kopukluk, uyumsuzluk olabilir. Yüzeylerin tüm cismi tam olarak kapladığına dikkat edilmelidir. Ayrıca hacim oluşturduğuna bu yüzeylerin birbirlerini kesmemeleri gerekmektedir.

### 3.2.3 Katı modelleme

Katı modelleme tekniği gerçek anlamda cismin iç ve dış geometrisinin tanımının yapıldığı en üst modelleme metodudur. Tel çerçeve ve yüzey modelleme yöntemlerinin üzerlerine kurulmuş ve bu metodların dezavantajları giderilmiştir. Katı modellemenin en büyük özelliği görüntünün ötesinde cismin iç ve dış geometrisinin bilgi kütüğü şeklinde bilgisayara aktarılmış olmasıdır. Modelin geometrik bilgileri haricinde hacim, moment, ağırlık gibi fiziksel özellikleri hakkında bilgi bu modüllerde depolanır. Ayrıca kesitler alınarak cismin iç geometrik formu hakkında bilgi sahibi olunabilir. Cisimlerin yüzeylerindeki renkler, ışık yoğunluğu, geçirgenlik ve gölgeleme katı modelleme araçları vasıtası ile yapılabilir. CAD sistemlerinde katı modelleme için iki temel yöntem kullanılır;

Bunlar;

- B-rep (boundary representation)
- C-rep (constructive representation)'dir.

Cisimlerin kenar ve yüzeylerinin detaylı tanımlanmasını için B-rep yöntemi kulanılır. C-rep yönteminde ise cismin modeli standart geometrik parçaları (primitives) boolean işlemleriyle birleştirilir ve kesiştirilir. Bu yöntem kullanım kolaylığı ve genelde cisimler silindir, dikdörtgen gibi parçalardan oluştuğu için kullanılmaktadır. Cismin tüm hacmi yüzey sınırlarının tanımlanması ve bu sınırlar boyunca iki boyutlu yüzeyler taraması ile tanımlanır. Modeller eksenel simetri olan bir parçanın dönme şeklinde taranması ile oluşturulur. Üçüncü bir boyut vererek üretilmiş hacimlerden de model oluşturulabilir. Karmaşık yüzeylerde tanımlanan eğriler üzerinde tarama yapılır ve yüzey oluşturulur.

### 3.3 Parametrik Tasarım

Bilgisayar destekli tasarımda benzeşim esasına dayalı olarak yer alan tasarım uygulamasıdır. Benzer tasarım konfigürasyonları kullanılır ancak farklı ölçüdedir.

Tasarımın yapısını yeni ölçülere göre belirlenir ve bu parametreler ile kodlanmış ölçü değerleri ile yeni tasarım boyutlarını oluşturarak mümkün olabilmektedir. Parametrik tasarım sisteminde belirlenen ölçüm setlerine karşılık gelen konfigürasyonlar bulunmaktadır.

### 3.4 Tesla Türbini Bileşenlerinin Tasarımı ve Ansys Yapısal Analizleri

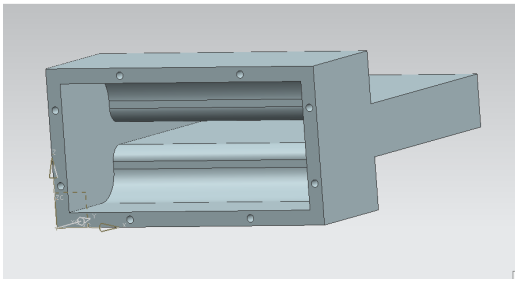
Bu teze konu olan tesla türbini prototipi için temelde iki adet tasarım yapılmıştır. Bu tasarımlardan ikincisi prototip için üretilmiştir.

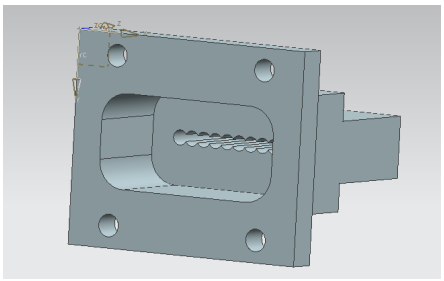
Tesla türbini 3 temel bileşenden oluşmaktadır bunlar; nozul, rotor ve türbin yatağıdır. Bu bileşenlerin özellikleri ve diğer türbin çeşitleri ile olan farklılıklarından Bölüm 2’de bahsedilmiştir.

#### 3.4.1 Nozul

Tasarım 1 ve Tasarım 2’de benzer nozullar tasarlanmıştır. Üretim kolaylığı nedeni ile Tasarım 2 tercih edilmiştir. Nozul tasarımındaki en önemli konu düzenli (laminar) akışın sağlanmasıdır. Belirli bir başınçta akışkan basınca dayanıklı hortum vasıtası ile nozula gelir ve buradan türbin içerisine girer. Nozul türbin verimliliğini arttırmak için ince deliklerden oluşmaktadır. Bu delikler diskler arasına doğru yönelmişlerdir. Verimli bir nozul yapmak için tek bir kalandan gelen havayı 11 kanala (11 delikli bir

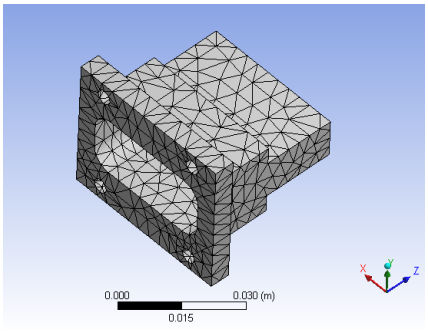
nozul örneği) ayırıken bu geçişi mümkün olduğu kadar sürekli ve türbülans yaratmadan yapmak gerekmektedir. Tasarım 1 ve Tasarım 2'ye ait nozullar Şekil 3.1' de gösterilmiştir.


(a)

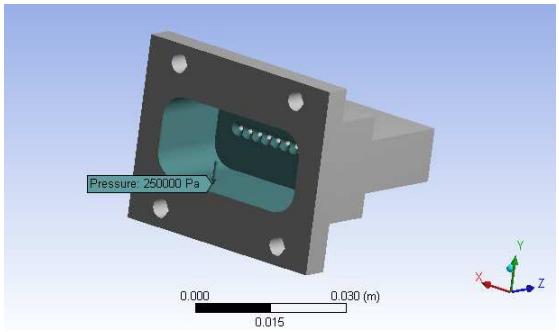

(b)

**Şekil 3.1 :** Nozul tasarımları: (a) Tasarım 1. (b) Tasarım 2.

Nozulların basınçlı akışkanların oluşturduğu strese de dayanması gerekmektedir. Bu nedenle hem nozullar hemde diğer tesla türbini bileşenleri üç boyutlu modelleri yaratıldıktan sonra ansys yazılımı yardımı ile yapısal analize tabi tutulmuşlardır. Ansys analizi sonuçlarına göre parçalardaki zayıf noktalar belirlenmiş ve eksiklikler bir sonraki tasarımlarda giderilmiştir. Şekil 3.3 – Şekil 3.10'da ansysdeki nozul analizlerini görmek mümkündür.



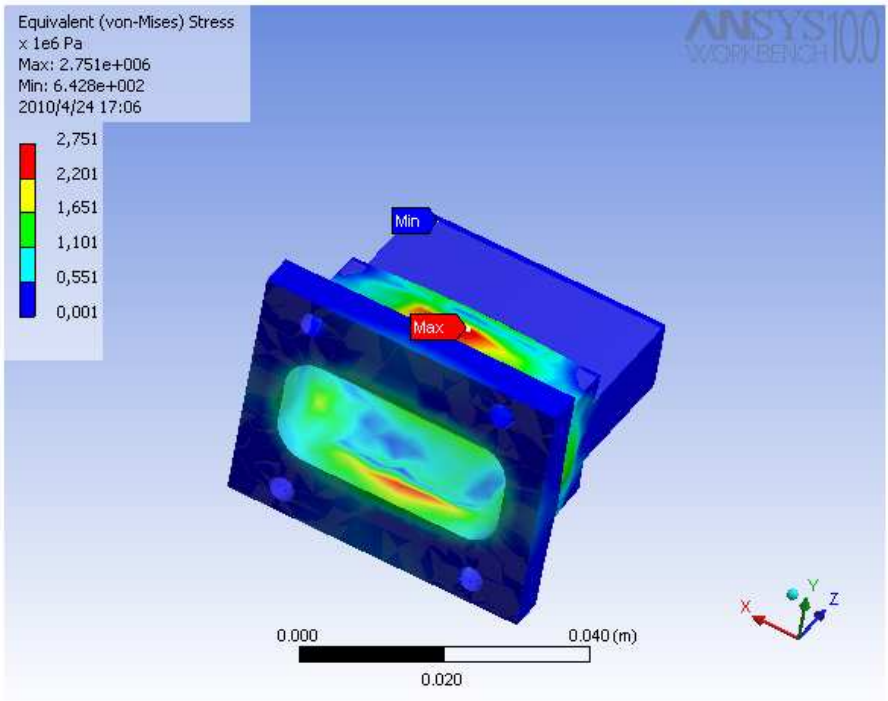
(a)



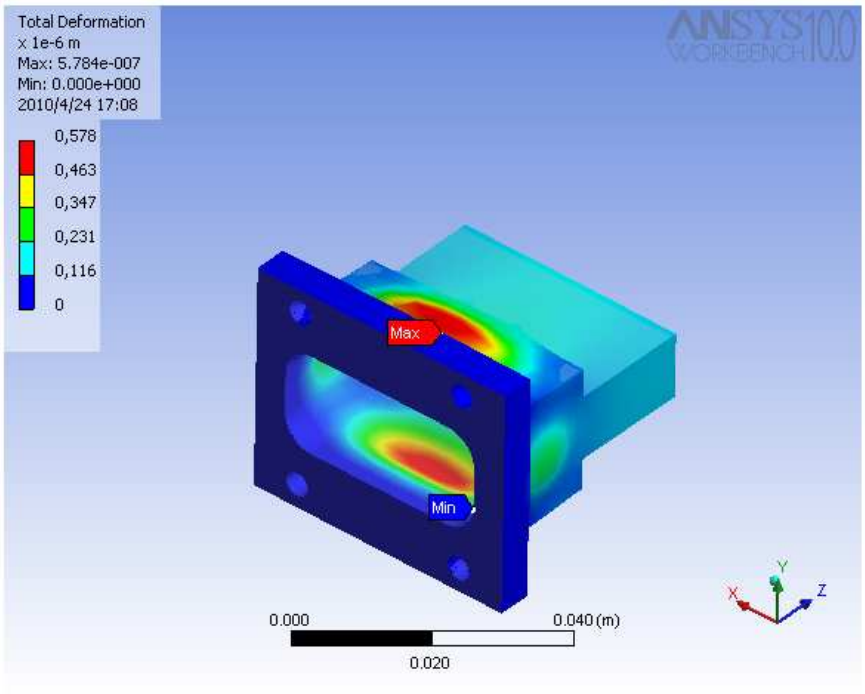
(b)

**Şekil 3.2 :** Nozul tasarımları: (a) Mesh uygulaması. (b) Basınç uygulaması.

Şekil 3.2 (a)'da üç boyutlu olarak yaratılmış nozula ağ uygulaması yapılmış (mesh) ve Şekil 3.2 (b)'de yine nozulun basınca maruz kalacak kısmına basınç uygulanmıştır. Tesla türbini nozul ansys analizlerinde 25 bar ve 35 bar basınçlar uygulanmıştır. Bu analiz aynı zamanda üç çeşit malzeme için tekrarlanmıştır. Bunlar paslanmaz çelik, titanyum ve modelin üretilmesinde kullanılan Alüminyum 7075'dir. Yapılan simulasyonlar sonucunda stress değerleri, yer değiştirme ve simulasyon hassasiyeti görüntülenmiş ve maksimum gerilme ve yer değiştime değerleri hesaplanmıştır.




**Şekil 3.3 :** Gerilme analizi – Al 7075, 25 bar

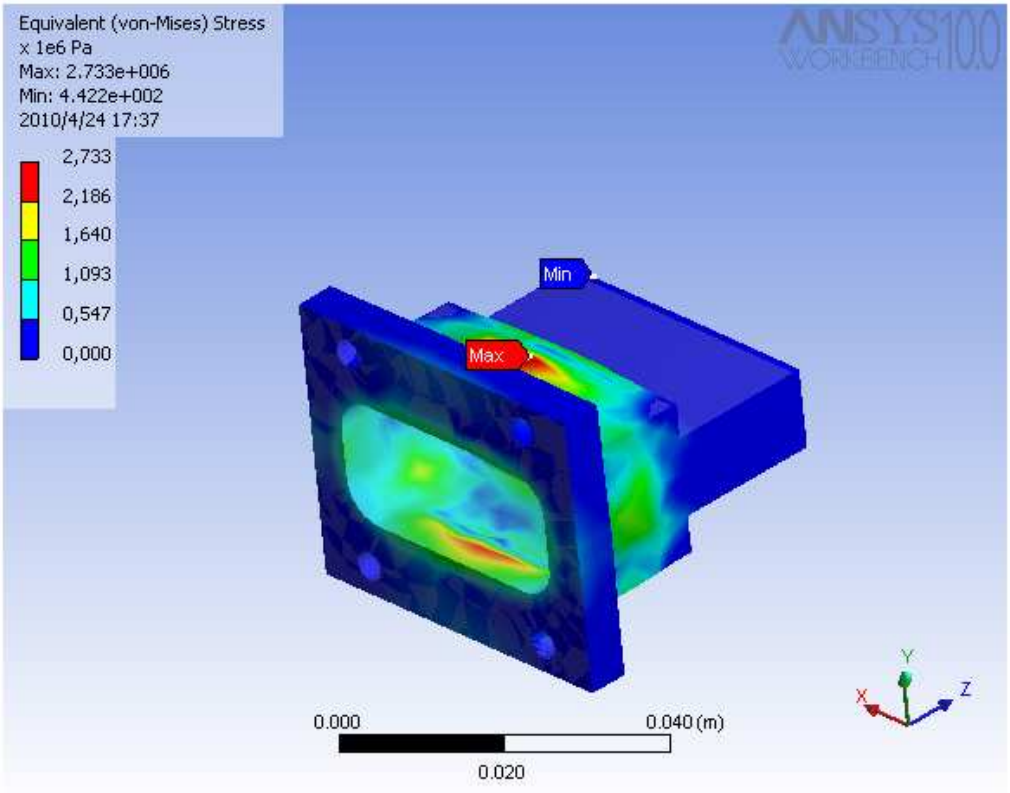



**Şekil 3.4 :** Yer değiştirme analizi – Al 7075, 25 bar

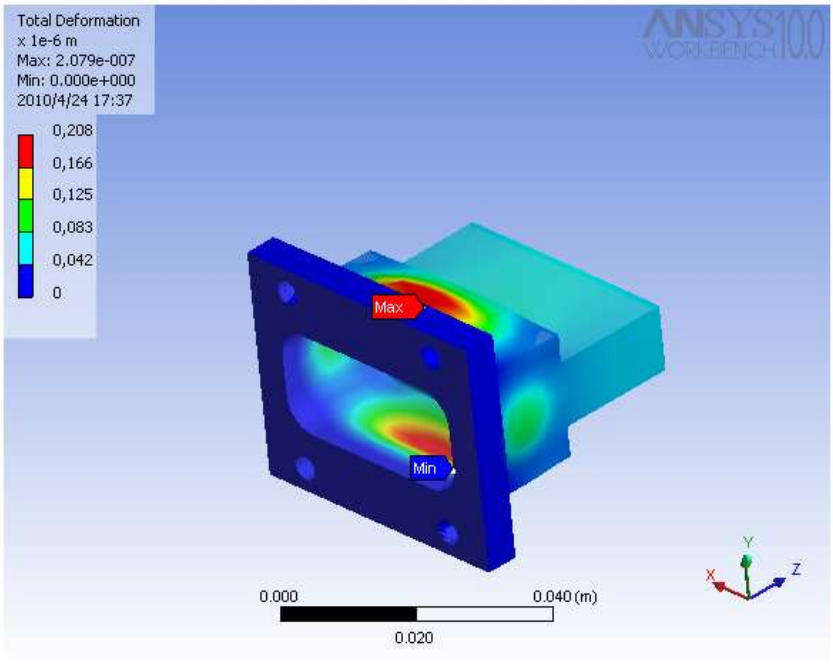
Yapılan simulasyon sonrasında maksimum gerilme 2.75 MPa olarak bulunmuştur, bu değer malzemenin maksimum gerilme dayanımı olan 572 MPa dan küçük olduğu için tasarımın güvenli olduğu söylenebilmektedir. Maksimum yer değiştime ise 5.78

x $10^{-7}$ m dir. Bu da çok küçük bir değerdir. Aynı nozul 25 bar basıçta paslanmaz çelik malzeme seçilerek de simulasyon yapılmıştır. Sonuçları Şekil 3.5 - Şekil 3.6'da görmek mümkündür. Şekil 3.7 - Şekil 3.8'de ise aynı basınç değerinde titanyum ile yapılan simulasyonu göremek mümkündür. Paslanmaz çelik ile yapılan denemede maximum gerilme 2.73 MPa, maksimum yer değiştirme ise 2 x $10^{-7}$ m olarak belirlenmiştir. Paslanmaz çeliğin maksimum gerilme dayanımı 200 MPa olduğu için tasarım güvenlidir. Yer değiştirme ise çok küçük bir değerdedir.

