

SESÜSTÜ TÜRBİN TASARIMI



Salih Deniz DEVELİ

11.09.2019

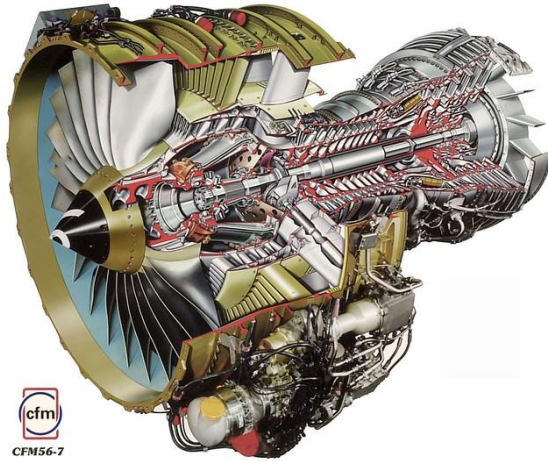
Danışman: Prof. Dr. Erkan AYDER

İÇERİK

- ① Giriş
- ② Literatür Araştırması - Turbin Statoru (Lülesi) Tasarım Parametreleri
- ③ Literatür Araştırması - Turbin Rotoru Tasarım Parametreleri
- ④ Literatür Araştırması - Kayıp Mekanizmaları
- ⑤ Literatür Araştırması - HAD Analizleri
- ⑥ Tasarım Aşamaları
- ⑦ HAD ile Türbin Akış Analizleri
- ⑧ Değerlendirme ve Öneriler

1 GİRİŞ

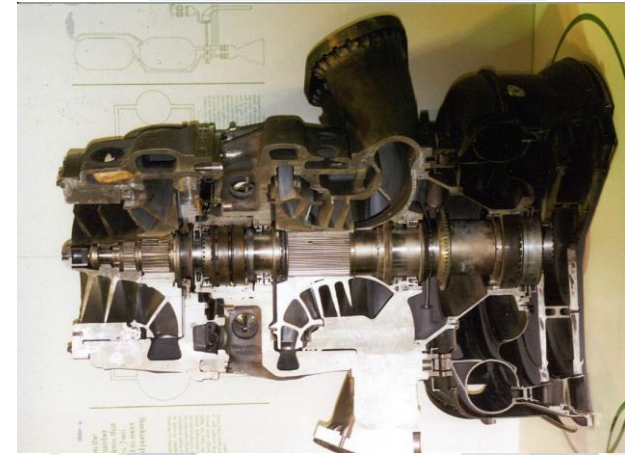
➤ Gaz Türbinli Motor




CFM56-7

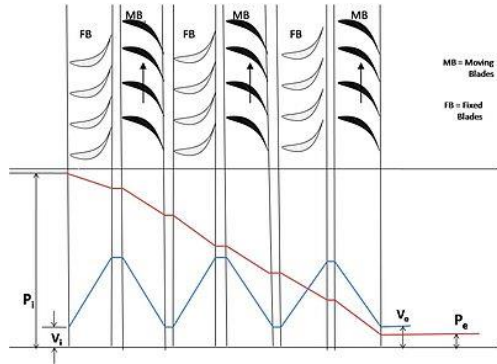


➤ Sıvı Yakıt ve Sıvı Oksijenli Motor

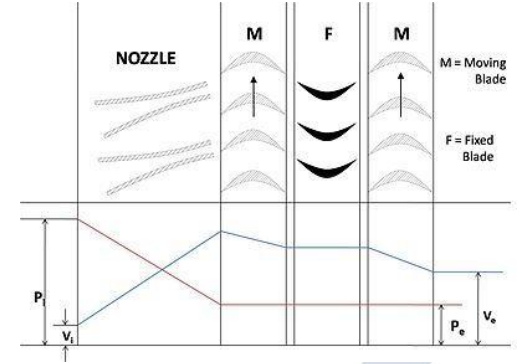
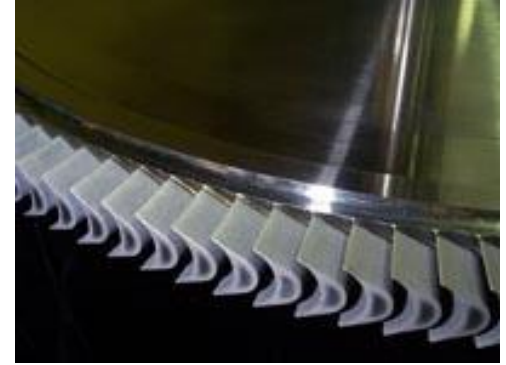


GAZ TÜRBİNLİ MOTORLARDA KULLANILAN TÜRBİNLER

➤ Reaksiyon Tipi



➤ Aksiyon Tipi

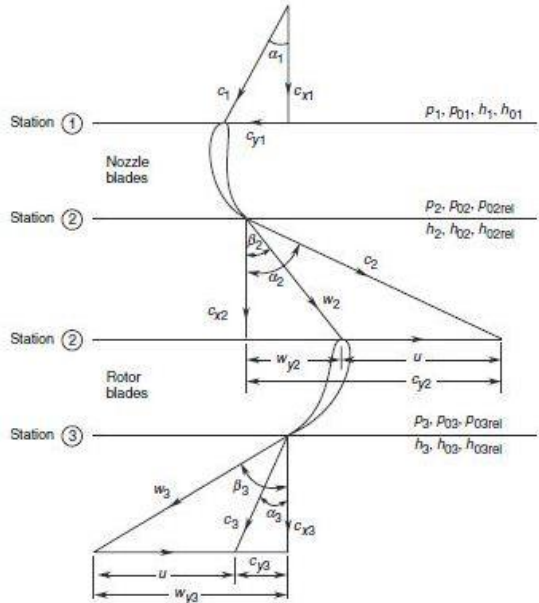


Kaynak: <https://www.pesmedia.com/wp-content/uploads/2016/03/software-improves-blisk-and-turbine-blade-machining.jpg>

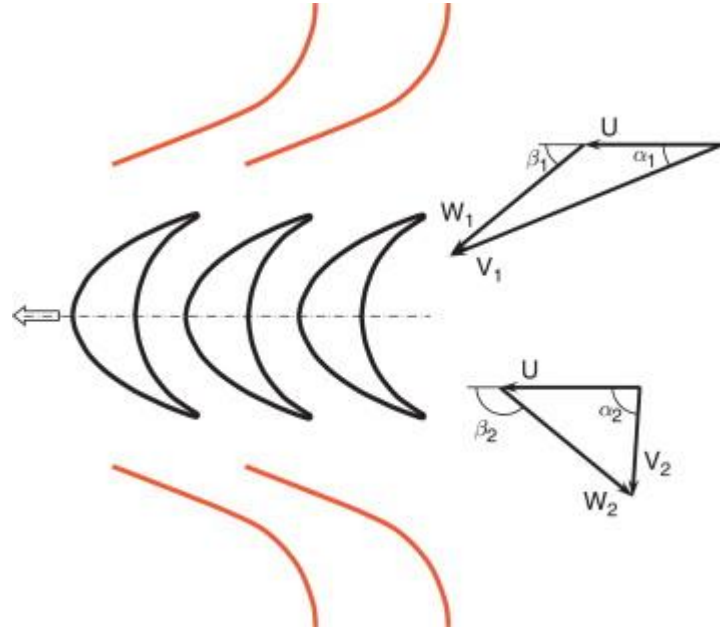
https://www.barber-nichols.com/sites/default/files/wysiwyg/images/axial_flow_impulse_turbine.jpg

GAZ TÜRBİNLİ MOTORLARDA KULLANILAN TÜRBİNLER

➤ Reaksiyon Tipi



➤ Aksiyon Tipi



Kaynak: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/52/Velocity_triangle_for_an_axial_turbine_stage.jpg

NEDEN AKSİYON TİPİ TÜRBİN?

Reaksiyon tipi türbinin avantajları;

- Enerji dönüşümü stator ve rotorda bölüşerek yapılmakta.
- Türbin statoru ve rotoru içerisinde genellikle sesaltı akış.
- Daha yüksek verim.

Reaksiyon tipi türbinin dezavantajları;

- Çok kademeli olmasından dolayı karmaşık konstrüksiyon.
- Hacimsel olarak büyük boyutlara sahip

Aksiyon tipi türbinin avantajları;

- Tek kademedeki yüksek enerji dönüşümü.
- Daha basit konstrüksiyon.
- İmal edilebilirliği kolay.
- Hacimsel olarak küçük boyutlara sahip

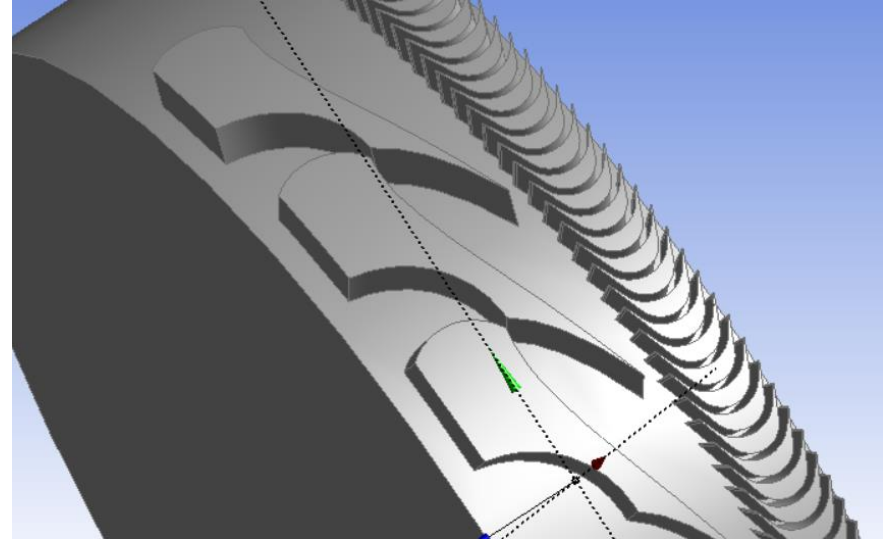
Aksiyon tipi türbinin dezavantajları;

- Türbin lülesi ve rotoru içerisinde sesüstü akış.
- Görece daha düşük verim.

➤ Full Üflemeli



➤ Kısmi Üflemeli

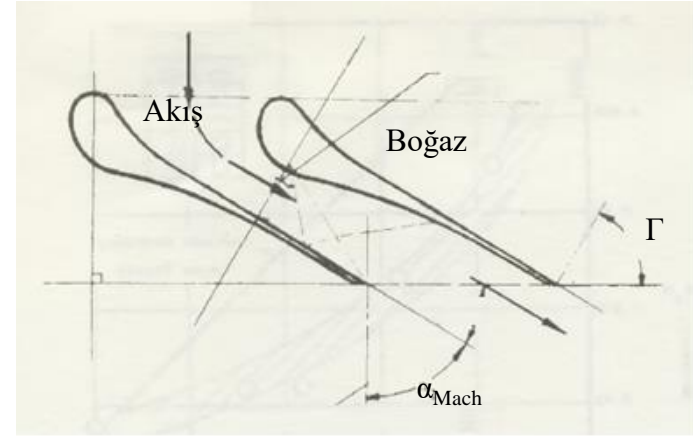
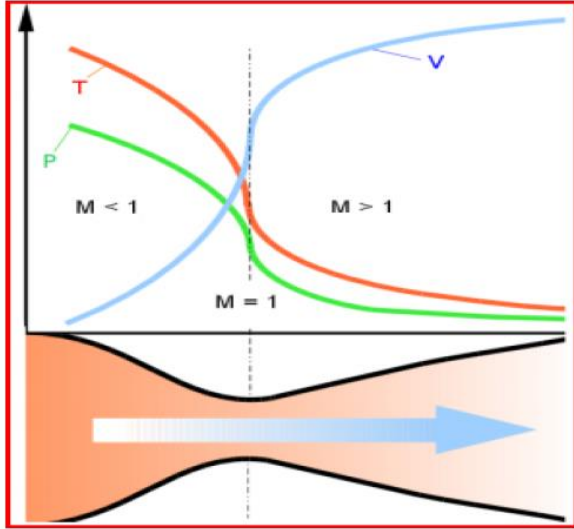


Özellikle düşük debi gereksinimlerinde rotor kanat boylarının imal edilebilir düzeyde olabilmesi için kısmi üfleme kullanılmaktadır.

② LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Türbin Statoru (Lülesi) Tasarım Parametreleri

Lülenin Eksenel Uzunluğu



- Lülenin yakınsak kısmında sesaltı akış
- Boğazda ses hızı
- Lülenin ıraksak kısmında sesüstü akış

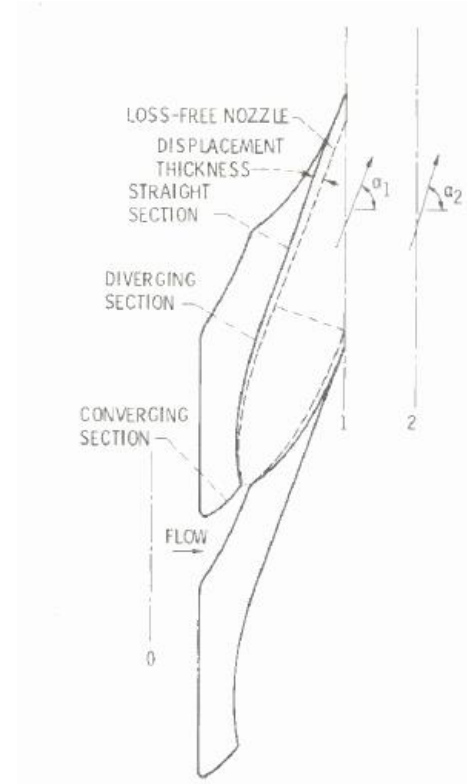
- $\alpha_{Mach} + \Gamma = 90^\circ$
- Akış ayrılması yaşanmaması için; $\alpha_{Mach} < \Gamma$ olana kadar lülenin boyu uzatılmalıdır.

Kaynak: Khan, M.A., Sardival, S.K., Sharath M.V.S. & Chowdary, H. (2013). Design of a Supersonic Nozzle Using Method of Characteristics, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol.2 Issue 11, 19-24.

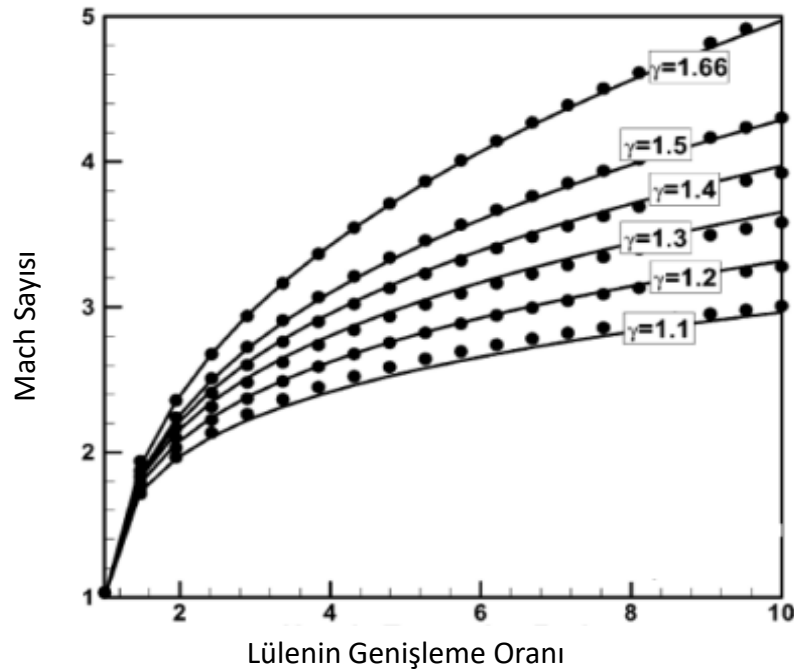
Fruchtman, E. (1972). The Supersonic Türbine – A Desing and Cascade Study, *The American Society of Mechanical Engineers Publication (ASME)*, 71-GT-76.

Sınır Tabaka

- Sınır tabakanın ince olması lüle içerisindeki kayıpları en aza indirgeyecektir.
- Basıncın azaldığı bölgede sınır tabaka ince olacaktır. Bu da lüle içerisindeki Mach sayısının sabit olduğu bölgenin küçük olduğunu tasarımın en doğru olduğunu söylemektedir.
- Sibulkin'e göre sınır tabaka kalınlığı; displacement kalınlığının $(2h+w)/w$ katından fazla olmalı.



Lüle Alanı ve Mach Sayısı Arasındaki İlişki



$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M^2} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right) \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}$$

$$M = \left(k_1 \frac{A}{A^*} + (1 - k_1) \right)^{k_2}$$

$$k_1 = 218,0629 - 243,5764\gamma + 71,7925\gamma^2$$

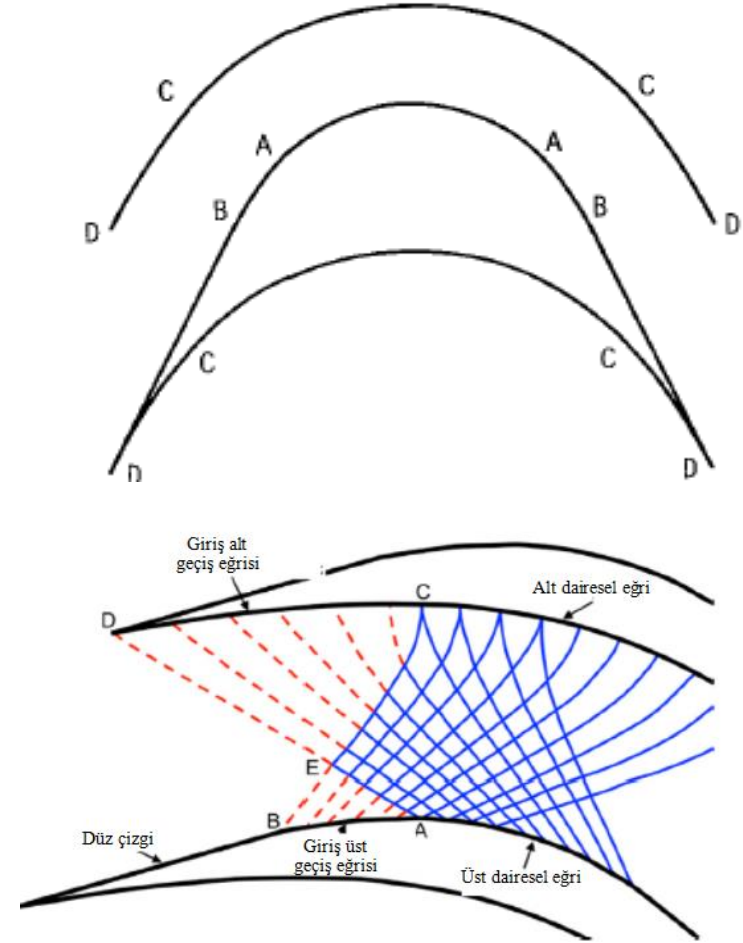
$$k_2 = -0,122450 + 0,281300\gamma$$

Kaynak: Grujicic, M., Zhao C.L., Tong, C., DeRosset, W.S. & Helfritch D. (2004). Analysis of the Impact Velocity of Powder Particles şn the Cold-Gas Dynamic-Spray Process, *Material Science and Engineering A368*, Elsevier B.V., 222-300.

3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Türbin Rotoru Tasarım Parametreleri

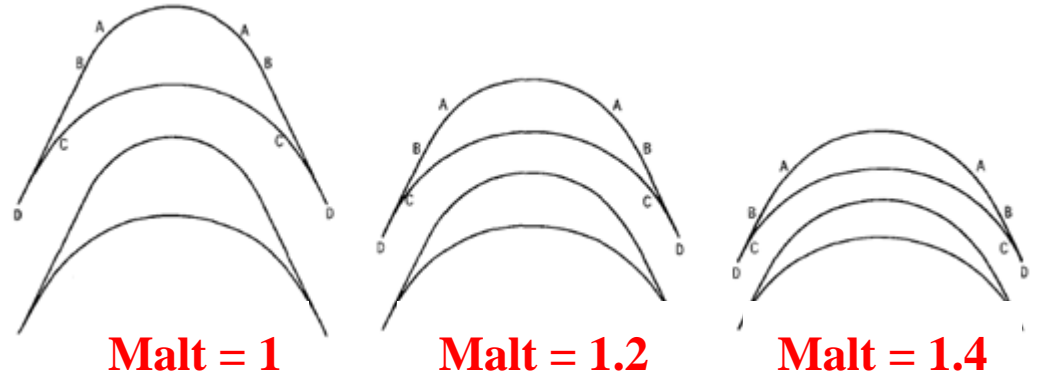
- Giriş geçiş eğrileri (AB üst geçiş eğrisi, CD alt geçiş eğrisi)
- Dairesel eğriler (AA ve CC dairesel eğriler)
- Çıkış geçiş eğrileri (AB üst geçiş eğrisi, CD alt geçiş eğrisi)
- BD düz çizgi



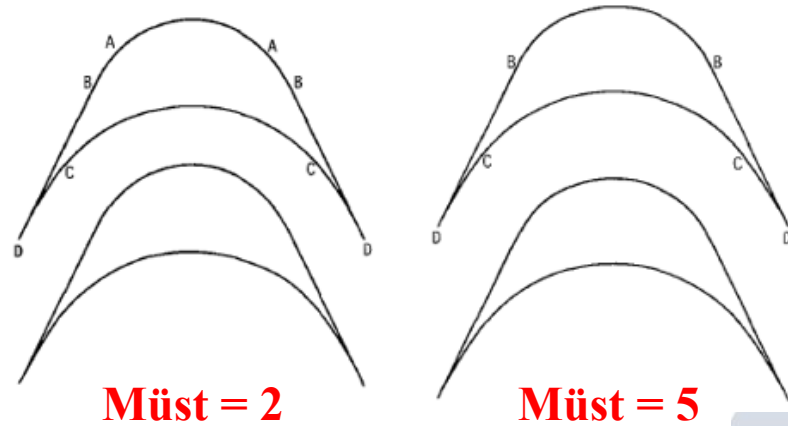
Kaynak: Paniagua, G., Iorio, M.C., Vinha, N. & Sousa, J. (2014). Design and Analysis of Pioneering High Supersonic Axial Turbines, *International Journal of Mechanical Science*, Vol 89, 65-77.