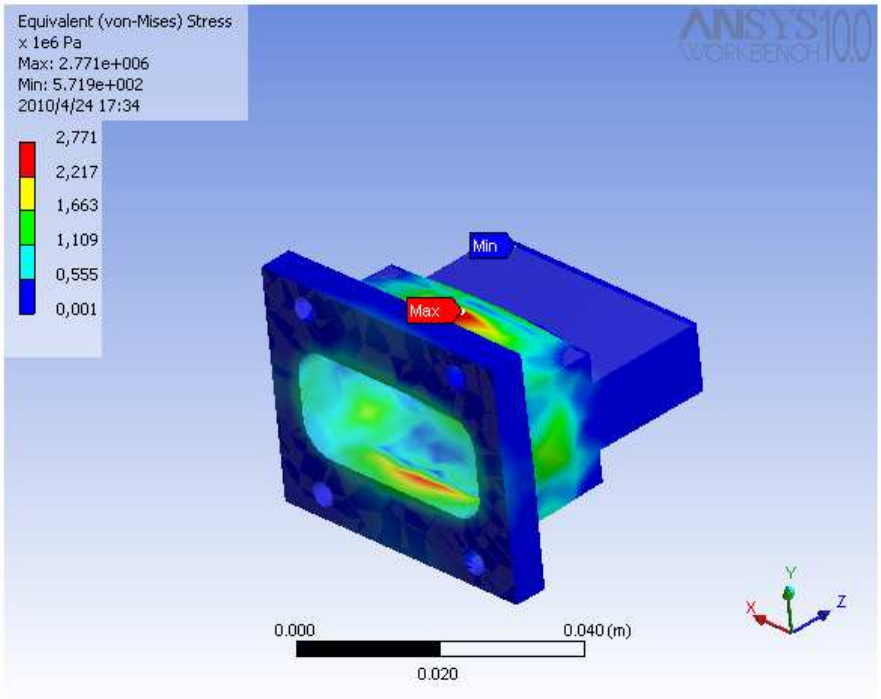
Benzer sonuçları titanyum içinde gözlemlemek mümkündür, titanyum simulasyonunda maksimum gerilme 2.77 MPa ve maksimum yer değiştirme 4.2 x $10^{-7}$ m olarak tespit edilmiştir. Titanyum maksimum dayanımı ise 930 MPa olduğu için bu tasarımın da güvenli olduğu söylenebilmektedir. Maksimum yer değiştirme çok küçük olmakla beraber diğer denemelere göre biraz daha fazla olmasının nedeni titanyumun poisson oranının 0.36 olmasıdır. Alüminyumun poisson oranı 0.33, paslanmaz çeliğin ise 0.3 tür.



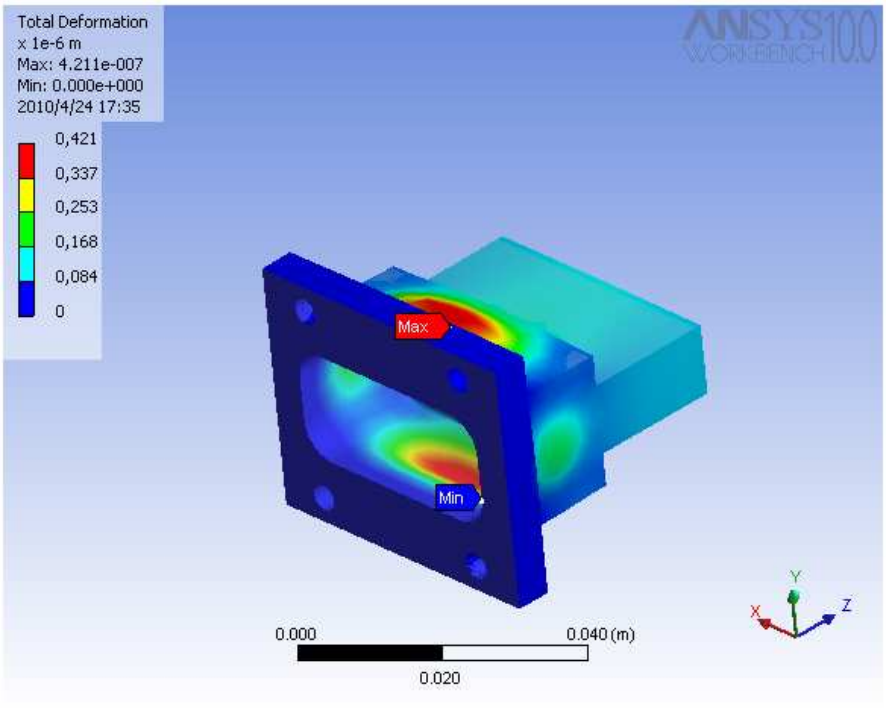

**Şekil 3.5 :** Gerilme analizi – Paslanmaz çelik, 25 bar




**Şekil 3.6 :** Yer değiştirme – Paslanmaz çelik, 25 bar

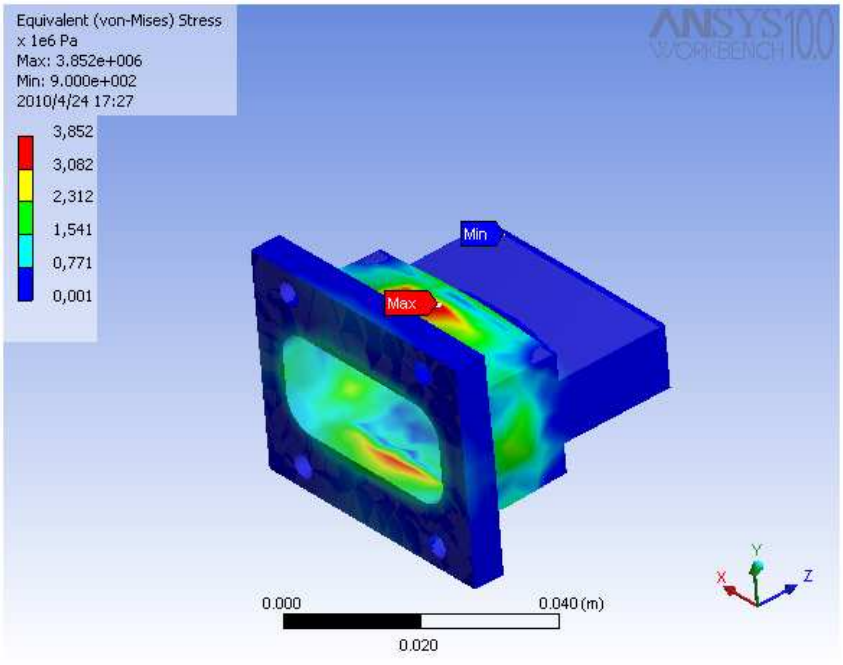



**Şekil 3.7 :** Gerilme analizi – Titanyum, 25 bar

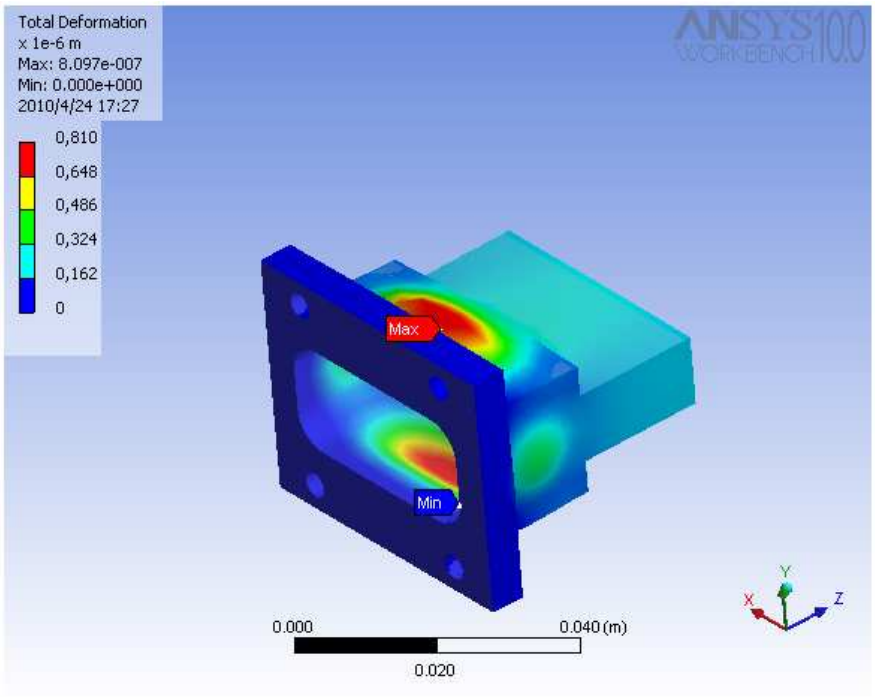



**Şekil 3.8 :** Yer değiştirme – Titanyum, 25 bar

25 barlık denemelerin dışında Alüminyum 7075 için 35 barlık bir deneme de yapılmıştır. Bu denemede maksimum dayanım 3.85 MPa ve maksimum yer değiştirme ise 8 x $10^{-7}$ m olarak belirlenmiştir. Bu tasarımın da güvenli olduğu söylenebilir. Şekil 3.9 - Şekil 3.10'da bu analizin sonuçlarını görmek mümkündür.



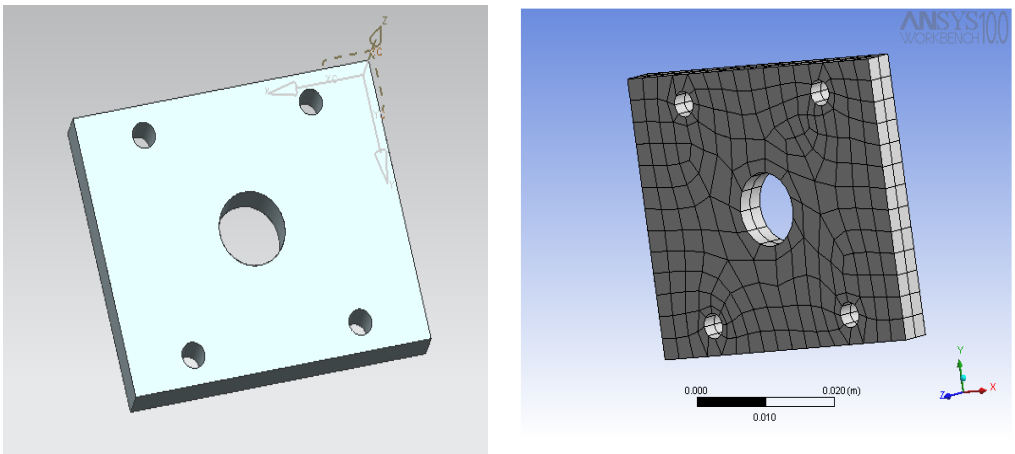

**Şekil 3.9 :** Gerilme analizi – Al 7075, 35 bar



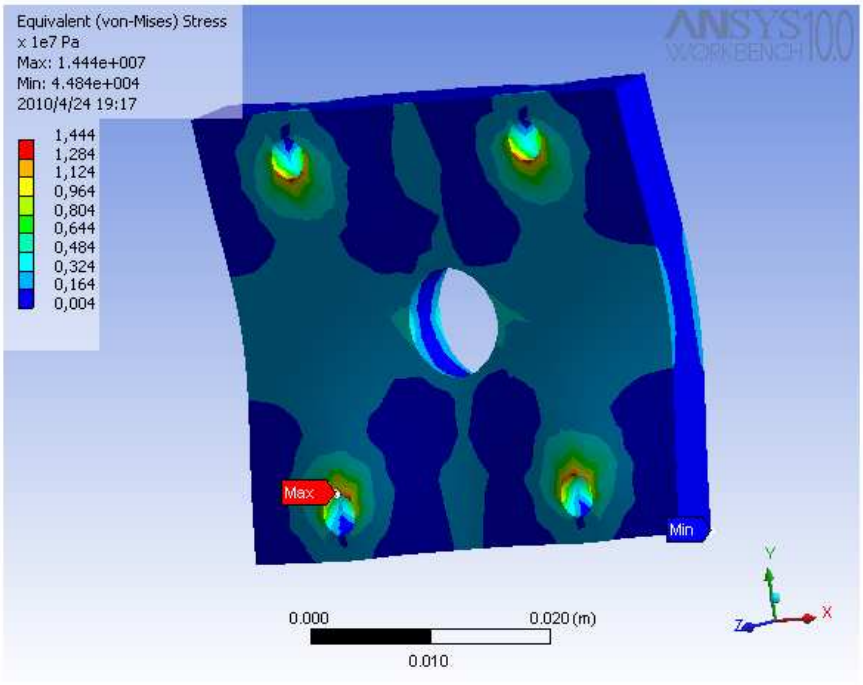

**Şekil 3.10 :** Yer değiştirme – Al 7075, 35 bar

### 3.4.2 Nozul kapağı

Nozul kapağı da yüksek basınca maruza kalan parçalardan biridir. Dört adet vida yardımı ile nozula bağlanmaktadır. Ortasında 0.63 cm çapında pnomatik bir bağlantı yuvası bulunmaktadır. Nozul kapağı üzerindeki maksimum gerilme 14 MPa dir. Şekil 3.11'de teknik çizim ve mesh uygulaması ve Şekil 3.12'de yapılan ansys analizi görülmektedir.



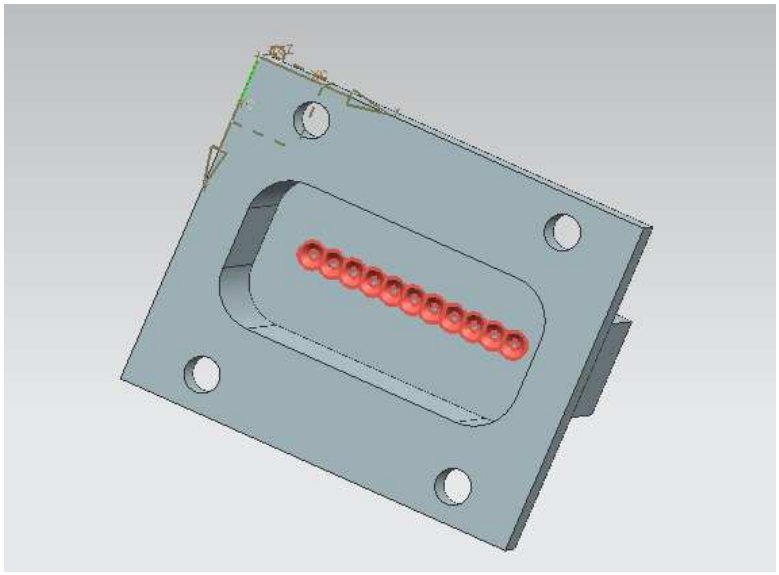
**Şekil 3.11 :** Nozul kapağı: (a) CAD. (b) Mesh uygulaması.




**Şekil 3.12 :** Nozul kapağı gerilme analizi.

### 3.4.3 Yüksek verimli nozul

Daha önce de Nozul tasarımı başlığı altında irdelendiği gibi, nozulları türbülans yaratmayacak şekilde tasarlamak önem arz etmektedir. Bu nedenle deliklerin uç kısımları mümkün olduğunca konik olamalıdır. Şekil 3.13'de buna bir örnek gösterilmiştir.

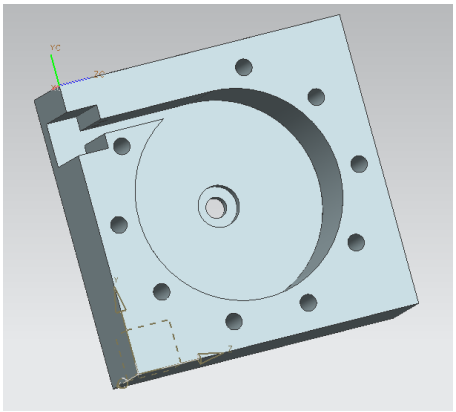
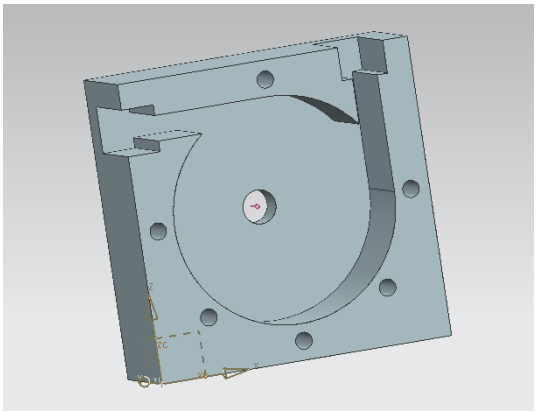


**Şekil 3.13 :** Geliştirilmiş nozul girişleri.

### 3.4.4 Türbin yatağı

Türbin yatağı da tesla türbininin önemli bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Nozulda şekillenen akış formu türbin yatağının içerisinde disklerle temas eder ve diskler arasında sınır tabakanın oluşmasını sağlar. Nozulda olduğu gibi türbin yatağı içerisinde de mümkün olduğunca az türbülans oluşması gerekmektedir. Bu nedenle türbin yatağı içerinde köşeli geometrilerden uzak durulmuştur.

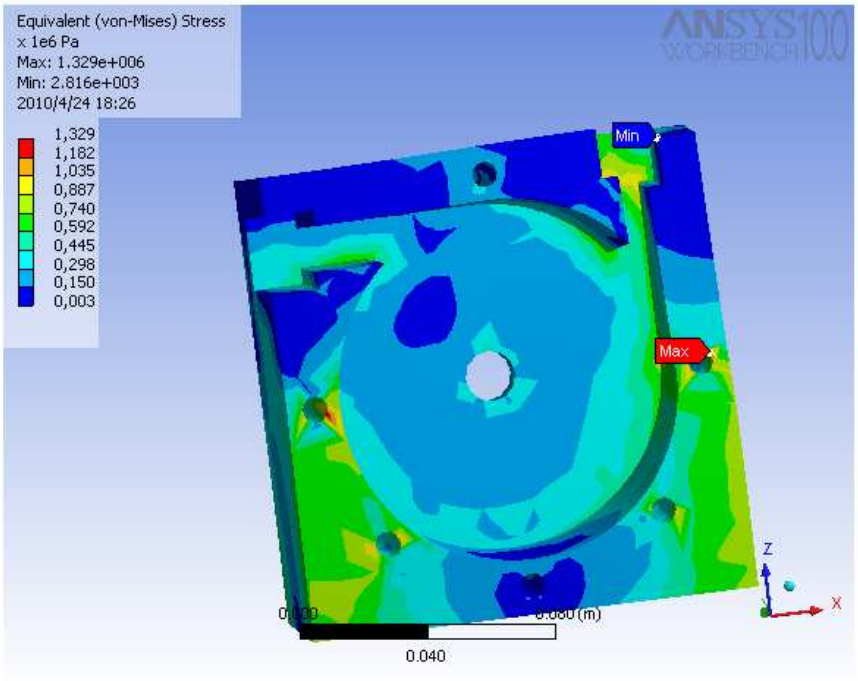
Bu teze konu olan prototip türbin için yeni bir nozul tasarımı geliştirilmiştir, bu şekilde farklı nozulları denemek kolaylaşmıştır. Yapılan bir diğer yenilik ise çift nozul kullanılmasıdır. Bu şekilde 2 nozul ve tek nozul kullanılması arasındaki fark anlaşılabilecektir. Türbin yatağı için de iki tasarım yapılmıştır. İlk tasarım tek nozul girişlidir, bu daha sonra iki nozula çıkarılmıştır. Şekil 3.14'de bu tasarımları görmek mümkündür.


(a)

(b)

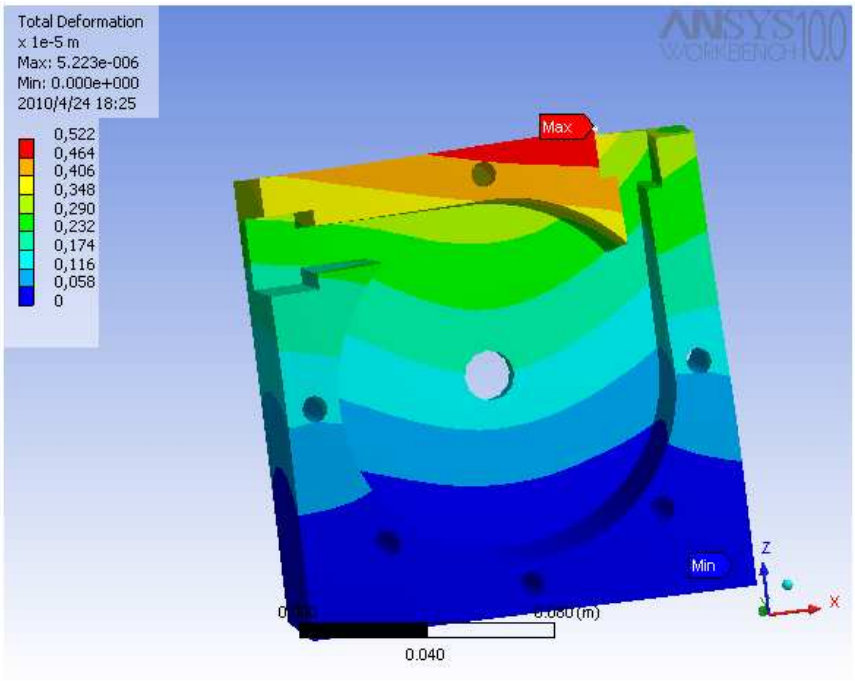
**Şekil 3.14 :** Türbin yatağı: (a) Tasarım 1. (b) Tasarım 2.

Tasarım 1 ve tasarım 2 arasındaki en büyük farklılık şaftla ilgilidir. Tasarım 1'de türbin yatağı üzerinde de bir yataklama (rulman) yuvası bulunmaktadır. Tasarım 2'de ise şaft tamamen kaplin ve yataklama bileşeni üzerinde bulunmaktadır.

Türbin yatağı üzerinde eksoz bulunduğu için atmosfere açıktır ve büyük basınçlara maruz kalmaz ancak güvenli bir tasarım yapabilmek için bu bileşende 5 bar basınç altında ansys analizine tabi tutulmuştur. Sonuçlar Şekil 3.15 – 3.16'da gösterilmiştir. Maksimum gerilme 1.32 MPa olarak hesaplanmıştır. Maksimum yer değiştirme ise $5.22 \times 10^{-6}$ m dir. Bu değerin daha önceki simulasyonlara göre daha yüksek çıkmasının nedeni, iki girişli nozul tasarımı esnasında oluşan iki giriş arasında kalan bölgedir. Ancak yine de bu yer değiştirme değeri de önemsiz sayılabilir.




**Şekil 3.15 :** Türbin yatağı gerilme analizi – Al 7075, 5 bar.

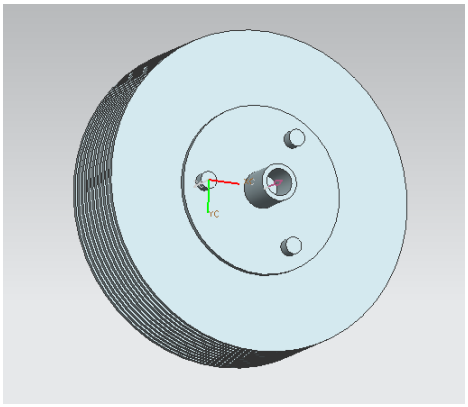



**Şekil 3.16 :** Türbin yatağı yer değiştirme – Al 7075, 5 bar.

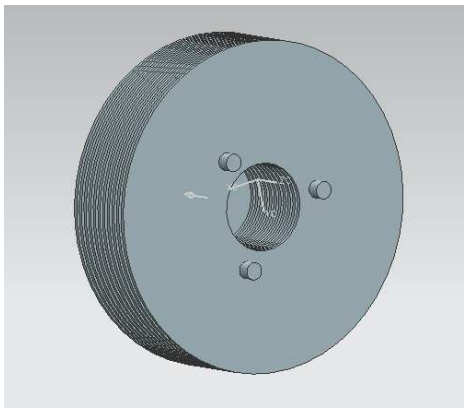
### 3.4.5 Rotor

Rotor da tesla türbininin önemli bir parçasıdır. Disk aralıklarının belirlenmesi ve eksoz yapısı türbin verimliliğini ciddi şekilde etkiler. Teorik öngörüler bölümünde bu etkiler konu edilecektir.

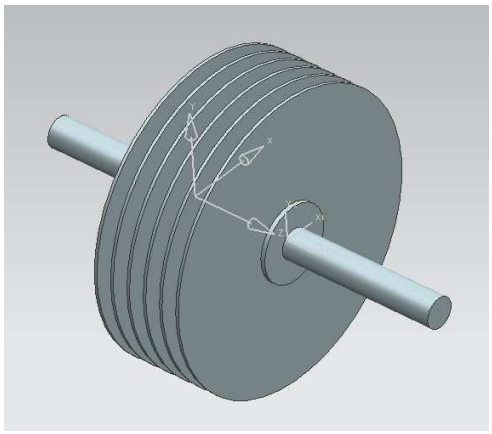
Bu teze konu olan tesla türbini prototipi için iki adet rotor tasarımı yapılmış ve Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Bunlardan tasarım 2 üretilmiştir. Bunun nedeni tasarım 2'de akışkan boşaltma kabiliyetinin daha fazla olmasıdır. Tasarım 2'de eksoz şaftın ortasına denk gelmektedir.



(a)



(b)



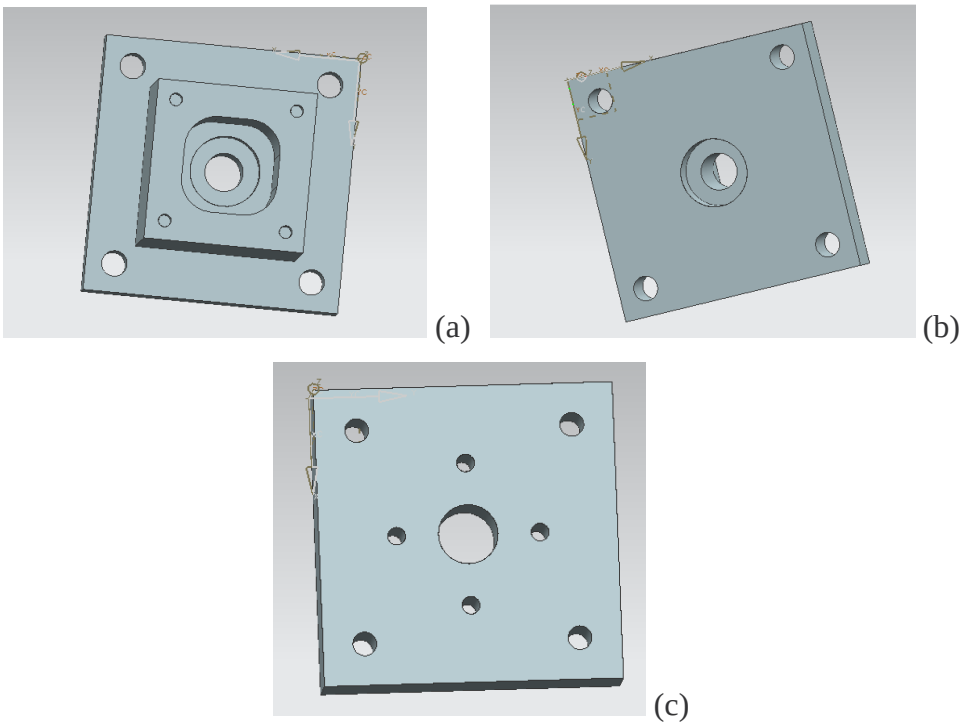
(c)

**Şekil 3.17 :** Rotor tasarımı: (a) Tasarım 1 arka görünüş. (b) Tasarım 2 ön görünüş. (c) Tasarım 1.

### 3.4.6 Kaplin ve yataklama bileşeni

Kaplin ve yataklama bileşeni iki adet yataklama (rulman) ve 1 adet yüksek devire dayanıklı kaplin içeren bir yapıdan meydana gelmektedir. Dört adet vida ile türbin yatağına bağlıdır. Ortasından rotor ile generatörü birbirine bağlayan şaft geçmektedir. Generatörün bu yapıya bağlanabilmesi için özel bir kapak tasarlanmıştır. Bu kapak kaplin ve yataklama bileşine monte edilmiştir. Ayrıca

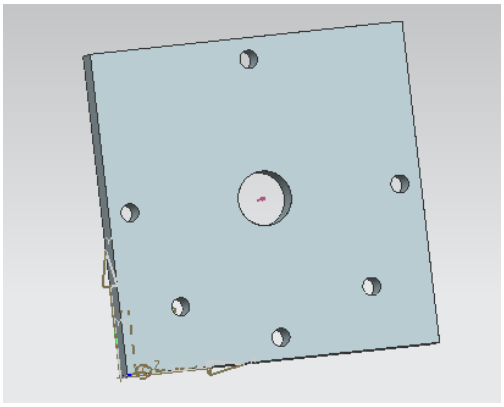
generatör de bu kapağa 4 adet vida ile monte edilmiştir. Şekil 3.18'de ilişkili teknik çizim ve tasarımları görmek mümkündür.