Yüzey Mach Sayıları (Yüzey Prandtl-Meyer Açılı)ı

- Alt yüzey Mach sayısının kanat şekli üzerindeki etkisi



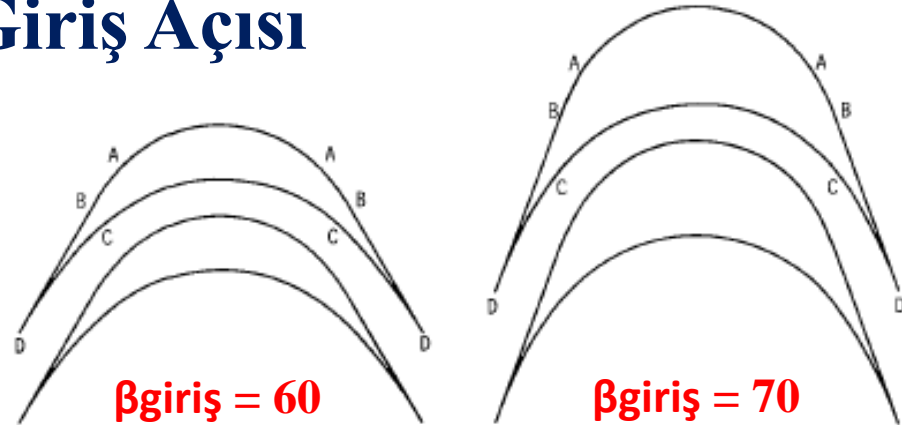
- Üst yüzey Mach sayısının kanat şekli üzerindeki etkisi



Kaynak: Goldman, L.J. (1968). Analytical Investigation of Supersonic Turbomachinery Blading: II – Analysis of Impulse Turbine-Blade Sections, NASA TN D-4422.

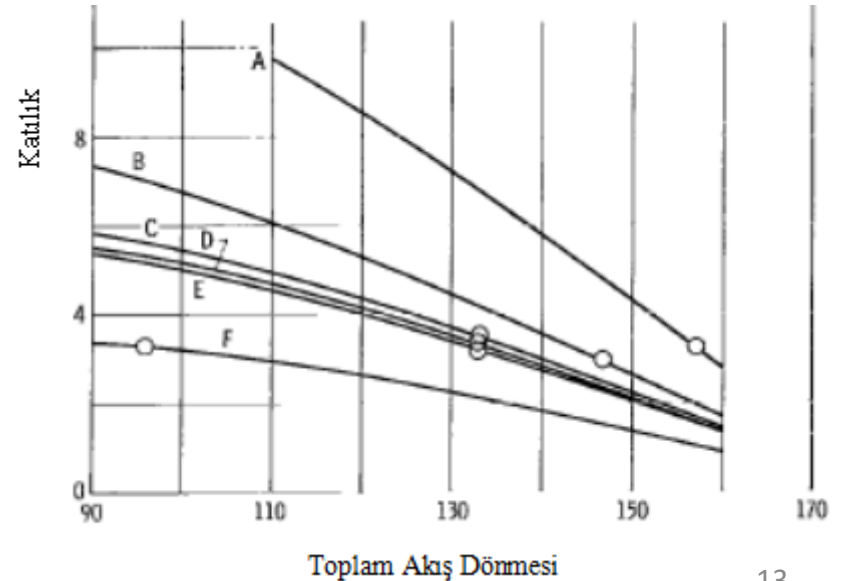
Giriş Açısı

- Aynı alt ve üst yüzey Mach sayısı (Prandtl- Meyer açısında) giriş açısı arttıkça daha kalın kanat ortaya çıkmaktadır.



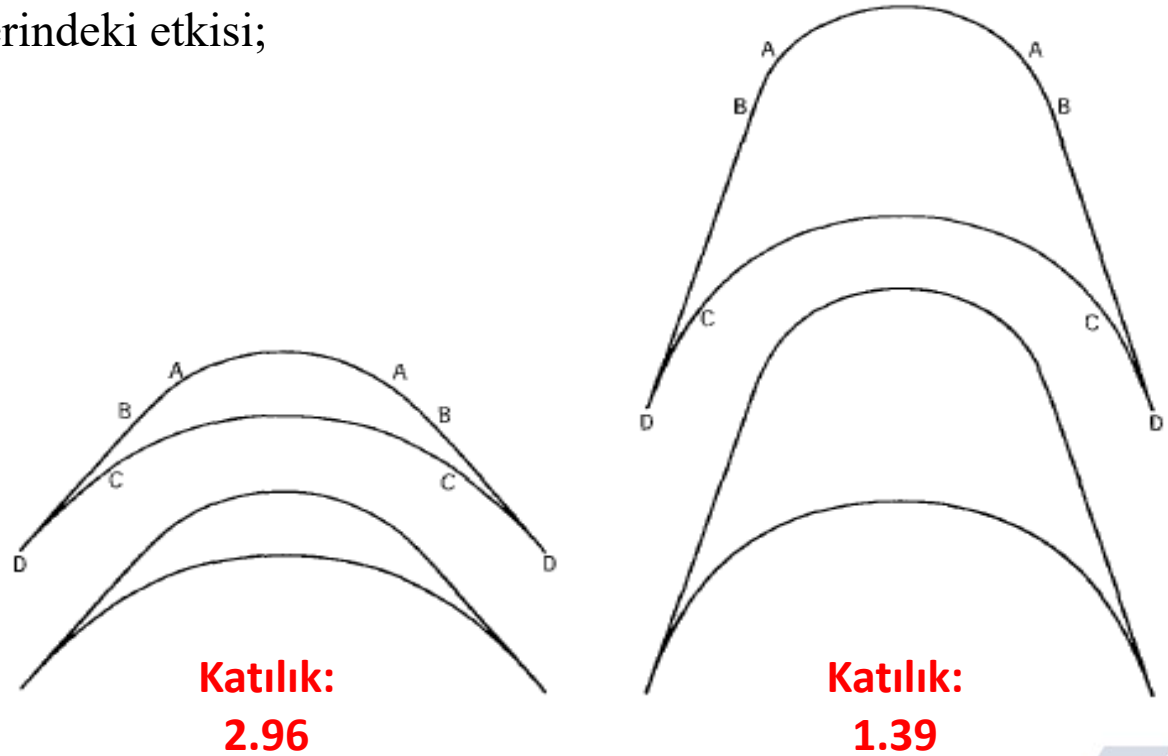
- Giriş açısının katılık üzerindeki etkisi;

	Giriş Prandtl-Meyer Açısı	Alt Yüzey Prandtl-Meyer Açısı	Üst Yüzey Prandtl-Meyer Açısı	Özgül Isıların Oranı
A	77	62	91	1.4
B	59	40	77	1.4
C	32	15	45	1.66
D	43	25	59	1.3
E	39	21	59	1.4
F	12	0	26	1.4



Katılık

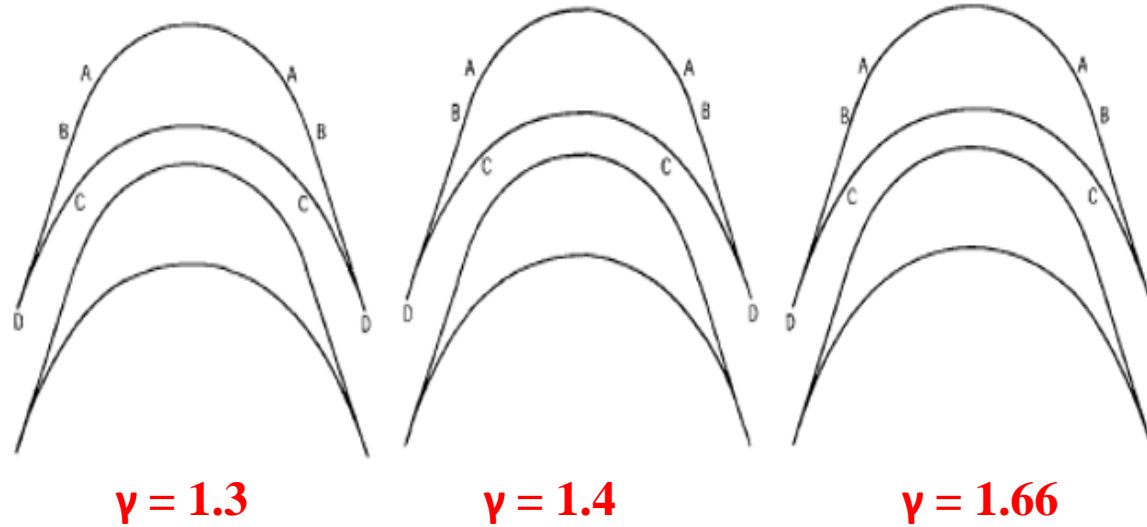
➤ Katılığın kanat şekli üzerindeki etkisi;



Kaynak: Goldman, L.J. (1968). Analytical Investigation of Supersonic Turbomachinery Blading: II – Analysis of Impulse Turbine-Blade Sections, *NASA TN D-4422*.

Gazın Özgöl Isılarının Oranı

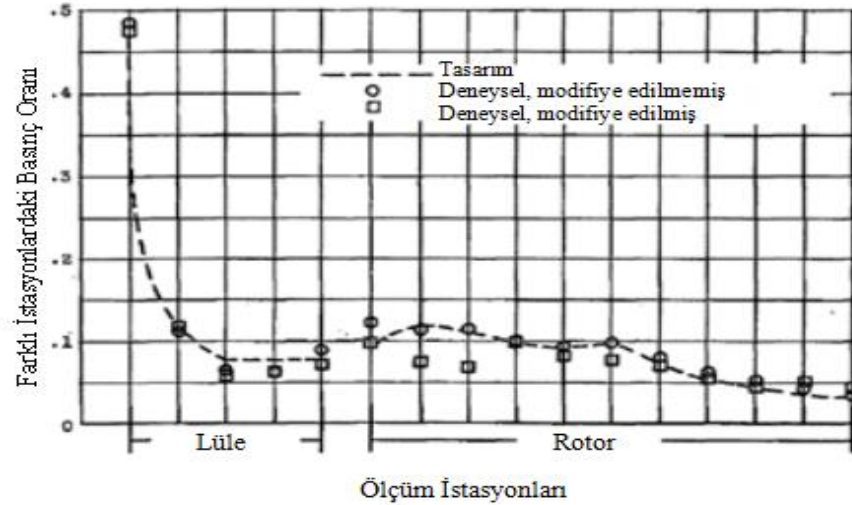
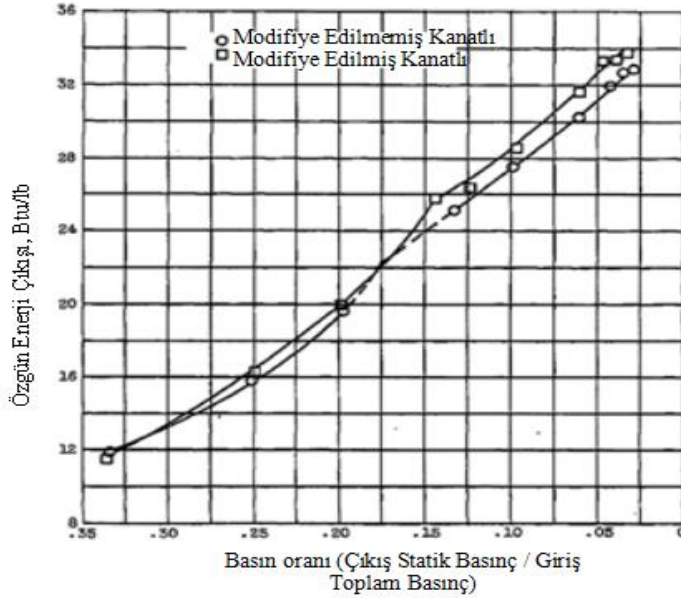
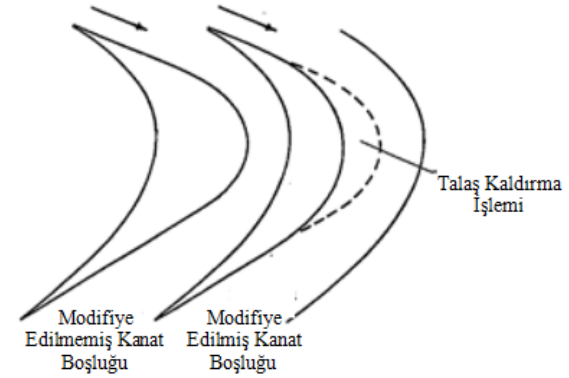
➤ Gazın özgül ısılarının kanat şekli üzerindeki etkisi;



Kaynak: Goldman, L.J. (1968). Analytical Investigation of Supersonic Turbomachinery Blading: II – Analysis of Impulse Turbine-Blade Sections, *NASA TN D-4422*.