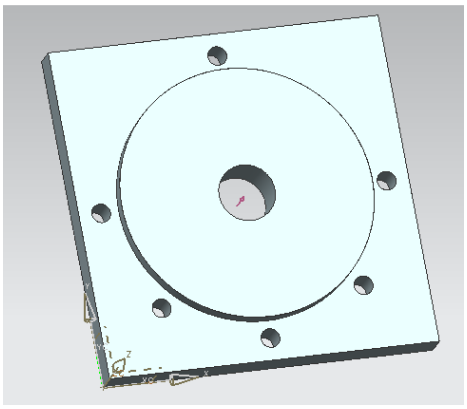
**Şekil 3.18 :** Kaplin ve yataklama bileşeni: (a) Ön görünüş. (b) Arka görünüş. (c) Generatör bağlantısı.

### 3.4.7 Türbin yatağı kapağı

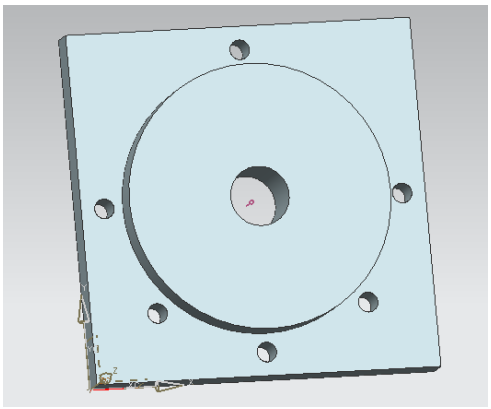
Türbin yatağı kapağı 6 adet delikten oluşan bir yapıya sahiptir. Bu teze konu olan prototip için 3 ayrı kapak tasarlanmıştır. Bunlardan ilki 6 mm lik, ikinci tasarım ise 12 mm lik bir yuvarlak çıkıntıya sahiptir. Bu türbin içerisindeki hacmin değiştirilebilmesi olanağını verir. Şekil 3.19'da ilişkili teknik çizim ve tasarımları görmek mümkündür.



(a)



(b)

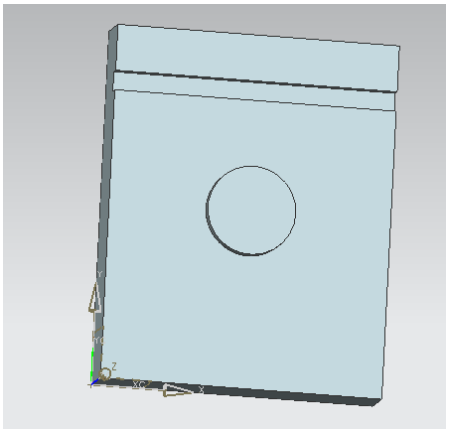


(c)

**Şekil 3.19 :** Türbin yatağı kapağı: (a) Standart kapak. (b) 6 mm tasarımı. (c) 12 mm tasarımı.

### 3.4.8 Eş disk delme aparatı

Diskler üzerindeki deliklerin eşit açılarla delinmesi ve bu disklerin eş olmaları önemlidir. Bunun nedeni yüksek hızlarda (25.000 rpm) dönen rotorda dengesizlik olmaması gereğidir. Bu ciddi güvenlik sorunları yaratabilmektedir. Bu nedenle Şekil 3.20'de ki disk delme aparatı tasarlanmış ve diskler eş bir şekilde üretilebilinmiştir.



**Şekil 3.20 :** Eş disk delme aparatı

### 3.4.9 Kullanılan malzemelerin özellikleri

Diskler için eski harddisk diskleri kullanılmıştır. Harddisk diskleri manyetik olmayan alüminyum bazlı malzemelerden üretilmiştir. Bu malzemelerin üzerleri manyetik olan $Fe_3O$ ile kaplıdır. Bu malzeme disk yüzeylerine pürüzsüzlük özelliği de verir ancak diskerin kırılgan olmalarına neden olur.

Prototip için ise Alüminyum 7050 kullanılmıştır, bu malzemenin maksimum dayanımı diğer alüminyum ve paslanmaz çeliklere göre yüksektir. İşlenebilirlik özelliği de yüksektir. Malzeme özellikleri deyaylı olarak Şekil A.1'de verilmiştir.

## 4.BİLGİSAYAR DESTEKLİ ÜRETİM (CAM)

Bilgisayar Destekli Üretim (CAM - "Computer Aided Manufacturing"), bilgisayar sisteminin bir üretim sisteminin, planlanması, yönetilmesi ve denetimi işlerinde doğrudan veya dolaylı olarak kullanılmasıdır. Bunlar bilgisayar ile izleme ve denetim ve üretim destek uygulamaları şekilde sıralanabilir;

1. *Bilgisayar ile izleme* ve *denetim.* Bilgisayarın izleme ve denetim amacı ile üretim sistemine doğrudan bağlandığı uygulamalardır.

2. *Üretim destek uygulamaları.* Bilgisayar üretimi desteklemek için kullanılmaktadır. Bilgisayar ile üretim sistemi arasında doğrudan bir ilişki bulunmamaktadır [11].

Bilgisayar izleme ve denetim uygulamalarını da kendi içerisinde ikiye ayırmak mümkündür. Bilgisayar izleme sistemleri üretim yapan makineye doğrudan bağlıdır ve sistemin izlenmesi ve ilgili her türlü verinin toplanmaktadır. Denetim ise bu verileri değerlendiren ayrı bir modul veya yazılım tarafından yapılmaktadır.

Bilgisayar ile denetim izlemenin bir adım ötesine gidilmiş halidir, elde edilen veriler sadece izlemekle kalınmaz aynı zamanda değerlendirilir ve gerektiğinde sisteme geri dönüş olarak döndürülür. Bu tezede konu olan prototipin üretilmesinde kullanılan CNC dik işlem makinesi denetim sistemine bir örnektir. Örneğin üretim sırasında meydana gelen bir aksaklığı sistem izler ve değerlendirdikten sonra gerekli ise üretim prosesini durdurabilir. İzleme ve denetim uygulamalarına bir çok otomasyon uygulamalarında rastlanabilir. [11].

Üretim destek uygulamalarında ise izleme ve denetim uygulamalarından farklı olarak bilgisayar, sisteme doğrudan bağlanmamakta, ancak sistemdeki üretim işlemlerine destek veren bir konumda olmaktadır. Prosesin üretim kaynaklarının, zamanının ve kalitesinin daha etkili bir şekilde kullanılabilmesi için gerekli planın, analizin yapılması ve tahminlerde bulunulması için kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalar için aşağıdaki örnekler verilebilir.

- Bilgisayar Destekli İşlem Planlaması (CAPP - "Computer Aided Process Planning").

Bu modül bir parçanın işlenebilmesi için gerekli işlemlerin ve bu işlemlerin sırasının tesbiti için kullanılmaktadır. Tesla türbini üretimi uygulaması için üretim önceliği türbin ana gövdesine verilmiştir. Bunun nedeni diğer parçaların üretilmesi sırasında açığa çıkabilecek bir aksaklığın önceden tahmin edilmesi ihtiyacıdır.

- Malzeme İhtiyaç Planlaması (MRP -"Material Requirements Planning").

Üretim prosesinin sağlıklı bir şekilde tamamlanması için hammaddelerin ve dışarıdan temin edilen parçaların ne zaman ve hangi miktarda alınması gerektiğinin tesbiti için kullanılır. Tesla Türbini üretimi için üç seferli bir malzeme temin işlemi gerçekleşmiştir. [11].

- Sayısal Denetim (NC - "Numerical Control")

CNC dik işlem makinesi için parça programının bilgisayar desteği ile hazırlanması amacı ile kullanılır. Tesla türbini üretimi için V Carve Pro ve Cut 3D isimli iki programla bu işlem gerçekleştirilmiştir.

- Bilgisayar Destekli Kalite Kontrolü (CAQC - "Computer Aided Quality Control").

- Bilgisayar Destekli Test (CAT - "Computer Aided Testing").

Tesla Türbini üretimi için Ansys isimli Sonlu Elemanlar Analiz (FEM) Programı kullanılmıştır

- Bilgisayar Destekli Muayene (CAI - "Computer Aided Inspection"),

Şekil 4.1’de bir ürünün üretilmesinde izlenen proses gösterilmiştir. Tesla Türbini üretimi prosesinde müşteri ve pazarla ilgili bir çalışma haricindeki basamaklar uygulanmıştır.

### 4.1 Otomasyon

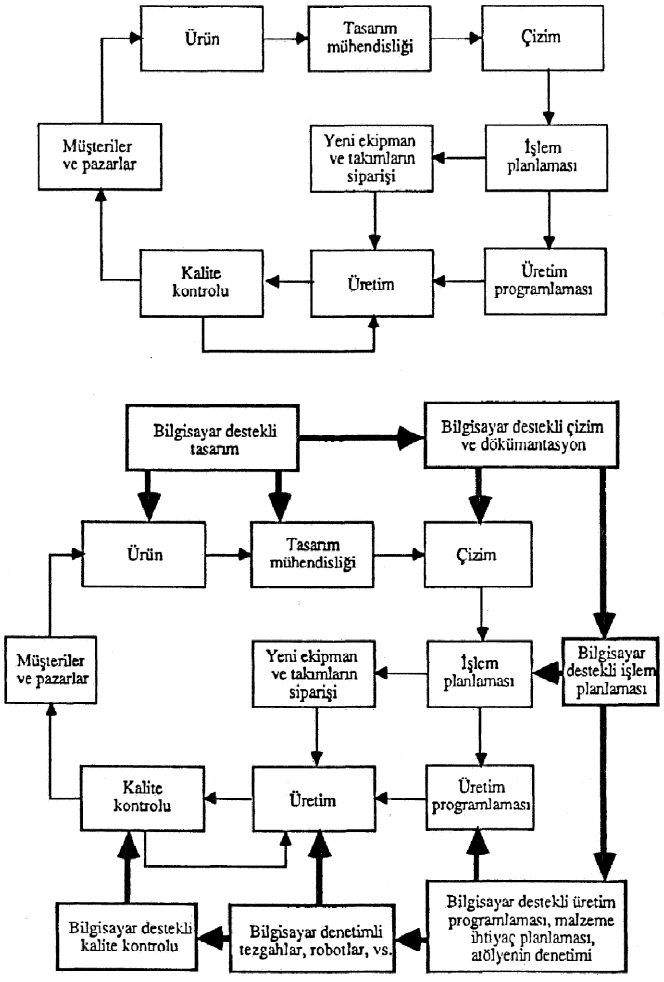
Otomasyon servislerin verilmesinin, üretimin ve eksikliklerin giderilmesinin, bilgilerin işlenmesinin, ve parçaların monte edilmesinin otomatik olarak insan enerjisi kullanılmadan ve insan müdahalesi olmadan yapılması anlamına gelmektedir. Otomasyon terimi ilk defa 1950'lerin başlarında malzemelerin otomatik manipülasyonu anlamında kullanılmıştır. Otomasyonun iki değişik tipi olduğu söylenebilir [11].

### 4.1.1 Katı otomasyon

Sistemin başka bir iş yapmak üzere yeniden programlanmasının zor olduğu otomasyon çeşitidir. Transfer hatları bu uygulamalara örnek olarak gösterilebilir. İstenilen iş elektronik devreler vasıtası ile kontrol edilmektedir ancak esnekliği düşüktür.

### 4.1.2 Esnek veya Programlanabilir Otomasyon

Sistemin programlanmasının programlanabilir denetleyiciler (PC - "Programmable Controller") veya mikro işlemciler yardımıyla yapıldığı uygulamalardır. Sistem başka bir iş yapmak üzere kolaylıkla yeniden programlanabilir.
Tesla türbini üretiminin yapıldığı Sieg KX3 marka CNC dik işlem makinesi esnek veya programlanabilir otomasyon sınıfına girer.




**Şekil 4.1 :** Üretim prosesi [11].

Sayısal denetimin tasarımda ve üretimde kullanılmasının çıkış noktası sürekli olarak aynı ürünün üretilmediği uygulamalar için esnek bir çözüm bulmak olarak kabul edilebilir. Bunun yanında sayısal denetim, bir işlemin denetimi için sayıların, kodların harflerin ve sembollerin kullanıldığı yeniden programlanabilir otomasyon şekli olarak da tanımlanabilir. Tesla türbin prototip üretimi prosesinde de üretime şekil veren G kodları her bir parça için yaratılmıştır. Program ise bir sisteme neyin, ne zaman ve nasıl yapılacağını anlatan sistem olarak tanımlanabilir. Tesla türbin üretilmesi esnasında G Kodların çalıştırılması için Mach 3 adlı CNC kontrol programı kullanılmıştır. Her iş parçası veya iş için programın değiştirilebiliyor olması da sayısal denetime esneklik kazandırır. Yeni bir parça veya ekipmanı üretmek için üretim ekipmanında önemli değişiklikler yapmaya gerek kalmaz. Bunun için sadece yeni programlar yazmak ve gerekli ise üretim ekipmanın üzerinde küçük değişiklikler yapmak yeterlidir.

Sayısal denetim uygulamalarına ise talaşlı imalat alanında rastlanır. Konvansiyonel yöntemler kullanarak üretilen parçalara göre hassasiyet yönünden ciddi avantajlara sahiptir. Ayrıca üretim prosesi daha kısa sürede tamamlanması sağlanır.

Bu teze konu olan tesla türbininin üretilmesinde de programlanabilir otomasyon sistemleri kullanılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi bunun en büyük avatajı üretim hassasiyetinde olmuştur. Prototip tesla türbini 0.01 mm hassasiyetle üretilmiştir.

### 4.2 Bilgisayar Destekli Üretim Prosesinde Kullanılan Yazılımlar

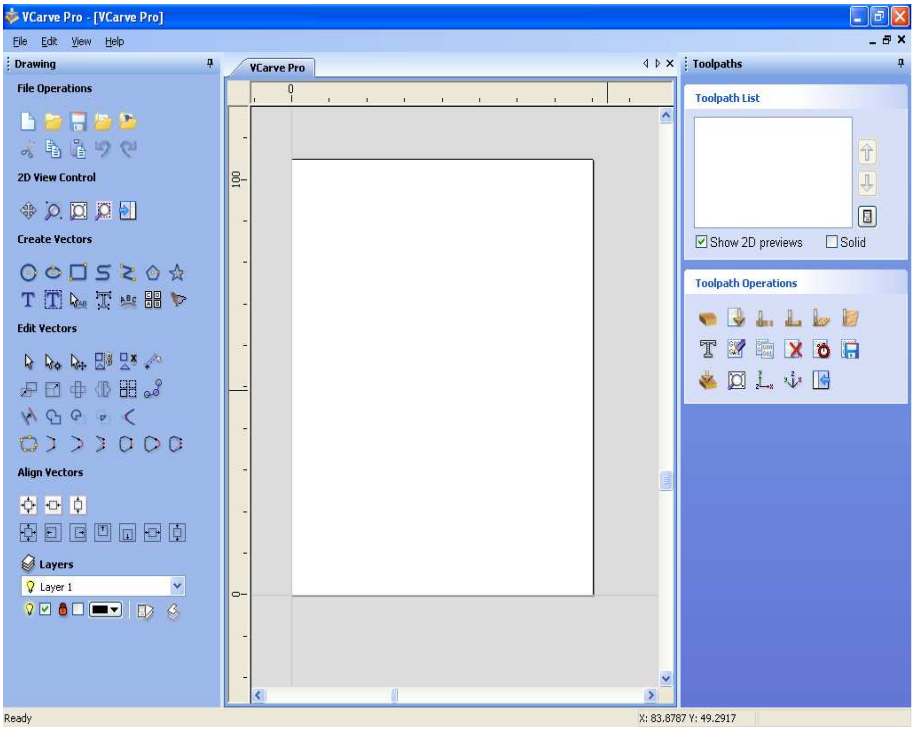
Bu teze konu olan model tesla türbinin bilgisayar destekli üretim prosesinde üç farklı yazılım kullanılmıştır. Bunlar Vcarve Pro, Cut 3D ve Mach 3 adlı yazılımlardır. Vcarve Pro 2.5, Cut 3D üç eksenli bilgisayar destekli üretim programlarıdır. CAM programlarını 3 e ayırmak mümkündür.