Emme Yüzeyi Modifikasyonu

- Lüle çıkışındaki statik basıncı düşürmek için gerçekleştirilmektedir.



Kaynak: Moffitt, T.P. (1958). Design and Experimental Investigation of a Single-Stage Turbine with a Rotor Entering Relative Mach Number of 2, *NACA RM E58F20a*.

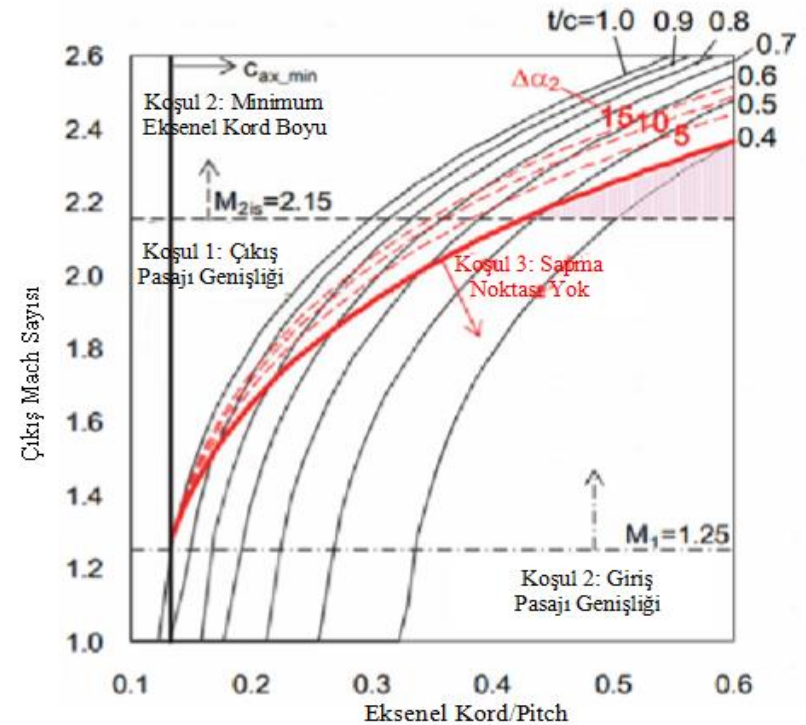
Eksenel Hız ya da Eksenel Mach Sayısı

- Bu terimler iki farklı karşıt eğilim gösterirler.
- Bilinen bir Mach sayısı için; eğer eksenel hız azalır; lüle çıkış açısı artacaktır. Bundan dolayı yüksek lüle boylarına ihtiyaç duyulacaktır.
- Başka bir taraftan ise; eksenel hızın dolayısıyla eksenel Mach sayısının artması, teğetsel hız bileşenini küçültecektir. Bu da türbinin verebileceği enerjinin düşmesine sebep olacaktır.
- Aynı zamanda eksenel mach sayısının sesaltı seviyede tutulması, giriş açısının ($\beta_{\text{giriş}}$) (bilinin giriş Mach sayısı için), $\arccos(1/M_{\text{giriş}})$ değerinden büyük olması gerekliliğini sunmaktadır. Örneğin $M_{\text{giriş}} = 2,5$ değeri için, $(\beta_{\text{giriş}})_{\text{min}} = 66,5^\circ$ olmaktadır. Yani eğer eksenel hız ses altı ise, giriş akış açısı $66,5^\circ$ 'den büyük olmak zorundadır.

İzin Verilebilir Tasarım Bölgesi

- Çıkış akış kanalı genişliği $A_{\text{çıkış}} = A_{\text{çıkış,iz}}$;
- Giriş akış kanalı genişliği $A_{\text{giriş}} = \text{boğaz} * s = t * \sin(\alpha_1)$;
- Basınç yüzeyinde ani bir dönüş noktasının olmaması.

$M_{\text{giriş}}$	$\beta_{\text{giriş}}$	$P_{\text{çıkış}}/P_{0,\text{giriş}}$	$M_{\text{çıkış,iz}}$	$\beta_{\text{çıkış,iz}}$
1,25	172,2	0,101	2,15	17,87



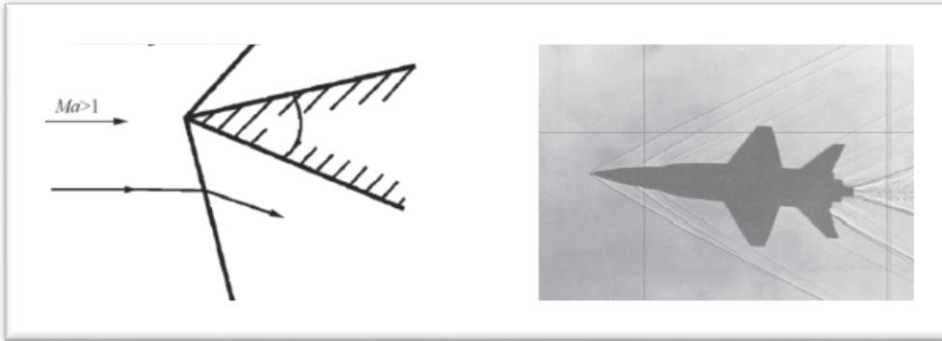
Kaynak: Senoo, S., Sakakibara, K., Kudo, T. & Shibashita, N. (2011). A Numerical Method for Turbulent Flows in Highly Staggered and Low Solidity Supersonic Cascades, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2011, GT2011-45450*, 1-12.

④ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kayıp Mekanizmaları

Şok Dalgaları

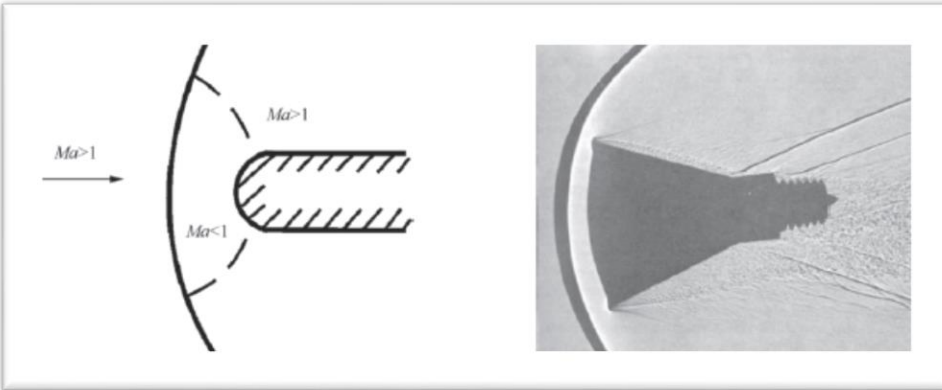
Kanat Ucuna Değen Şok Dalgası



➤ **Kanat ucuna değen şok dalgası:** Ses üstü bir akışın sivri bir köşeyle karşılaşması sonucu oluşur.

➤ **Kanat ucuna değmeyen şok dalgası:** Ses üstü bir akışın küt bir köşeyle karşılaşması sonucu oluşur.

Kanat Ucuna Değmeyen Şok Dalgası

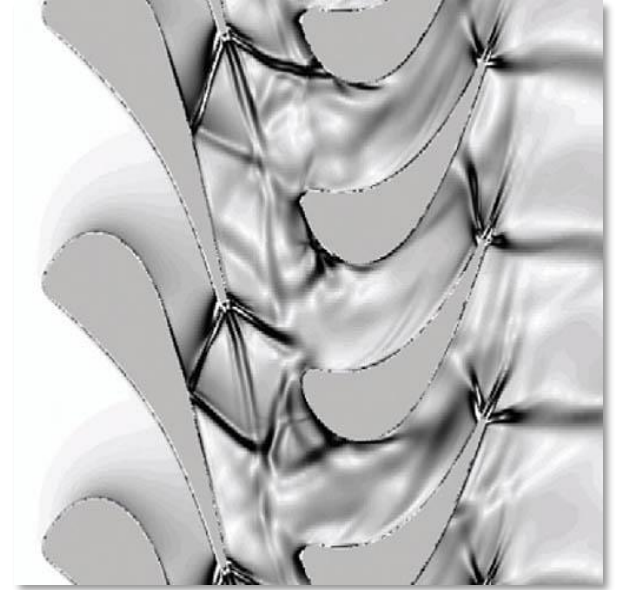
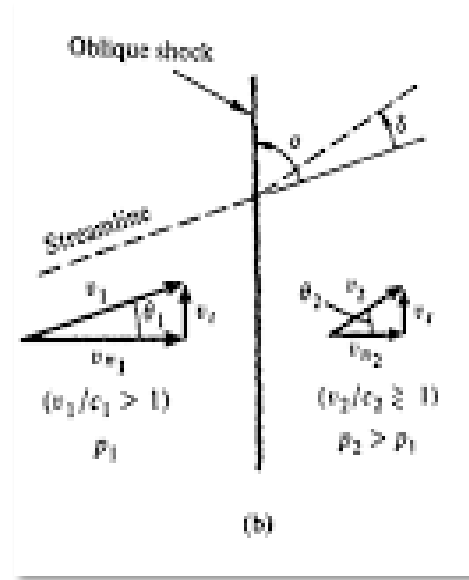
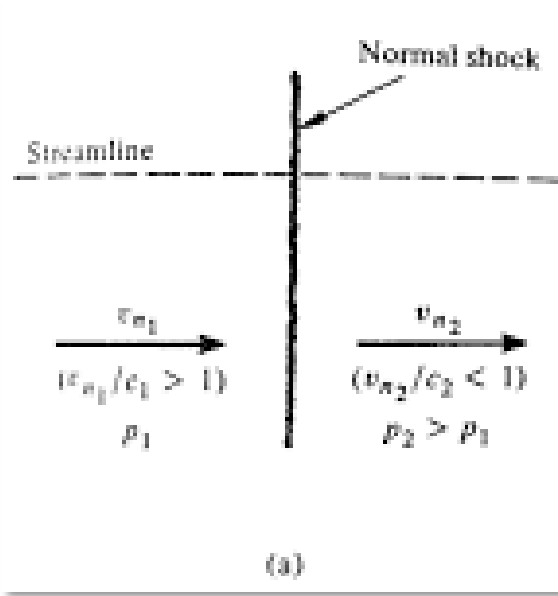


➤ **Sıkıştırma şok dalgası:** Kanat pasajları arasındaki ani basınç artışından dolayı oluşur.

➤ **İkincil Şok Dalgası:** Eğik şoklardan dolayı oluşur. Kanat yüzeyinden ya da art-izden yansır.

Kaynak: Ziniu, W., Yizhe, X., Wenbin W., Ruifeng, H., (2013). Review of shock wave detection method in CFD post-processing, *Chinese Journal of Aeronautics* (Vol: 26(3), pp. 501-513).