1- 2 Eksenli CAM programları
2- 2.5 Eksenli CAM programları
3- 3 Eksenli (Boyutlu) CAM programları

İki eksenli CAM programları iki eksende üretim kodu çıkartma yeteneğine sahiptir. Bağlı olduları CNC yada otomasyon aracı 2 eksende çalışır, örneğin X ve Y eksenleri.

İki buçuk eksenli CAM programları üç boyutlu üretim yapma imkanına sahiptir ancak dikey parabolik şekil profillerini çıkartma kabiliyetleri yoktur. Bunun nedeni 3 eksenin de aynı anda çalışamamasıdır. Bu tip programlar aynı anda 2 eksen çalıştırabilirler.

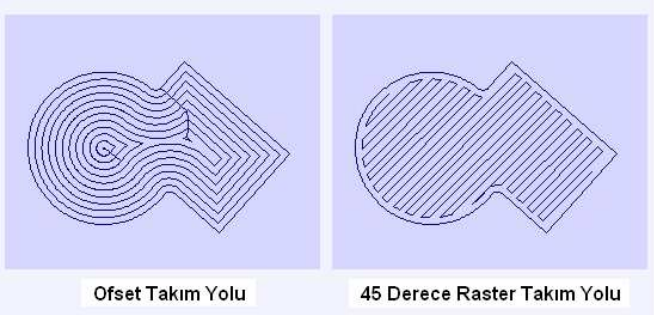
Üç eksenli CAM programları ise aynı anda üç ekseni birden çalıştırabildikleri için her türlü parabolik takım yolunu çıkartma yeteneğine sahiptir. Şekil 4.2'de Vcarve Pro programına ait ekran gösterilmektedir. Ekranın sol tarafında takım yolu oluşturmaya yarayan komutlar, sağ tarafında ise G kodu yaratmak için kullanılan butonlar bulunmaktadır.




**Şekil 4.2 :** Vcarve Pro CAM yazılımı.

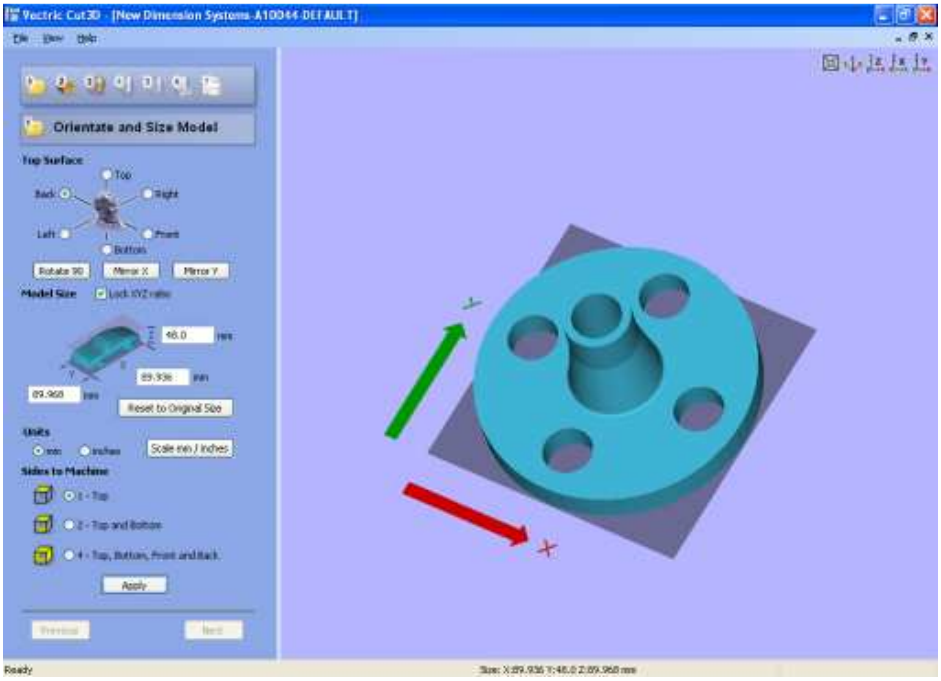
Aşağıdaki Şekil 4.3'de ise Cut 3D isimli programa ait ekran gösterilmektedir Bu programa farklı uzantılarda CAD dosyaları yüklenmektedir. Referans noktası seçildikten sonra malzeme boyutları ve marjinler girilmektedir. Daha sonra kesme parametreleri girilir ve istenilen kaba takım yolları yaratılır. Bir sonraki aşama yüzey tamamlama takım yolunun yaratılmasıdır. Bu aşamada da takım cinsi, ilerleme hızı, mil hızı, adım oranı gibi kesme parametreleri programa girilir.

Eğer gerekli ise kesip-çıkarma takım yoluda bir sonraki adım olarak programa girilir. Son aşamada takım yolu simule edilip herhangi bir aksaklık olmadığı gözlemlenir.



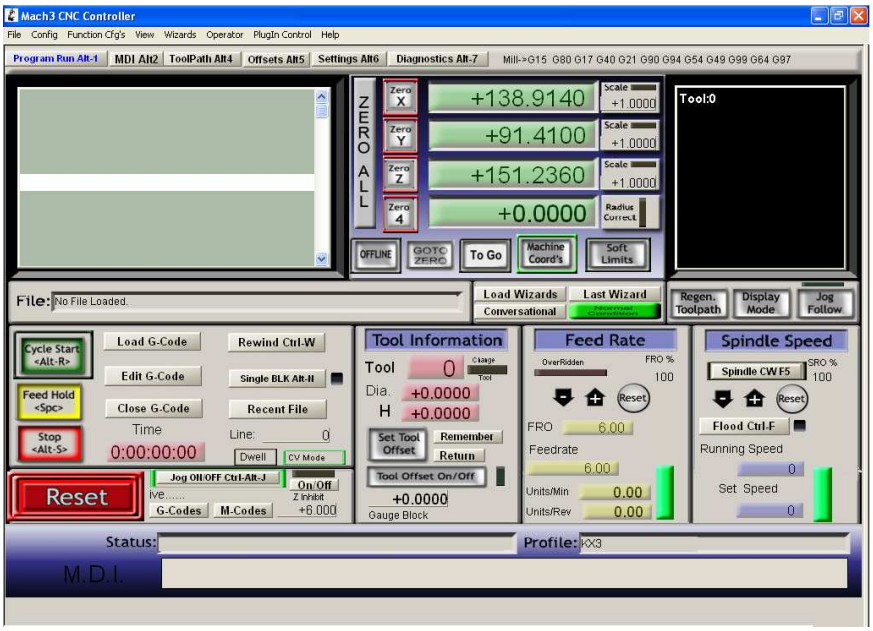

**Şekil 4.3 :** Takım yolu seçenekleri.

Şekil 4.2'de şeçilebilecek iki farklı takım yoluna ait örneği görmek mümkündür. Ofset takım yolu takım içerisinde bir noktadan kesme işlemine başlar ve dışarıya doğru açılarak kesme işlemini tamamlar. Raster takım yolu ise düz olarak kesme işlemini tamamlar, istenirse belirli bir açı ile kesme işlemini tamamlamak da mümkündür. Üzerinde işlem yapılan parçanın büyüklüğüne göre iki seçenekden birini tercih etmek mümkündür. Ofset takım yolu daha küçük bir alanda kesme prosesini tamamlar. Şekil 4.4'de Cut3D isimli yazılıma ait resmi görmek mümkündür.



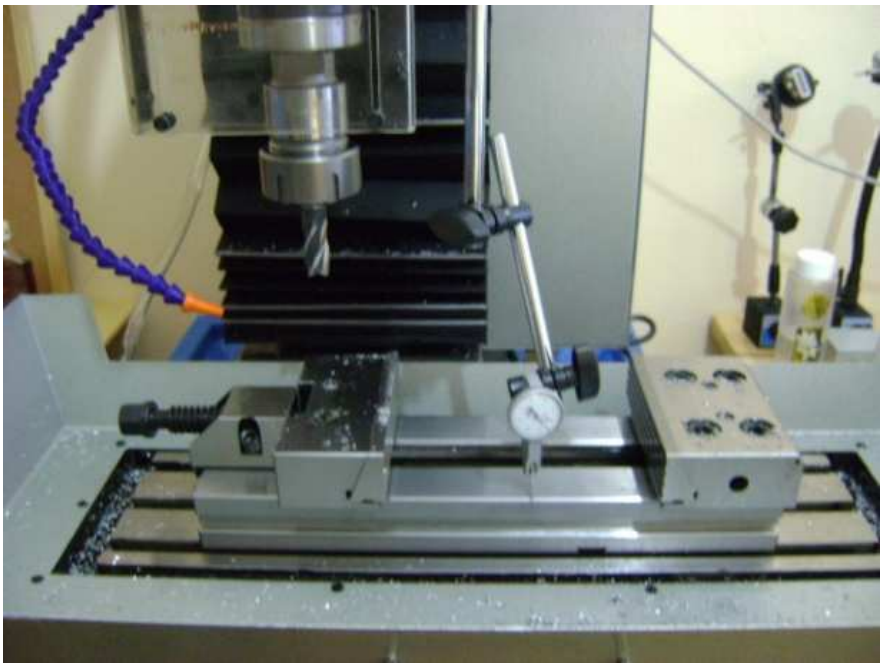

**Şekil 4.4 :** Cut3D Cam yazılımı.

Mach 3 ise CNC kontrolü için kullanılan bir prorgamdır. Cam yazılımlarının üretmiş oldukları G kodlar bu programa yüklenir ve Mach 3 ün kontrol ettiği eksen adım motorları ve mil bileşeni üretir.




**Şekil 4.5 :** Mach 3 CNC kontrol yazılımı.

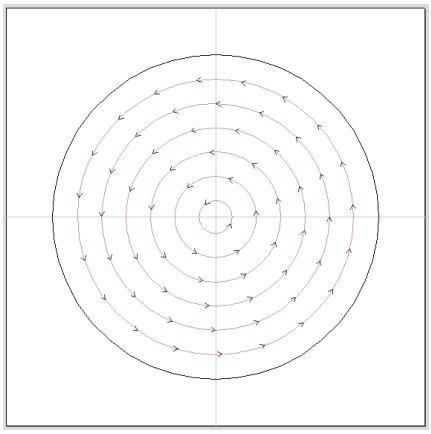
Bu teze konu olan prototipin üretilmesi esnasında üretim hassasiyeti için süper hassas bir mengene kullanılmıştır. Diğer önemli bir konu ise bu mengenenin CNC ye doğru bir şekilde bağlanmasıdır. Bunun için de salgı tipli bir komparatör kullanılmıştır. Aşağıdaki Şekil 4.5'de bu işlemin yapılması esnasındaki bir fotografı görmek mümkündür.



**Şekil 4.6 :** Hassas Komparatör kullanımı.

### 4.3 Türbin Bileşenlerinin Üretilmesi, Takım Yollarının Yaratılması ve Optimum Kesme Değerlerinin Belirlenmesi

Bu teze konu olan prototip tesla türbininin üretilmesinde Vcarve Pro isimli programdan çıkan G kodlar kullanılmıştır. Alüminyum 7075 ile bu parçaların üretilmesindeki optimum kesme değerleri bu konu başlığı altında verilmiştir. Bu değerler üretim sırasında deneme yanılma yöntemlerine göre verilmiştir. Esas kriter en iyi yüzey kalitesini yakalamaktır. Bu türbin içerisinde türbülans yaratmamak için önemlidir. Aşağıdaki Şekil 4.6'da türbin yatağı için yaratılan takım yolunu görmek mümkündür. Çizelge 4.1'de Türbin yatağı optimum kesme parametrelerini görmek mümkündür.


(a)

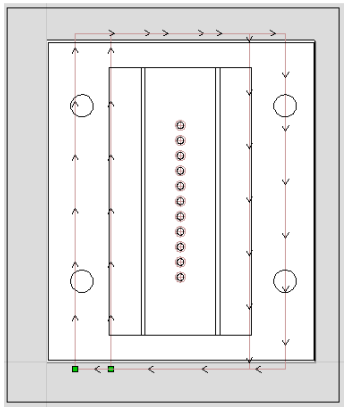
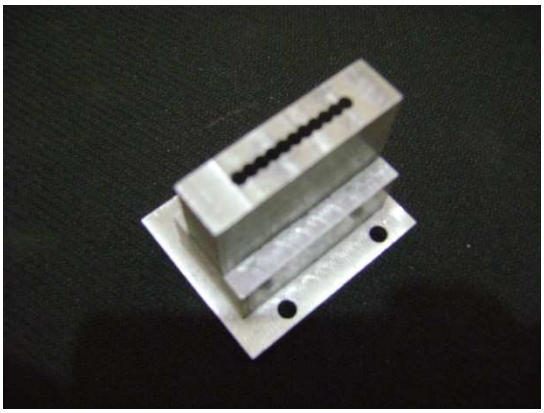
(b)

**Şekil 4.7 :** Türbin yatağı (a) Takım Yolu. (b) Üretim.

**Çizelge 4.1 :** Türbin yatağı optimum kesme parametreleri

| Kesme Kriterleri | Optimum Değerler |
|---|---|
| İlerleme Hızı | 500 mm/min |
| Mil Hızı | 3000 rpm |
| Dikey İlerleme Hızı | 35 mm/min |
| Adım Oranı | % 50 |
| Takım Cinsi | 4 ağızlı |
| Takım Çapı | 16 mm |

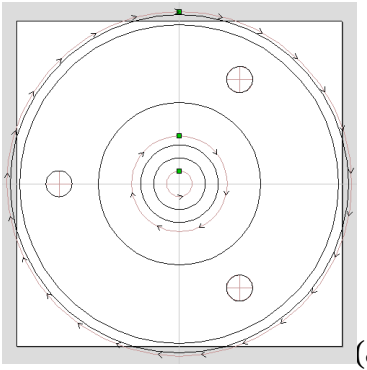
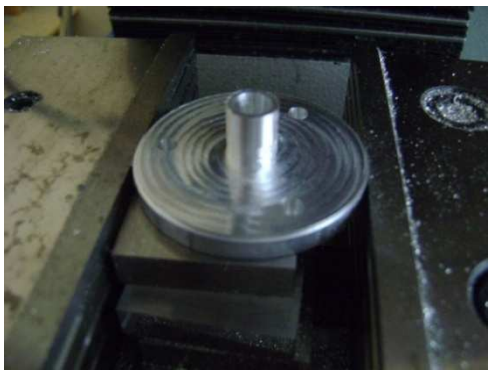
Nozul için yaratılan takım yolu Şekil 4.7'de dir ve takım yolu Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Aynı şekilde rotor şaft ek bileşeni için Takım yolu Şekil 4.8'de ve Optimum Kesme değerleri Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.