NORMAL ŞOK ve EĞİK ŞOK



Normal Şok

Eğik Şok

Kanatlar arasında oluşan eğik şokun kanat duvarlarından ve art-izden yansımaları

Kaynak: https://www.google.com.tr/search?q=normal+shock&safe=off&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiZl8iH4bTbAhXKmlQKHxqNCKEQ_AUICigB&biw=1366&bih=648#imgrc=KmfUkFctGu63M:

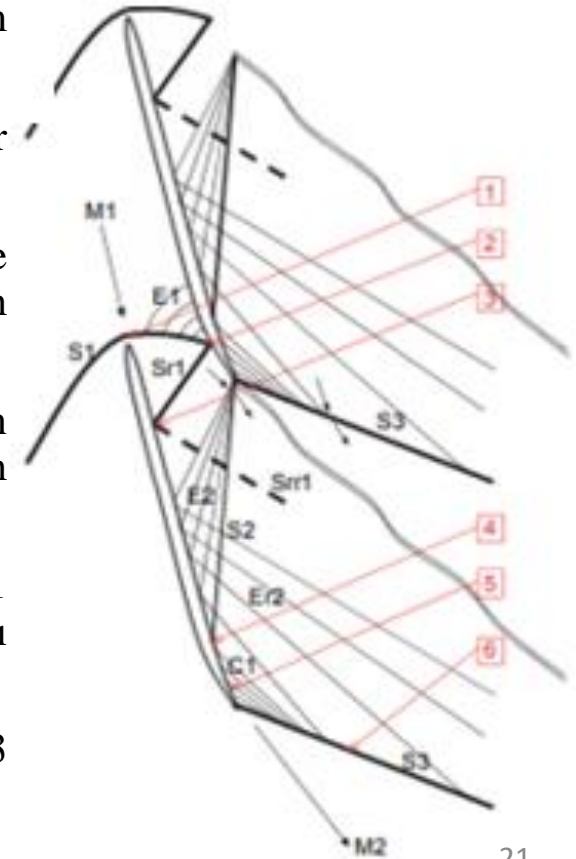
https://www.google.com.tr/search?safe=off&biw=1366&bih=648&tbm=isch&sa=1&ei=lg4SW5OxA8_TwQKHt4DQDQ&q=turbine+blade+shock&oq=turbine+blade+shock&gs_l=img.3...1599.1599.0.2702.1.1.0.0.0.95.95.1.1.0....0...1c.1.64.img..0.0.0....0.OruYjZSQcSw#imgrc=YTSNHU6rA_egdM

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

Asırlardır Çoğuş

Sesüstü Türbin Rotorundaki Kayıplar

- İlk olarak akış yönündeki blokajdan kaynaklanan ve toplam basınç kaybına sebep olan S1 şoku meydana gelmektedir.
- İkinci kayıp ise, S1 şoku ile profilin basma yüzeyindeki sınır tabaka etkileşimi ile meydana gelmektedir.
- Üçüncü kayıp, S1 şokunun yansımış şok dalgası olan Sr1 ve emme yüzeyindeki sınır tabaka arasındaki etkileşimden dolayı meydana gelmektedir.
- Dördüncü kayıp, profilin çıkış kenarındaki şok dalgası olan S2 ve emme yüzeyindeki sınır tabaka ile etkileşimden meydana gelmektedir.
- Beşinci kayıp, profilin emme yüzeyinden yayılan C1 sıkıştırma dalgası sebebiyle oluşan karşıt basınç gradyanı sebebiyle meydana gelmektedir.
- Son kayıp ise, çıkış kenarındaki akış dönmesinden oluşan S3 şokunun meydana getirdiği toplam basınç kaybıdır.



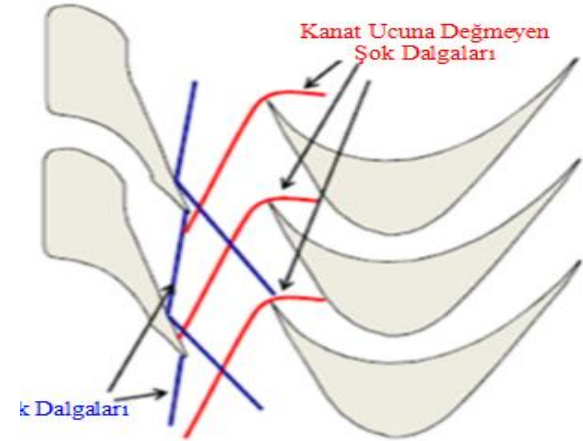
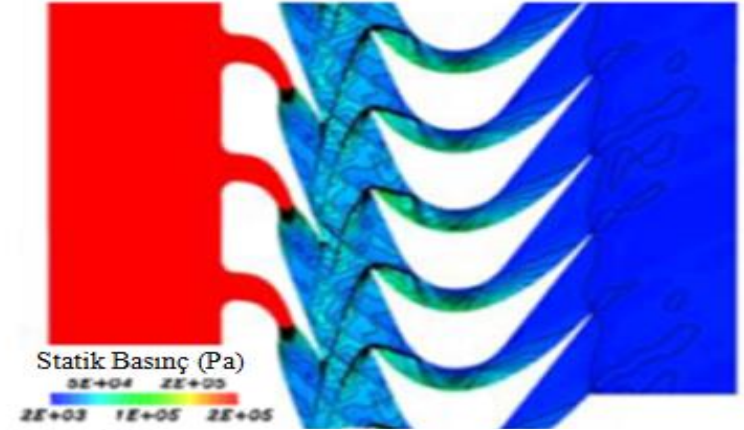
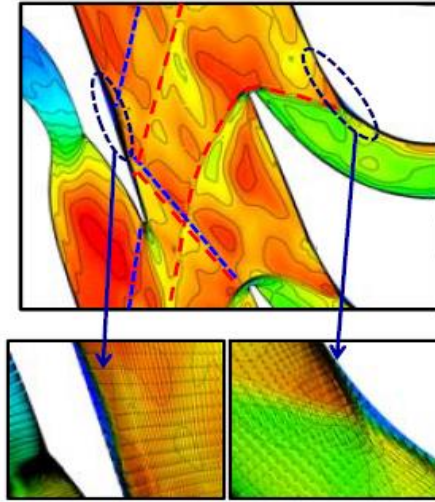
Kaynak: Senoo, S., Sakakibara, K., Kudo, T. & Shibashita, N. (2011). A Numerical Method for Turbulent Flows in Highly Staggered and Low Solidity Supersonic Cascades, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2011, GT2011-45450*, 1-12.

5 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sesüstü HAD Analizleri

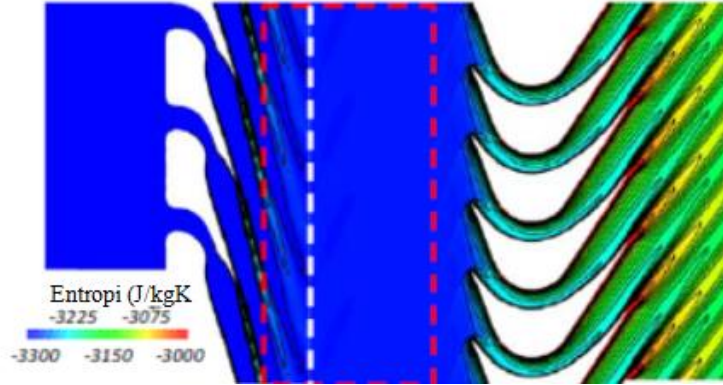
Stator (Lüle) - Rotor Etkileşimi

- Kawatsu ve diğ. Gerçekleştirdiği HAD analizlerinin akışın fiziğine doğruluğunu çalışmışlardır.

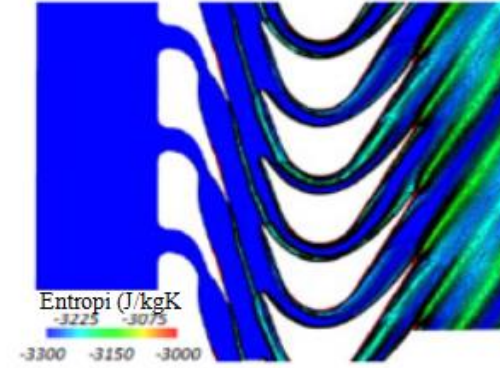


Kaynak: Kawatsu, K., Tani, N. & Yamanishi, N. (2010). Numerical Study on Rotor-Stator Interaction of a Supersonic Reaction Türbine for a Liquid Rocket Engine, ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, FEDSM-

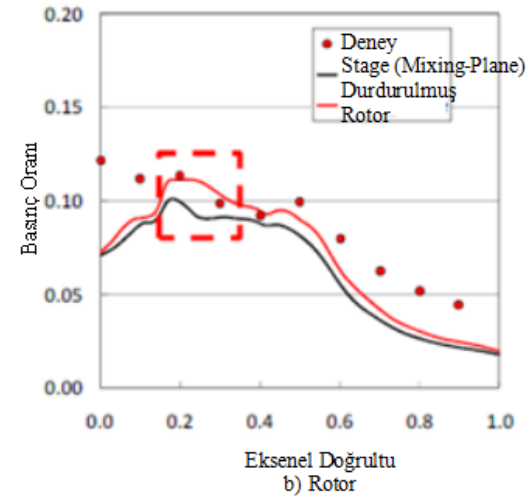
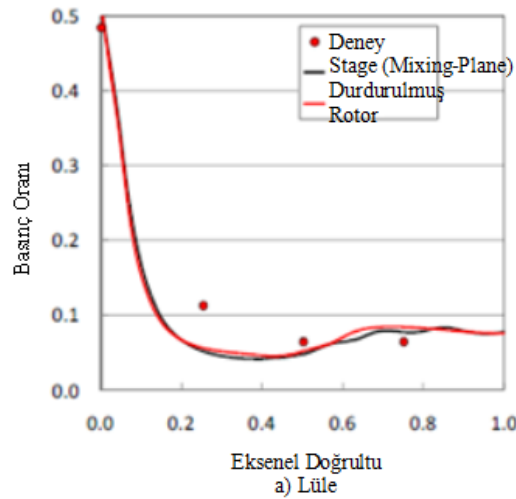
Stator (Lüle) - Rotor Arayüz Modelinin Etkisi



Stage Modeli



Durdurulmuş Rotor Modeli



Boyutsuzlaştırma

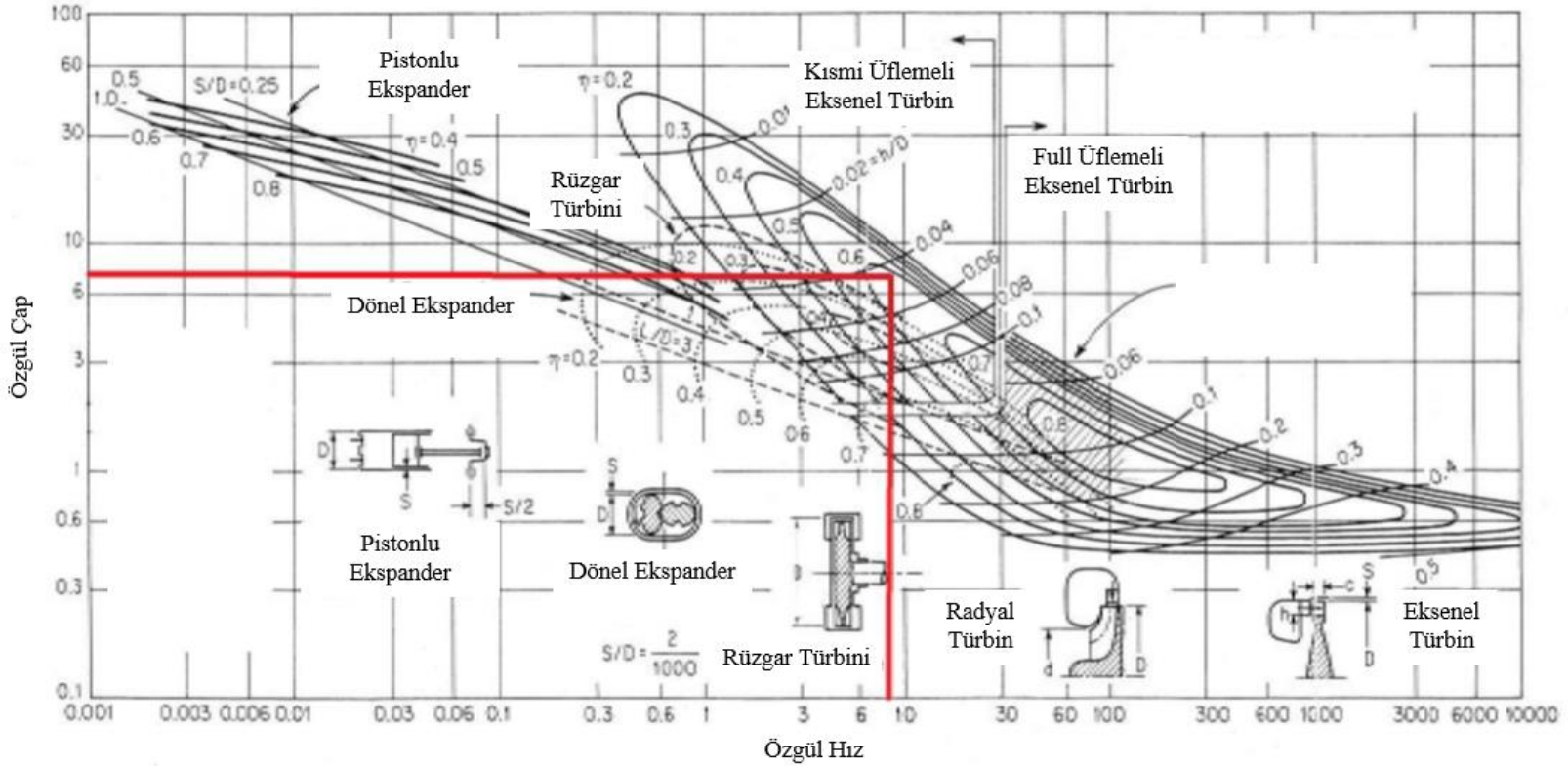
- Boyutsuz Devir Sayısı $\rightarrow N^* = \frac{N}{\sqrt{\theta}}$
 - Debi Sayısı $\rightarrow \varphi = \frac{\dot{m}\sqrt{\theta}}{\delta}$
 - Güç Sayısı $\rightarrow \psi = \frac{P_{mil}}{\dot{m}U^2}$
 - Basınç Oranı $\rightarrow \Pi = \frac{P_{çıkış}}{P_{0,giriş}}$
 - $T_{ref} = 288.13 \text{ K}$
 - $P_{ref} = 101325 \text{ Pa}$
- $$\delta = \frac{P_{0,giriş}}{P_{ref}}$$

$$\theta = \frac{T_{0,giriş}}{T_{ref}}$$

Tasarım Noktası

Debi Sayısı	Basınç oranı	Güç Sayısı	Boyutsuz Devir Sayısı
0.035	0.133	4.6	15217

Cordier Diyagramı

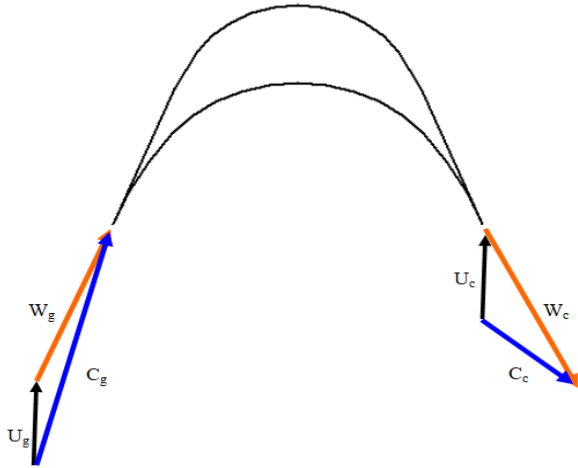


$$\sigma = \frac{N\sqrt{Q}}{H_{ad}^{3/4}}$$

$$\delta_d = \frac{DH_{ad}^{1/4}}{\sqrt{Q}}$$

Kaynak: Kenneth, E. ve Nichols, P.E. How to Select Turbomachinery For Your Application. Barber Nichols Inc.

Hız Bileşenlerinin Belirlenmesi



$$P_{akış} = \dot{m}U(\Delta C_U)$$

$$P_{akış} = \frac{P_{mil}}{\eta}$$

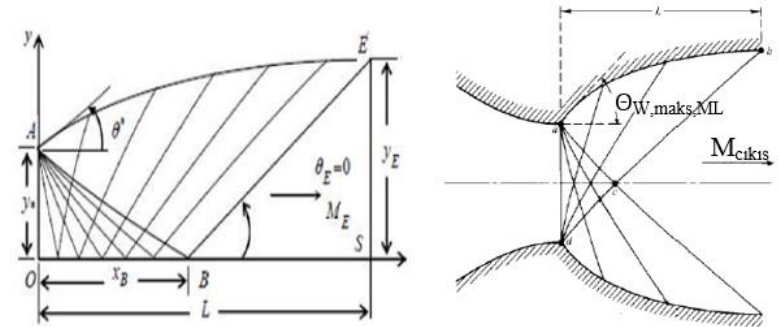
Bağlı Hızın Giriş Açısı ($\beta_{giriş}$)	Mutlak Giriş Mach Sayısı	$(\frac{U_{giriş}}{U} = \frac{U_{çıkış}}{U})$	$\frac{\Delta C_U}{U}$	$C_{giriş}/U$
70°	2	1	6.79	4.57
$\alpha_{giriş}$	$\frac{W_{giriş}}{U} = \frac{W_{çıkış}}{U}$	$C_{çıkış}/U$	$\alpha_{çıkış}$	$(\Delta C_U/U)_{kontrol}$
74°	3.61	2.69	63°	6.79

Karakteristikler Yönteminin Genel Teorisi

- Hiperbolik kısmi diferansiyel çözmek için geliştirilen yöntemdir.
- Sınır koşulları ile kısmi dif. denklem, sıradan (Adi) dif. denkleme dönüştürülür.

Karakteristiklerin temel özellikleri;

- İki boyutlu sesüstü akışta karakteristikler, basıncın yayıldığı yönde oluşan doğrusal ya da eğrisel çizgileridir.
- Karakteristikler, akış özelliklerinin sürekli olduğu bölgeyi kesen eğrilerdir. Bu sebepten ilk türevleri süreksizdir.
- Eğriler boyunca bahsi geçen kısmi diferansiyel denklemler, adi diferansiyel denklemlere dönüştürülebilirler.



$$d\theta = \pm \sqrt{M^2 - 1} \frac{dV}{V} + \frac{1}{2} \left(\sqrt{(\gamma + 1)/(\gamma - 1)} \sin^{-1} [(\gamma - 1)M^{*2} - \gamma] + \sin^{-1} \left(\frac{\gamma + 1}{M^{*2}} - \gamma \right) \right)$$

$$\vartheta = \frac{\pi}{4} \left(\sqrt{(\gamma + 1)/(\gamma - 1)} - 1 \right)$$

Karakteristikler Yönteminin Genel Teorisi

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_I = \tan(\theta - \alpha), \quad \theta + v(M) = \text{sabit} = K_- \text{ (} C_- \text{ karakteristiği boyunca)}$$

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{II} = \tan(\theta + \alpha), \quad \theta - v(M) = \text{sabit} = K_+ \text{ (} C_+ \text{ karakteristiği boyunca)}$$

$$\theta = \frac{1}{2}(K_- + K_+)$$

$$\vartheta = \frac{1}{2}(K_- - K_+)$$

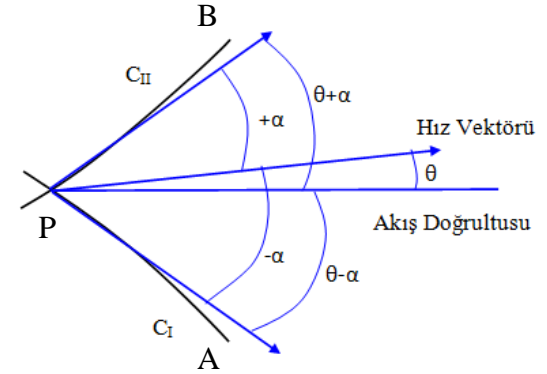
$$y_P = y_A + m_I(x_P - x_A)$$

$$y_P = y_B + m_{II}(x_P - x_B)$$

$$x_P = \frac{y_A - y_B + m_{II}x_B - m_Ix_A}{m_{II} - m_I}$$

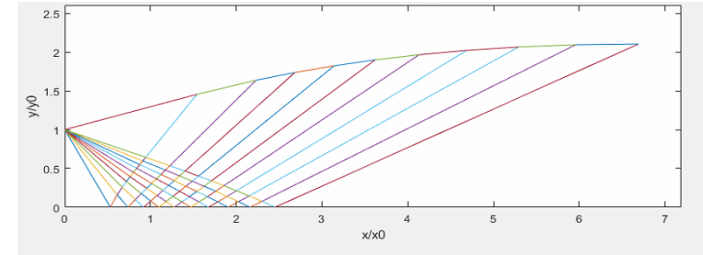
$$m_I = \tan\left(\frac{(\theta - \alpha)_A + (\theta - \alpha)_P}{2}\right)$$

$$m_{II} = \tan\left(\frac{(\theta - \alpha)_B + (\theta - \alpha)_P}{2}\right)$$

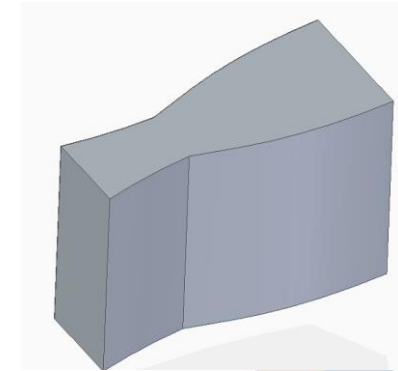
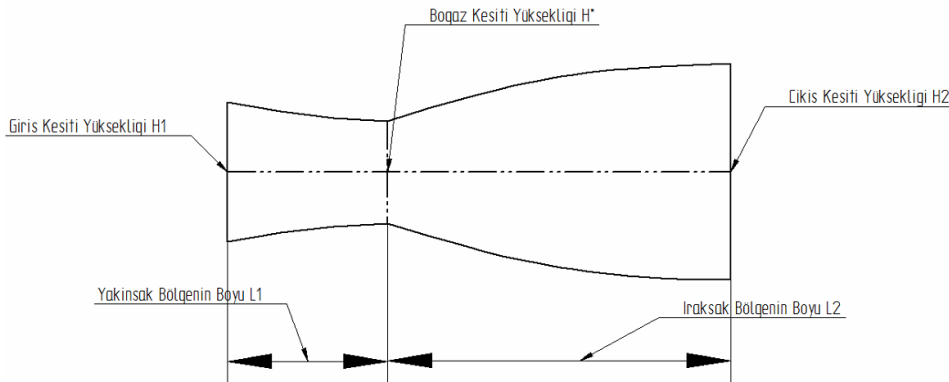