(a)

(b)

**Şekil 4.8 :** Nozul (a) Takım Yolu. (b) Üretim.

**Çizelge 4.2 :** Nozul optimum kesme parametreleri

| Kesme /Delme Kriterleri | Optimum Değerler Kesme | Optimum Değerler Delme |
|---|---|---|
| İlerleme Hızı | 1000 mm/min | 35 mm/min |
| Mil Hızı | 3500 rpm | 3500 rpm |
| Adım Oranı | %50 | - |
| Takım Cinsi | 4 ağızlı | Delici uç |
| Takım Çapı | 6 mm | 2,5 mm |

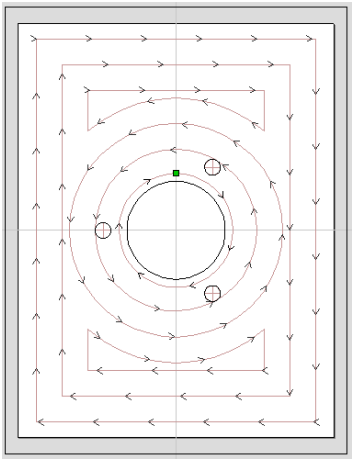

(a)

(b)

**Şekil 4.9 :** Şaft bağlantı bileşeni (a) Takım Yolu. (b) Üretim.

**Çizelge 4.3 :** Şaft bağlantı bileşeni optimum kesme parametreleri

| Kesme - Delme Kriterleri | Optimum Değerler Kesme | Optimum Değerler Delme |
|---|---|---|
| İlerleme Hızı | 800 mm/min | 35 mm/min |
| Mil Hızı | 3000 rpm | 3000 rpm |
| Adım Oranı | %40 | - |
| Takım Cinsi | 4 ağızlı | Delici uç |
| Takım Çapı | 8 mm | 5 mm |

Eş delik delme aparatı takım yolları Şekil 4.9'da ve optimum kesme değerleri Çizelge 4.4'de verilmiştir. Kaymayı önlemek amacıyla diskler iki adet mengene ile aparat üzerine tutturulmuştur. Nozul kapağı takım yolları Şekil 4.10'da ve optimum kesme değerleri Çizelge 4.5'de verilmiştir.

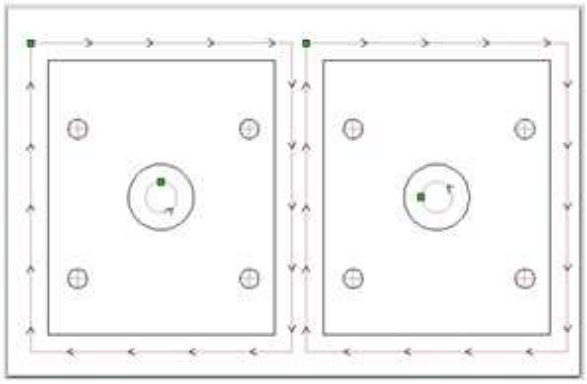

(a)

(b)

**Şekil 4.10 :** Eş delik delme aparatı (a) Takım Yolu. (b) Üretim.

**Çizelge 4.4 :** Eş delik delme aparatı optimum kesme parametreleri

| Kesme /Delme Kriterleri | Optimum Değerler Kesme | Optimum Değerler Delme |
|---|---|---|
| İlerleme Hızı | 500 mm/min | 35 mm/min |
| Mil Hızı | 3000 rpm | 3500 rpm |
| Adım Oranı | %50 | - |
| Takım Cinsi | 4 ağızlı | Delici uç |
| Takım Çapı | 10 mm | 5 mm |

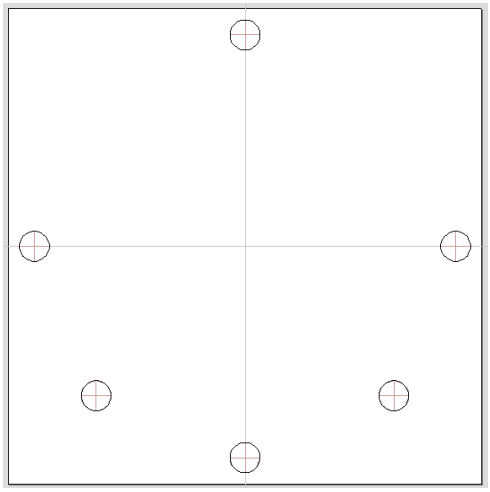


**Şekil 4.11 :** Nozul kapağı (a) Takım Yolu. (b) Üretim.

**Çizelge 4.5 :** Nozul kapağı optimum kesme parametreleri

| Kesme /Delme Kriterleri | Optimum Değerler Kesme | Optimum Değerler Delme |
|---|---|---|
| İlerleme Hızı | 800 mm/min | 35 mm/min |
| Mil Hızı | 3000 rpm | 3000 rpm |
| Adım Oranı | %40 | - |
| Takım Cinsi | 4 ağızlı | Delici uç |
| Takım Çapı | 6 mm | 3 mm |

Türbin yatağı kapağı takım yolları Şekil 4.11'de ve optimum kesme değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir. Türbin yatağı dikey nozul girişi takım yolları Şekil 4.12'de ve optimum kesme değerleri Çizelge 4.7'de verilmiştir. Türbin yatağı yatay nozul girişi takım yolları Şekil 4.13'de ve optimum kesme değerleri Çizelge 4.8'de verilmiştir.



**Şekil 4.12 :** Türbin yatağı kapağı (a) Takım Yolu. (b) Üretim.

**Çizelge 4.6 :** Türbin yatağı kapağı optimum kesme parametreleri

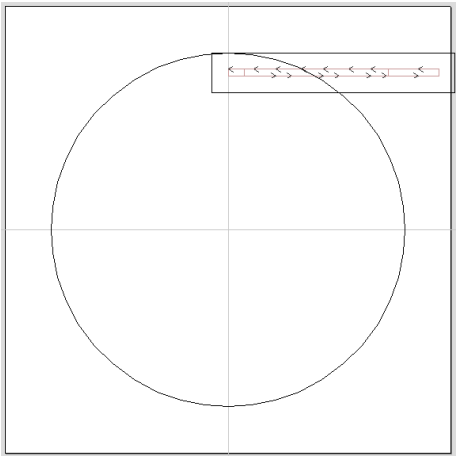
| Kesme /Delme Kriterleri | Optimum Değerler Kesme | Optimum Değerler Delme |
|---|---|---|
| İlerleme Hızı | 500 mm/min | 25 mm/min |
| Mil Hızı | 3000 rpm | 3500 rpm |
| Adım Oranı | %40 | - |
| Takım Cinsi | 4 ağızlı | Delici uç |
| Takım Çapı | 12 mm | 8 mm |



**Şekil 4.13 :** Türbin yatağı nozul girişi yan görünüş (a) Takım Yolu. (b) Üretim.

**Çizelge 4.7 :** Türbin yatağı nozul girişi yan görünüş optimum kesme parametreleri

| Kesme /Delme Kriterleri | Optimum Değerler Kesme | Optimum Değerler Delme |
|---|---|---|
| İlerleme Hızı | 1000 mm/min | 30 mm/min |
| Mil Hızı | 3000 rpm | 3500 rpm |
| Adım Oranı | %50 | - |
| Takım Cinsi | 4 ağızlı | Delici uç |
| Takım Çapı | 6 mm | 3 mm |

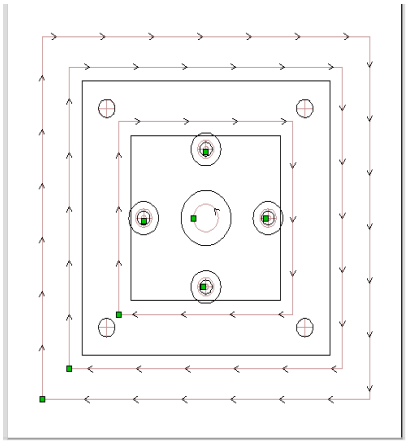


**Şekil 4.14 :** Türbin yatağı nozul girişi ön görünüş (a) Takım Yolu. (b) Üretim.

**Çizelge 4.8 :** Türbin yatağı nozul girişi ön görünüş optimum kesme parametreleri

| Kesme Kriterleri | Optimum Değerler |
|---|---|
| İlerleme Hızı | 500 mm/min |
| Mil Hızı | 3000 rpm |
| Adım Oranı | %50 |
| Takım Cinsi | 4 ağızlı |
| Takım Çapı | 8 mm |

Kaplin ve yataklama bileşeni kapağı takım yolları Şekil 4.14'de ve optimum kesme değerleri Çizelge 4.9'da verilmiştir. Kaplin ve yataklama bileşeni takım yolları Şekil 4.15'de ve optimum kesme değerleri Çizelge 4.10'da verilmiştir.

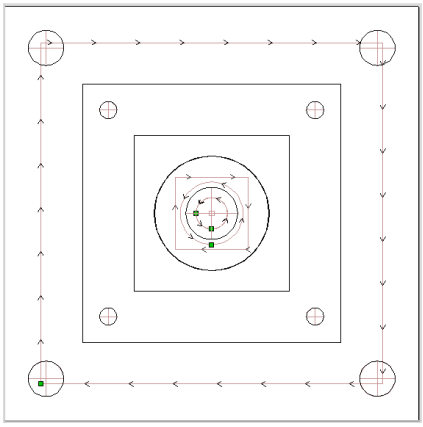


**Şekil 4.15 :** Kaplin ve yataklama bileşeni kapağı (a) Takım Yolu. (b) Üretim.

**Çizelge 4.9 :** Kaplin ve yataklama bileşeni kapağı optimum kesme parametreleri

| Kesme /Delme Kriterleri | Optimum Değerler Kesme | Optimum Değerler Delme |
|---|---|---|
| İlerleme Hızı | 500 mm/min | 30 mm/min |
| Mil Hızı | 3500 rpm | 3500 rpm |
| Adım Oranı | %50 | - |
| Takım Cinsi | 4 ağızlı | Delici uç |
| Takım Çapı | 8 mm | 3 mm |

Şekil 4.16'da Kaplin ve yataklama bileşeni ile ilgili takım yolunu görmek mümkündür.



**Şekil 4.16 :** Kaplin ve yataklama bileşeni (a) Takım Yolu. (b) Üretim.

**Çizelge 4.10 :** Kaplin ve yataklama bileşeni optimum kesme parametreleri

| Kesme /Delme Kriterleri | Optimum Değerler (Kesme) | Optimum Değerler (Delme) |
|---|---|---|
| İlerleme Hızı | 500 mm/min | 30 mm/min |
| Mil Hızı | 3000 rpm | 3500 rpm |
| Adım Oranı | %50 | - |
| Takım Cinsi | 4 ağızlı | Delici uç |
| Takım Çapı | 10 mm | 7.5 mm |

## 4.4. Üretim Esnasında Kullanılan Kimyasallar

Üretim Esnasında çeşitli kimyasallar kullanılmıştır, bunlar;

1- Sızdırmazlık sağlayıcı sıvı conta.

Sızdırmazlık türbin performansını etkileyen bir faktördür, Nozul ve türbin yatağı montajında kullanılmıştır.

2- Pnomatik bağlantı sızdırmazlığı sağlaycı.

Pnomatik bağlantı parçaları arasındaki sızdırmazlığı sağlamak için kullanılmıştır

3- Delik delmeyi kolaylaştırıcı solüsyon.

Nozul üretimde en büyük zorluk ince deliklerin delinmesi aşaması olmuştur. Kesici takımın fazla ısınması nedeni ile kırılmalar meydana gelmiştir. Bu denenle soğutucu solüsyon kullanılmıştır.

4- Pnomatik bağlantı parçaları ile türbin bağlantısında kullanılan sıvı teflon.

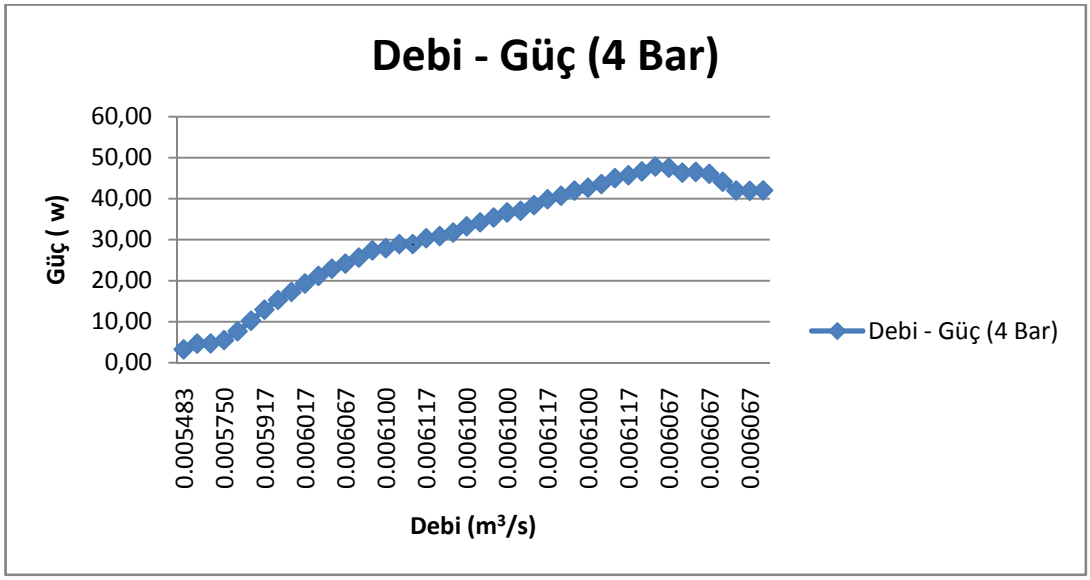
Sızdırmazlık sağlamak için kullanılmıştır.

## 5.DENEYSEL SONUÇLAR

Üretilen türbin karakterizasyonu için 4 bar, 5 bar ve 6 bar da azotla deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde debi – elektriksel güç, açısal hız – tork ve güç – verim grafikleri çizilmiştir.

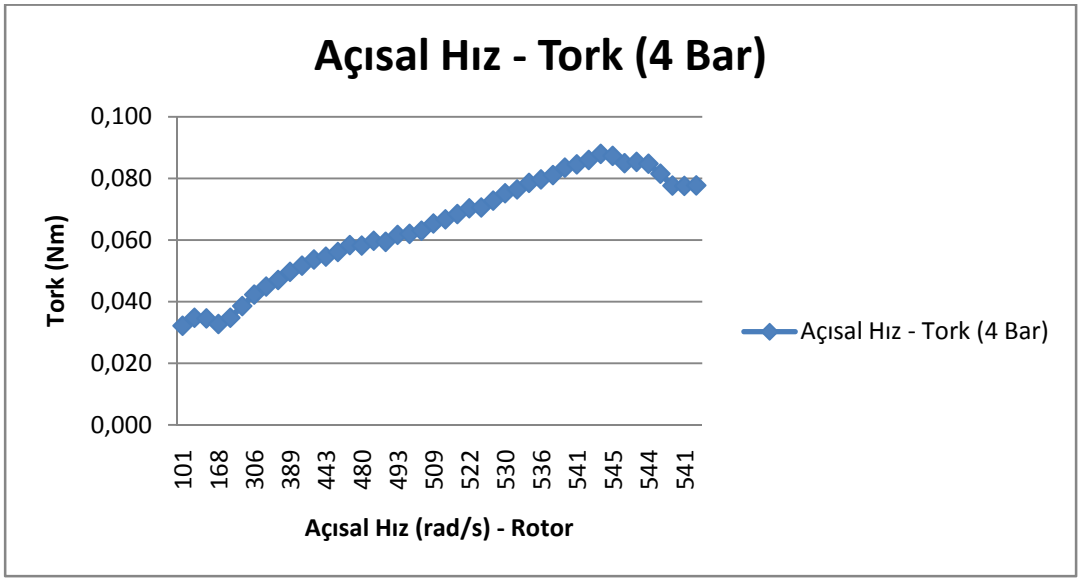
Deneyler sırasında generatör – rotor takımı verimi sabit bir değer olarak kabul edilmiş ve ölçülen generatör gücü bu değere bölünerek mekanik güç hesaplanmıştır. Bu değer 0.75 olarak kabul edilmiştir.