Lüle Tasarımı – Birinci Tasarım

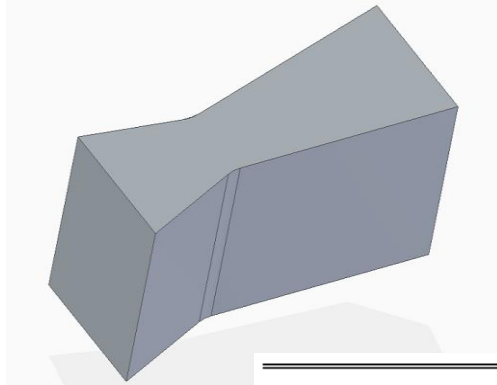
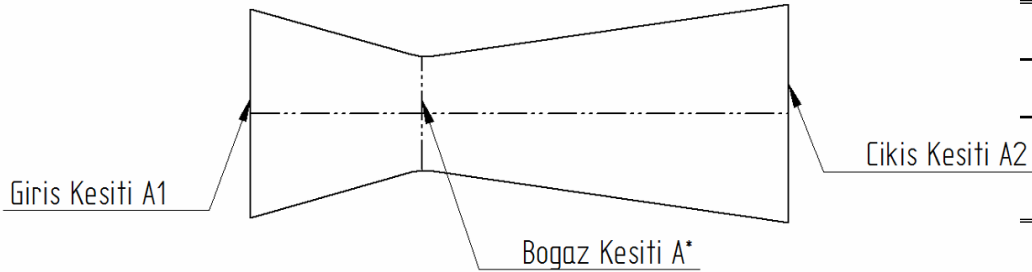
γ	Lüle Çıkış Mach Sayısı	Karakteristik Adeti
-	2	10



Lüle Genişliği	Giriş Kesiti Yüksekliği	Boğaz Kesiti Yüksekliği	Çıkış Kesiti Yüksekliği	Yakınsak Bölgenin Uzunluğu	Iraksak Bölgenin Uzunluğu
w/D_{ort}	H_1/D_{ort}	H^*/D_{ort}	H_2/D_{ort}	L_1/D_{ort}	L_2/D_{ort}
0.131	0.058	0.043	0.090	0.066	0.143



Lüle Tasarımı – İkinci Tasarım



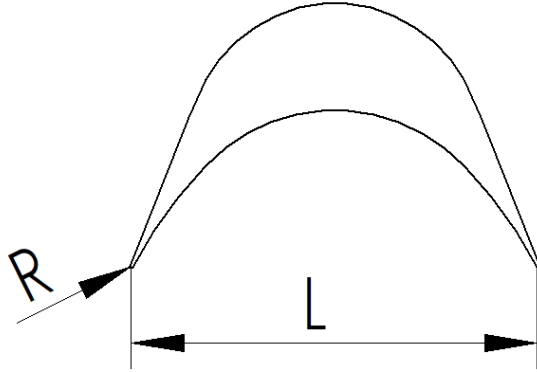
T_1/T_0	a_1/V_1	M_1	P_1/P_0	ρ_1/ρ_0	A_1/A_1
0.99	3.117	0.32	0.943	0.952	1

P^*/P_0	T^*/T_0	ρ^*/ρ_0	a^*/V_1	V^*/V_1	A^*/A_1
0.540	0.919	0.588	3	3	0.536

P_2/P_0	T_2/T_0	ρ_2/ρ_0	V_2/V_1	A_2/A_1
0.133	0.765	0.175	5.42	0.958

Lüle Genişliği	Giriş Kesiti Yüksekliği	Boğaz Kesiti Yüksekliği	Çıkış Kesiti Yüksekliği	Yakınsak Bölgenin Uzunluğu	İraksak Bölgenin Uzunluğu
w/D_{ort}	H_1/D_{ort}	H^*/D_{ort}	H_2/D_{ort}	L_1/D_{ort}	L_2/D_{ort}
0.131	0.081	0.044	0.085	0.066	0.143

Rotor Tasarımı



- Giriş Prandtl-Meyer Açısı : 20
- Alt Yüzey Prandtl-Meyer Açısı : $20 < v_{\text{üst}} < 90$
- Üst Yüzey Prandtl-Meyer Açısı : $0 < v_{\text{alt}} < 20$

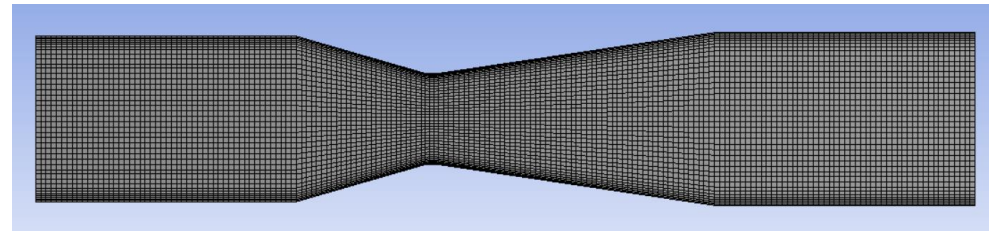
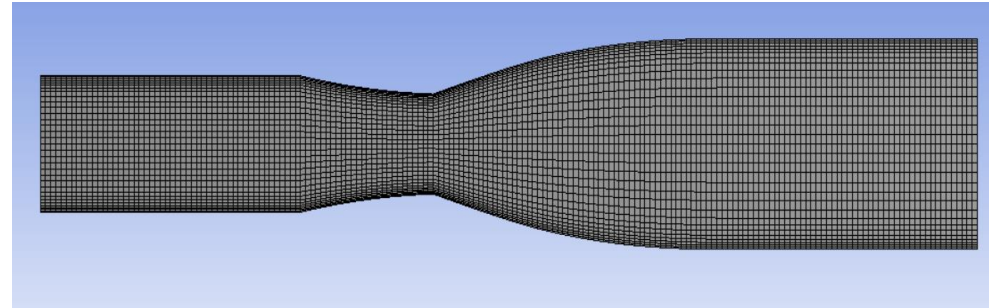


Boyutsuz Çap	Hub Çapı / Shroud Çapı	Boyutsuz Kord Boyu	Giriş-Çıkış Kenarlarındaki Boyutsuz Yarıçap	Kanat Sayısı
$D_{\text{ort}}/D_{\text{ort}}$	$D_{\text{hub}}/D_{\text{shroud}}$	c/D_{ort}	R/D_{ort}	-
1	0.769	0.157	0.003	57

7 HAD İLE TÜRBİN AKIŞ ANALİZLERİ

İki Boyutlu Lüle Analizleri Çözüm Ağı Yapısı

- İki Boyutlu farklı tasarım lüleler için oluşturulmuş çözüm ağı yapısı;
- İlk tabaka ağ yüksekliği 0,01 mm
- Buna göre yaklaşık 12 bin eleman,
- y^+ değeri duvarlarda ortalama 2
- Skewness : 0,17
- Aspect ratio : 7



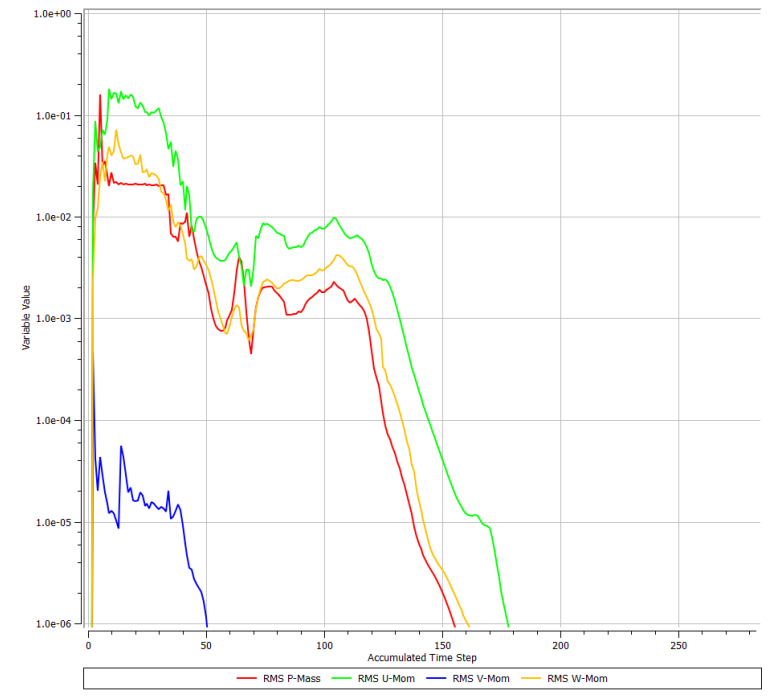
İki Boyutlu Lüle Analizleri Çözüm ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Sınır Şartları

Toplam Sıcaklık	Basınç Oranı	Duvar Sınır Koşulu
-	0.133	Adyabatakik ve Kaymamazlık

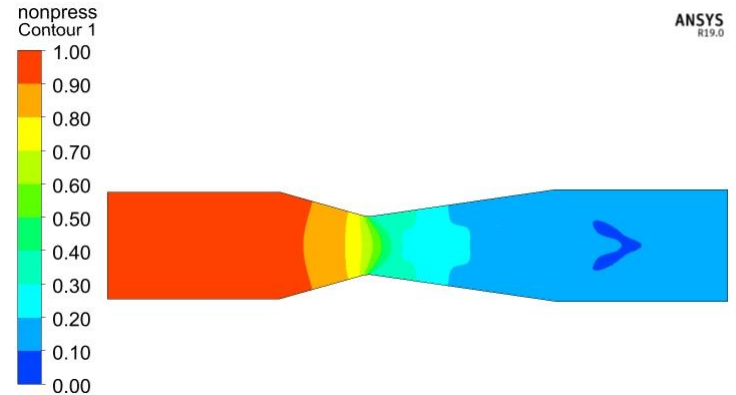
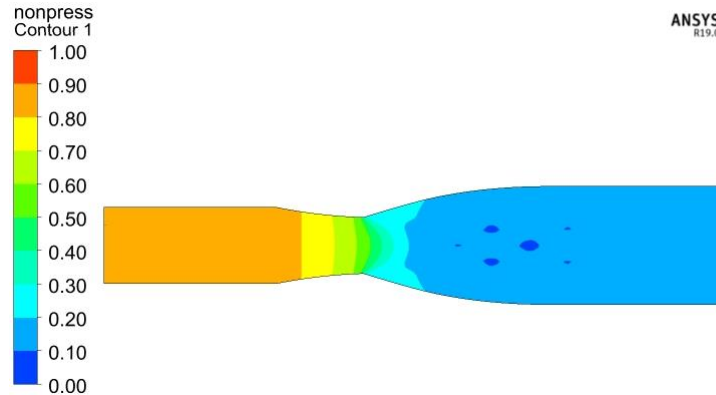
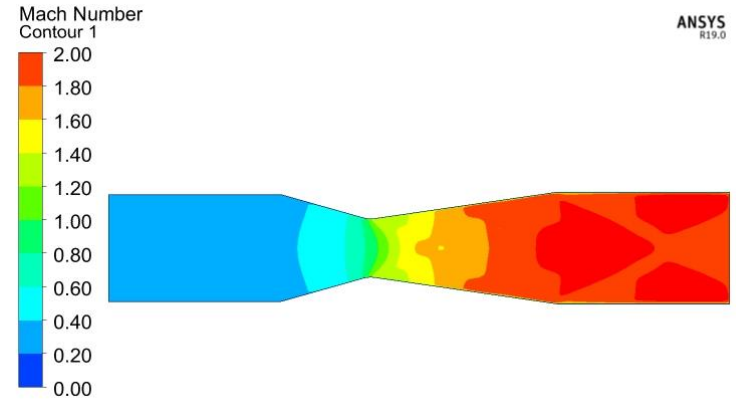
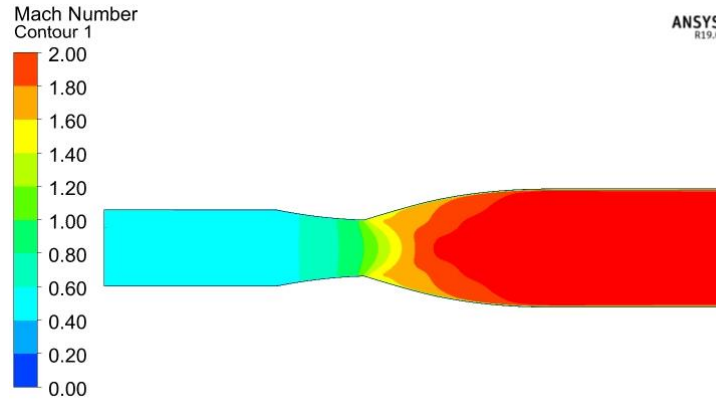
Debi Çıktıları