Akışkandan elde edilebilecek maksimum gücü; izentropik genleşme durumundaki özgül entalpi farkini, hacimsel debiyi debinin ölçüldüğü sıcaklık ve basınçtaki özgül hacime bölerek elde ettiğimiz kütlesel debi değeri ile çarparak buluruz. Verimlilik hesaplarında elde edilen bu güç değeri kullanılır. Daha sonra generatörde ölçülen güç değeri akışkan tarafından türbine aktarılan bu güç değerine bölünerek verim değerine ulaşılır. Şekil 4.17'de 4 bar Debi – Güç grafiğini görmek mümkündür.



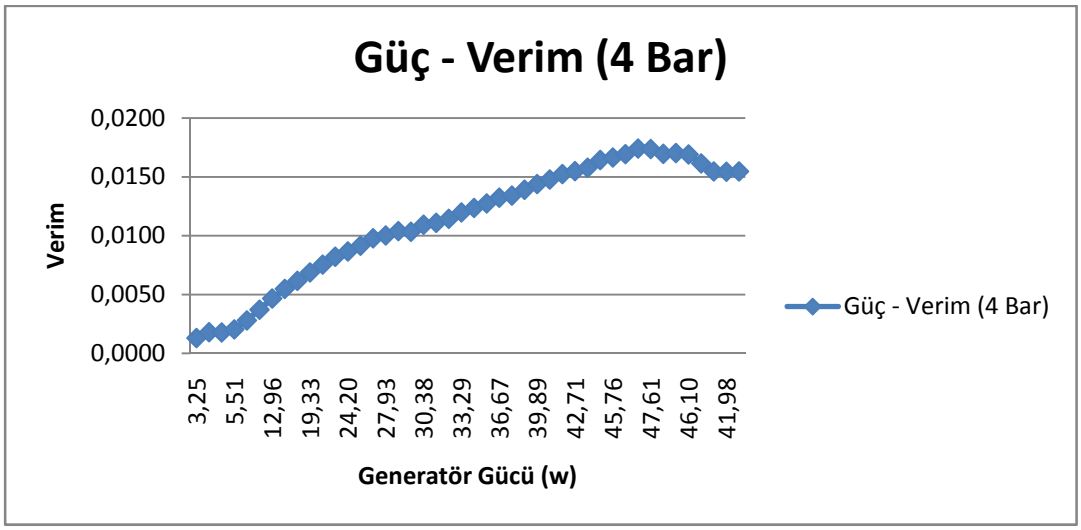

**Şekil 4.17 :** Debi – güç (4 Bar).

Şekil 4.18'de 4 bar Açısal hız – Tork grafiğini görmek mümkündür.



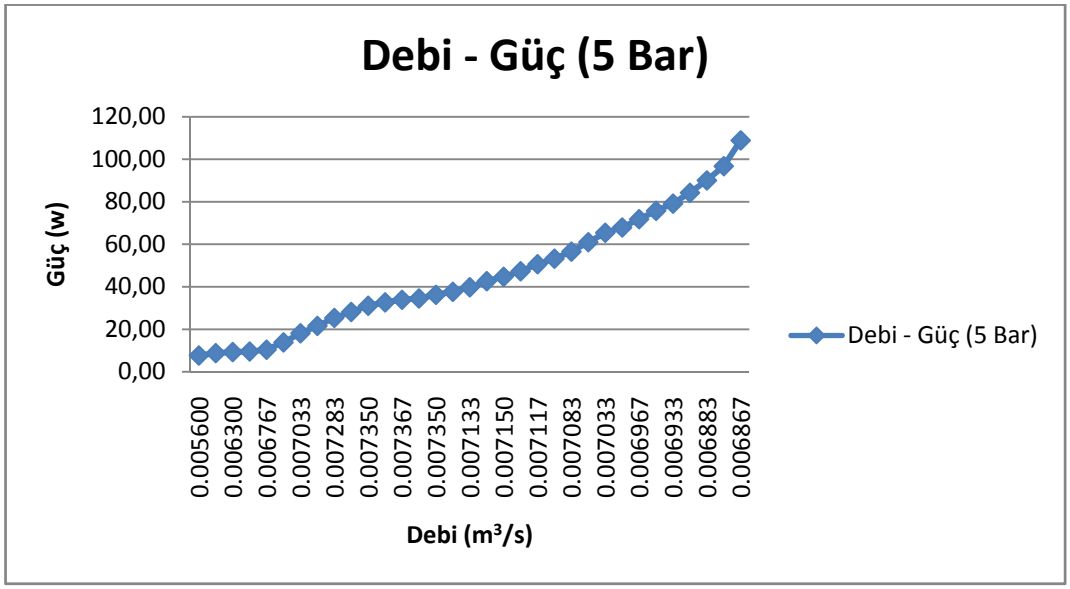

**Şekil 4.18 :** Açısal hız – tork (4 Bar).

Şekil 4.19'de 4 bar Güç – Verim grafiğini görmek mümkündür. Açısal hız arttıkça tork değerinin belirli bir değere kadar arttığı görülmektedir



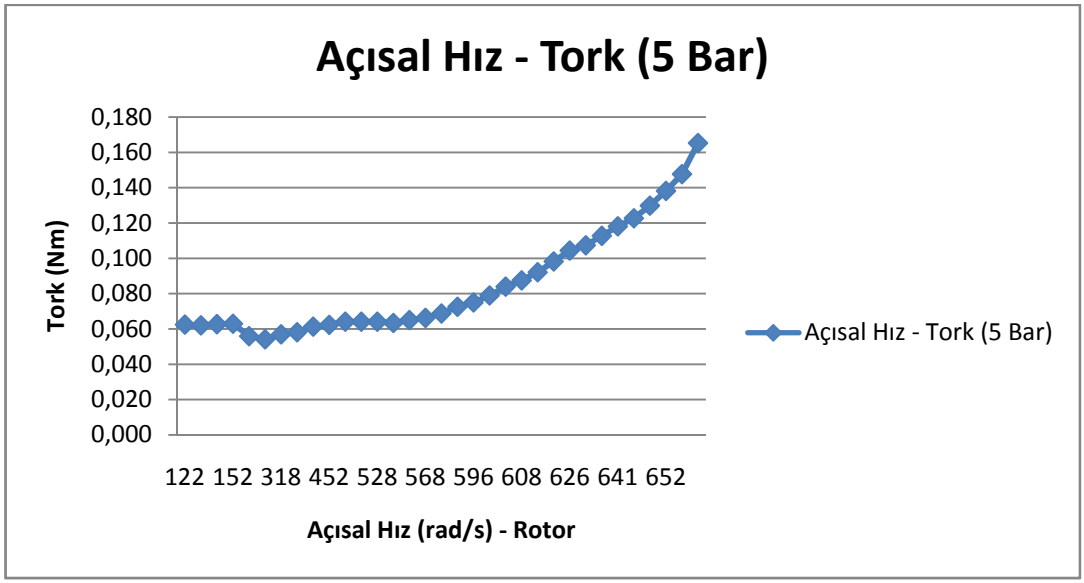

**Şekil 4.19 :** Güç – verim (4 Bar).

Şekil 4.20'de 5 bar Debi – Güç grafiğini görmek mümkündür.



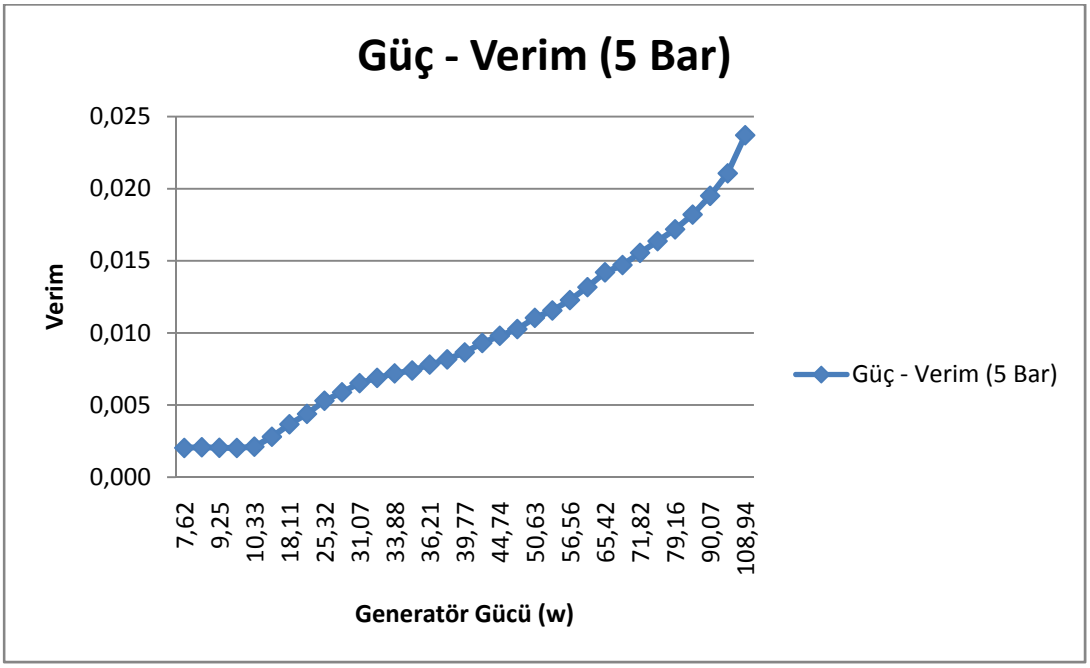

**Şekil 4.20 :** Debi – güç (5 Bar).

Şekil 4.21'de 5 bar Açısal hız – Tork grafiğini görmek mümkündür. Debi artışı ile güç değerinin arttığı görülmektedir.



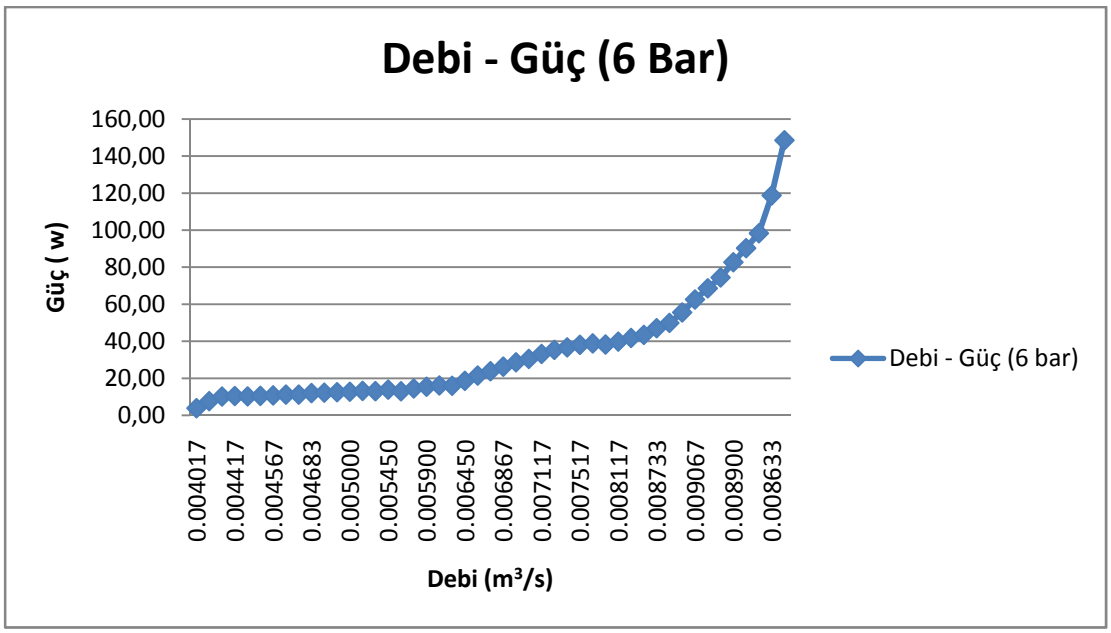

**Şekil 4.21 :** Açısal hız – tork (5 Bar).

Şekil 4.22'de 5 bar Güç – Verim  grafiğini görmek mümkündür.



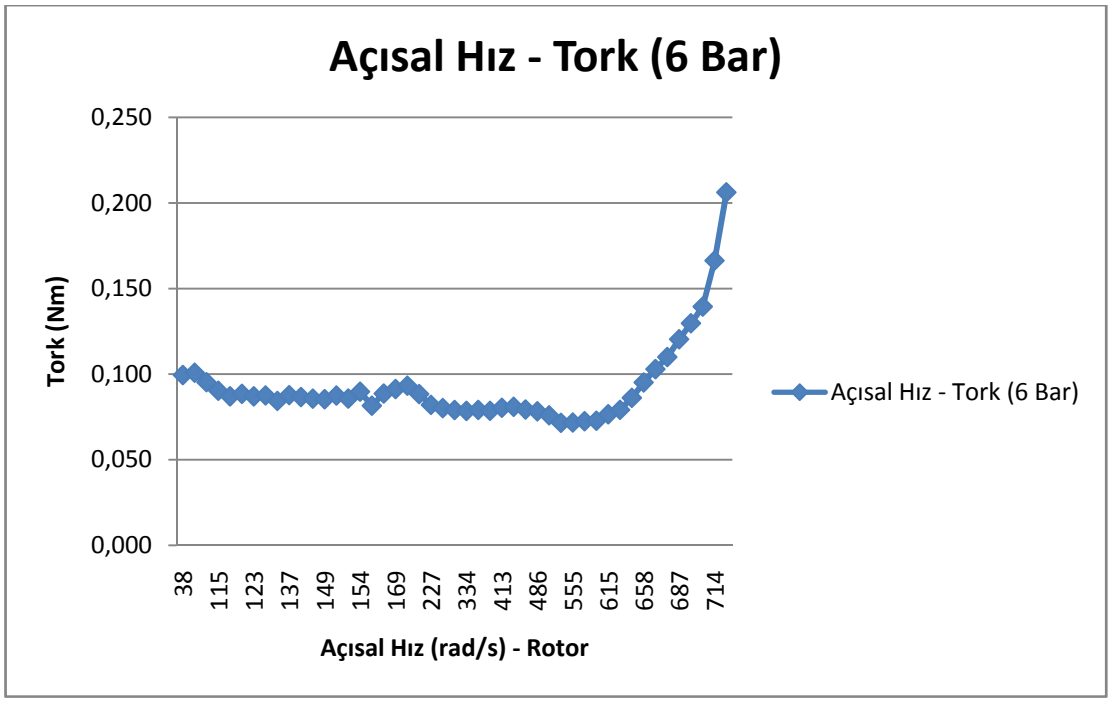

**Şekil 4.22 :** Güç – verim (5 Bar).

Şekil 4.23'de 6 bar Debi – Güç grafiğini görmek mümkündür.



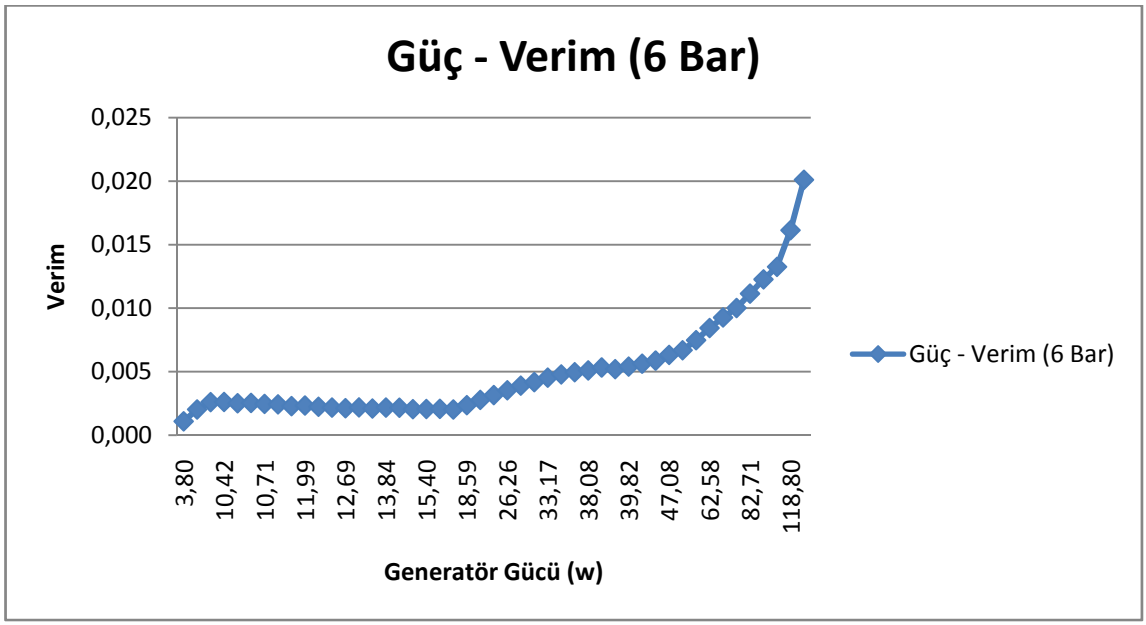

**Şekil 4.23 :** Debi – güç (6 Bar).

Şekil 4.24'de 6 bar Açısal Hız – Tork grafiğini görmek mümkündür.




**Şekil 4.24 :** Açısal hız – tork (6 Bar).

Şekil 4.25'de 6 bar Güç – Verim grafiğini görmek mümkündür. Güç artışı ile verim artmaktadır.




**Şekil 4.25 :** Güç – verim (6 Bar).

# 6.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında bir tesla türbini projelendirilmiş tasarlanmış ve üretilmiştir. Önerilen yeni dizaynın esnekliği bileşenlerin birleştirilmesi sırasında denemek mümkün olmuştur ve getirdiği kolaylıklar anlaşılmıştır.

Yapılan sonlu elemanlar analizleri sayesinde üretilen tasarımın güvenli olduğuda tespit edilmiştir. Üretim sırasında yapılan optimum kesme parametreleri, bundan sonra Alüminyum 7075 ile üretilecek tesla türinleri için büyük kolaylık sağlamıştır. Yaratılan G Kodların Mach 3'de veya başka bir CNC kontrol programında çalıştırılması ile türbin bileşenlerinin hızlı ve iyi yüzey kalitesine sahip bir şekilde üretilmeleri mümkün olacaktır.

Tesla türbininin üretilmesi sırasında karşılaşılan en büyük zorluk nozul deliklerinin delinmesi olmuştur. İnce delici uçların kullanıldığı bu denemelerde, delik uzunluklarının fazla olması bir dezavantaj oluşturmuştur. İnce delici uçlar bu delikleri delememiş ve kırılmalar yaşanmıştır.

Bundan sonra yapılacak bir iyileştirme nozul geometrisini değiştirip, uzun ince delikler açmaktan kaçınmak olabilir. Kısaca nozullar yine aynı prensiple çalışacaktır ancak üretim kolaylığı sağlanacaktır.

Üretilen ilk protoptip 4, 5 ve 6 barlık basıçtaki azot gazı ile denenmiştir. Basınç sabitlendikten sonra generatör üzerindeki yük kademeli olarak arttırılmıştır. 4 ve 5 barlık denemelerde beklenen sonuçlara yaklaşılmıştır ve debi arttıkça gücün arttığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde açısal hızın artması ile torkun artması da beklenmektedir. 7 barlık denemede ise akışkan hızının artmasına bağlı olarak bazı farklılıklar gözlemlemek mümkündür. Bu farklılıklar muhtemel türbülanslara dayandırılabilir.

Türbin dizaynı ile elde edilen diğer bir sonuç ise nozul delik açıları ile ilgilidir. Nozul delikleri belirli bir açı ile türbine girmelidir. Deneylerde kullanılan nozul 45 derecelik bir açıya sahiptir.

Türbin yatağı dizaynını ise küçültmenin bazı avantajları olabilir. Öncelikle daha kısa nozullar üretmenin avantajlarından faydalanılabilir. Ayrıca türbin içerisine püskürtülen akışkan daha iyi sıkıştırılabilir.

Nozul dizaynında, nozul uç kısmı daha aerodinamik tasarlanabilir. Bu nozul uç kısmına belirli bir yarıçapla şekil vererek mümkün olabilir.

Şaft yapısı ile ilgili olarak ise çift taraflı yataklama kullanmak daha yüksek devirlere çıkmada kolaylık sağlayabilir. Bu teze konu olan tesla türbini prototipinde tek taraflı yataklama tercih edilmiş idi. Böyle bir yapıda disklerin sabitlenmesi tam olarak yapılmalıdır aksi taktirde şaft üzerinde oluşan momente bağlı olarak şaftda bazı kaçıklıklar söz konusu olabilmektedir.

Akışkan basıncı mümkün olduğunca sabit tutulmalıdır aksi taktirde hatalı veri toplama ihtimali ortaya çıkabilir. Teze konu olan denemelerde küçük bir tanka sahip bir hava kompressörü yerine daha sabit bir basınça sahip olan azot tankı kullanılmıştır.

Hava kaçaklarının önlenmesinde kullanılan sıvı teflon ve conta başarılı sonuç vermiştir, budan sonraki üretim denemelerinde de kullanılabilir.

## KAYNAKLAR


[1] **Blanchard, Danny., Ligrani, Phil., Gale, Bruce.,** 2005: Single-disk and double-disk viscous micropumps, *Sensors and Actuators.*, **122**, 149–158.

[2] **Cairns, W.M.J.**, 2001. The tesla disc turbine, Camden Miniature Steam Services, U.K.

**[3] Çengel, Yunus A., Boles Michael A.,** 1994. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodianmik, New York, USA

[4] **Engin, Tahsin., Özdemir, Mustafa., Çesmeci, Sevki.,** 2009: Design, testing and two-dimensional flow modeling of a multiple-disk fan, *Experimental Thermal and Fluid Science.*, **33**, 1180–1187.

[5] **Miller, Gerald E., Fink Rainer., Tao-Ping Liu.,** 1999: Performance characteristics of a multiple-disk centrifugal pump, *Artificial Organs.*, **23**, 559–565.

**[6] Munson, Bruce., Young, Donald., Okiishi, Theodore.,** 2006. Fundamentals of Fluid Mechanics,

[7] **Roddy, P. J., Darby, R., Morrison G. L.,** 1987: Analysis of optimal design configurations gor a multiple disk centrifugal blood pump, *Journal of Fluids Engineering.*, **109**, 51.

[8] **Soong, Chyi-Yeou., Wu, Chang-Chie., Liu, Tung-Ping., Liu, Tao-Ping.,** 2003: Flow structure between two co-axial disks rotating independently, *Experimental Thermal and Fluid Science.*, **27**, 295–311.

[9] **Spittle, Peter.,** 2003. Gas turbine technology, *Physics Education*, **38** (6)

[10] **Tsai, Y.S., Changa, Y.M., Changb, Y.J., Chen, Y.M.,** 2007: Phase-resolved PIV measurements of the flow between a pair of corotating disks in a cylindrical enclosure, Journal of Fluids and Structures., 23, 191–206.

[11] **Url-1** <*http://arsiv.mmo.org.tr/pdf/10945.pdf*>, alındığı tarih 04.02.2010.

[12] **Url-2** <*http://www.emo.org.tr/ekler/4986d86a17424ee_ek.pdf*>, alındığı tarih 04.04.2010.

[13] **Url-3** <*http://www.power.alstom.com/home/new_plants/gas/products/gas_ turbines/_files/file_39930_12782.jpg*>, alındığı tarih 05.02.2010.

[14] **Url-4** <*http://www.seabirdadventure.com/images/tesla-turbine.jpg*>, alındığı tarih 04.02.2010.

[15] **Url-11** < *http://www.td.mw.tum.de/tum-td/de/forschung/themen/thermo_osci_ annular/Fig1*>, alındığı tarih 04.02.2010.

[16] **Url-12** < *http://tr.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla*>, alındığı tarih 17.02.2010.

**EKLER**

**EK A.1 :** Alüminyum 7075 Malzeme Özellikleri
**EK A.2 :** Dijital Komparator Kalibrasyon Sertifikası
**EK A.3 :** Salgı Tip Komparator Kalibrasyon Sertifikası
**EK A.4 :** CNC G ve M Kodları
**EK A.5 :** Kullanılan CNC Router
**EK A.6 :** Kullanılan Kimyasallar

**EK A.1**

# Hassas İşlenmiş Alüminyum Alaşım Levha

## 7075* Özel

Özellikle yüksek dayanım isteyen uçak parçaları, makine parçaları ve alet endüstrisi için geliştirilmiş, yüksek kalitede dökülmüş ve hassas bir şekilde işlenmiş levha.

### > Avantajları

Mükemmel işlenebilme özelliği, yüksek dayanıklılık değerleri, düzgün ve homojen mikro-yapı, yüksek termal iletkenlik.







### >Mekanik Özellikleri

| | | |
|---|---|---|
| Akma mukavemeti $R_{p0,2}$ | [MPa] | 470 |
| Max. çekme dayanımı $R_m$ | [MPa] | 530 |
| Uzama $A_5$ | [%] | 6 |
| Sertlik HBW | | 165 |

### >Fiziksel Özellikleri

| | | |
|---|---|---|
| Yoğunluk | [g/cm³] | 2,80 |
| Esneklik modülü | [GPa] | 71 |
| Elektriksel geçirgenlik | [m/Ω·mm²] | 19-23 |
| Isıl genleşme katsayısı | [10⁻⁶/K] | 23,4 |
| Isı geçirgenliği | [W/m·K] | 130-160 |
| Özgül ısı kapasitesi | [J/kg·K] | 862 |

### >İşlenme Özellikleri

| | |
|---|---|
| Makinede işlenebilirlik | mükemmel |
| Eloksallık | iyi |
| Korozyon direnci | iyi |
| Aşındırma | mükemmel |

### > Uygulama Alanları

Hassas parçalar, uçak parçaları yapımı, kalıp sektörü (Plastik enjeksiyon, termoform, şişirme), prototip-model uygulamaları, savunma sanayi, ilaç sanayi, robot teknolojisi, çeşitli makine ve tezgah için yedek parça üretimi, otomotiv sektörü.

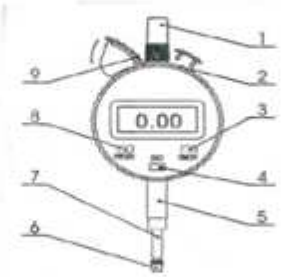
*Hassas tam değerler için işlem görmüş

**Şekil A.1 :** Alüminyum 7075 Malzeme Özellikleri

**EK A.2**

DİJİTAL İNDİKATÖR ÖZELLİKLERİ VE KALİBRASYON SERTİFİKASI

| Ölçme Aralığı | Resolüsyon |
|---|---|
| 0-10mm/0.4" | 0.01mm/0.0005" |
| 0-12.7mm/0.5" | 0.01mm/0.0005" |
| 0-10mm/0.4" | 0.001mm/0.00005" |
| 0-12.7mm/0.5" | 0.001mm/0.00005" |







**Şekil A.2 :** Dijital Komparator Kalibrasyon Sertifikası

**EK A.3**

SALGI TİP İNDİKATÖR ÖZELLİKLERİ
VE KALİBRASYON SERTİFİKASI

**Farklı Ölçümler için Asıl Değer**

0.000mm (range: 0-25mm), 25.000mm (range: 25-50mm),
50.000mm (range: 50-75mm), 75.000mm (range: 75-100mm),
100.000mm (range: 100-125mm), 0.30000in/7.620mm (range: 0.3-1.3"/7.62-30mm)

**Resolüsyon** 0.001mm/0.00005in




**Şekil A.3 :** Salgı Tip Komparator Kalibrasyon Sertifikası

**EK A.4**

- **CNC G ve M Kodları**

  G00 Hızlı hareket

  G01 Doğrusal ilerleme, Kesme ilerlemesi

  G02 Saat yönünde dairesel hareket CW

  G03 Saat yönünün tersi yönünde dairesel hareket CCW

  G04 Geçici durma

  G15-G16 Dik işlem merkezinde polar koordinat sistemi. G16' girildikten sonra Y ekseni açı, X ekseni ise yarıçap değerlerine dönüşür

  G17 XY Düzlemini seç

  G18 ZX Düzlemini seç

  G19 YZ Düzlemini seç

  G20 INCH ölçü sistemine geç

  G21 MM ölçü sistemine geç

  G28 Referans noktasına gidiş

  G33 Diş çekme döngüsü

  G40 Takım Telafisi iptali

  G41 Takım yarıçapının veya uç yarıçapının sol telafisi

  G42 Takım yarıçapının veya uç yarıçapının sağ telafisi

  G50 Kesme hızı sınıflandırması için kullanılır

  G53 Sıfır kaydırmanın iptali

  G54-G57 İş parçası sıfırları

  G70-G79 Tornalamada tekrarlanan işlemlerin seçimi için kullanılır

  G80 Delik döngüsünün iptali

  G81 Delik delme döngüsü

  G82 Delik dibinde durma ile matkapla bir çok deliği delme

  G83 Birden fazla pasoda matkapla bir çok delik delme

  G84 Bir çok delikte vida açma

  G85 Borverg ile bir çok delik işleme

  G90 Mutlak koordinat sisteminde programlama (Absolute)

  G91 Eklemeli koordinat sisteminde programlama (Incremental)

  G96 Kesme hızının (S) m/dk olarak verilmesi

G97 Kesme hızının (S) dev/dk (Rpm) olarak verilmesi

G98 İlerleme hızının (F) mm/dk olarak verilmesi

G99 İlerleme hızının (F) mm/dev olarak verilmesi

**M Kodlar**

M00 Programın geçici olarak durması, makine startına basılana kadar tezgah eksenleri durur

M01 Programın istek üzerine kontrol panosundan elle durdurulması

M02 Program Sonu

M03 İş milini saat yönünde (CW) çevir

M04 İş milinin saat ibresinin ters yönünde (CW) dönmesi

M05 İş milinin durması

M06 Takım değiştirme

M08 Soğutma sıvısını aç

M09 Soğutma sıvısını kapat

M13 İş milini saat ibresi (CW) yönünde döndür ve soğutma sıvısını aç

M14 İş milini saat yönünün tersi (CCW) yönünde döndür ve soğutma sıvısını aç

M19 İş mili orient konumu

M30 Program sonu ve başa dönüş

**EK A.5**




**Şekil A.5 :** Sieg KX3 CNC Dik İşleme Merkezi

**EK A.6**




(a)




(b)

**Şekil A.6 :** Kullanılan Kimyasallar (a) Sızdırmazlık. (b) Soğutma Solüsyonu



**ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad:** FAZLI NALCI

**Doğum Yeri ve Tarihi:** İSTANBUL 30/10/1984

**Adres:** Akenerji Elektrik Üretim A.Ş. Miralay Şefik Bey Sokak. Ak Han No:15 Gümüşsuyu / İstanbul

**Lisans Üniversite:** Koç Üniversitesi

**2002 – 2007** **Koç Universitesi**, İstanbul, Türkiye Makine Mühendisliği, Lisans.

**Temmuz -Ağustos 2003** **Ludwig Maximilians Universitesi**, Munih, Uluslararası Alman Kültür ve Dili Yaz Okulu

**1998-2002** **Antalya Anadolu Lisesi**, Antalya.