Hedef	Birinci Tasarım	İkinci Tasarım
	Debi Sayısı	
0.035	0.037	0.038

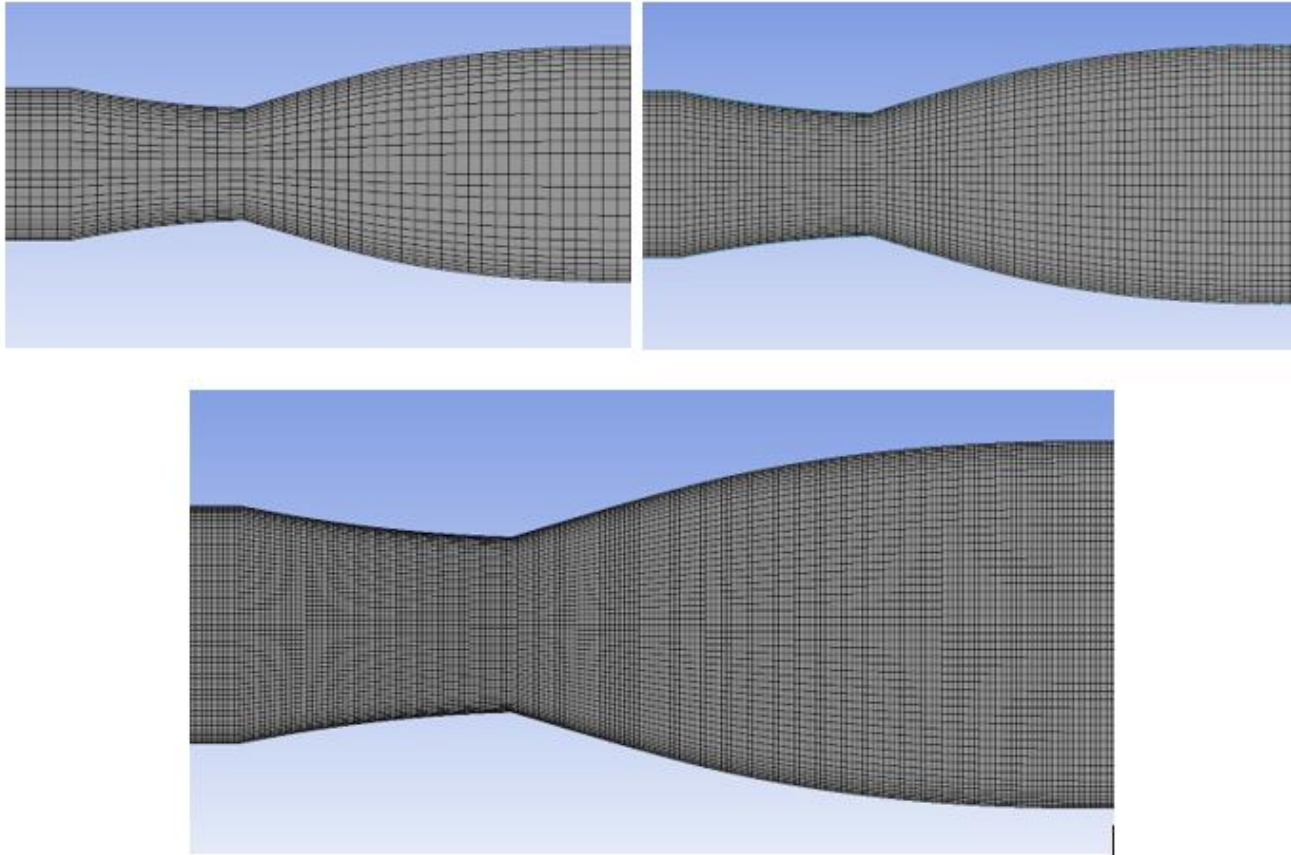


İki Boyutlu Lüle Analizleri

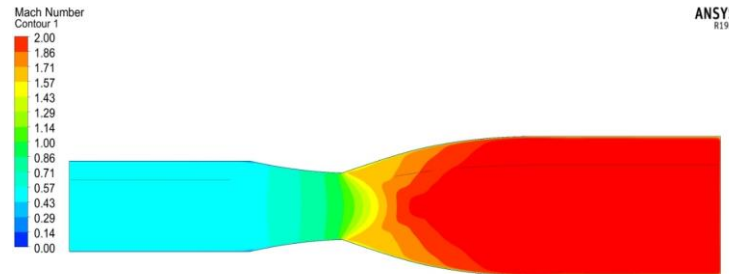
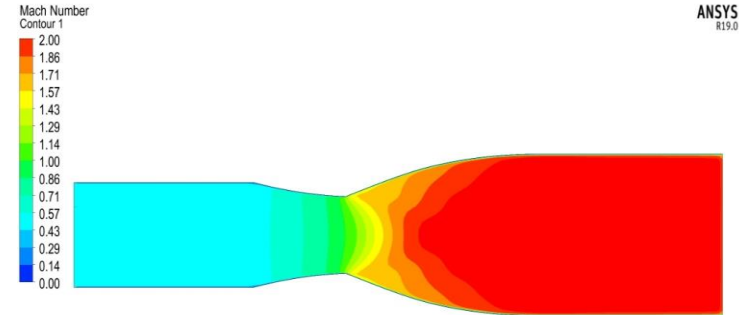
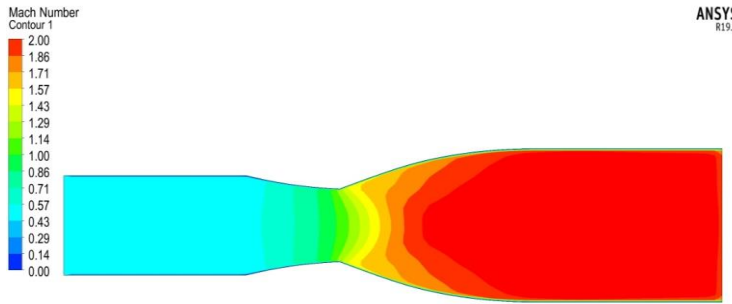
Çözüm ve Sonuçların Değerlendirilmesi



İki Boyutlu Lüle Analizleri Çözüm Ağından Bağımsızlık Çalışması



İki Boyutlu Lüle Analizleri Çözüm Ağından Bağımsızlık Çalışması



Çözüm

Ağı

3 bin

12 bin

30 bin

Sayıları

Debi Sayısı

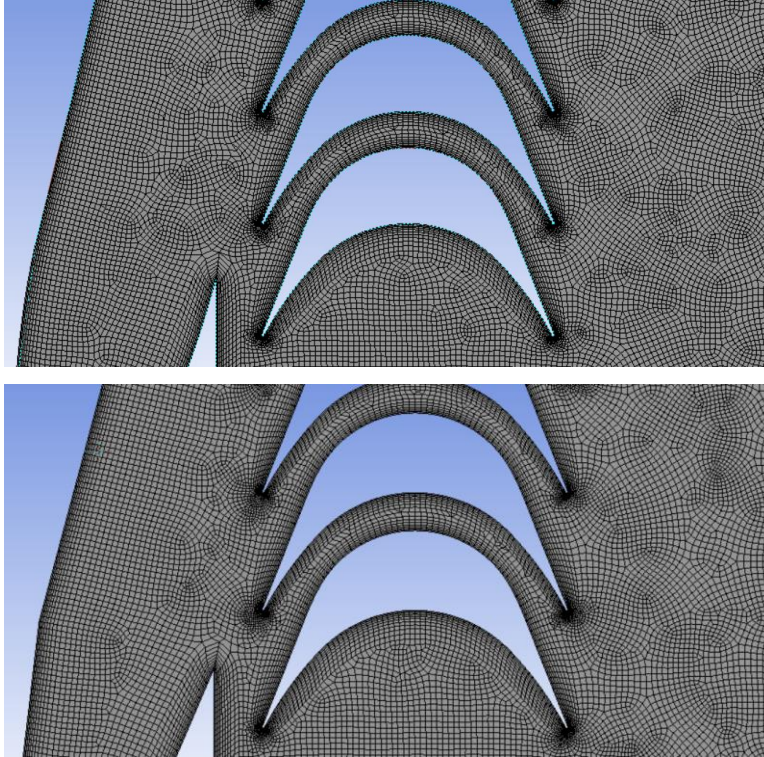
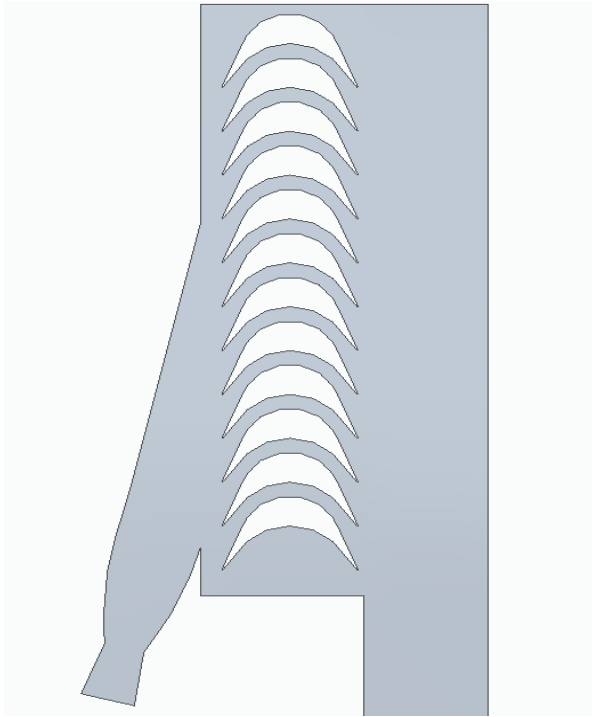
0.039

0.037

0.037

Orta kalitedeki çözüm ağı yapısı ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir!

İki Boyutlu Lüle ile Birlikte Rotor Analizleri Çözüm Ağı Yapısı



- Kısmi üfleme olduğu için tam olarak bir kaskat çalışması gerçekleştirilememiş; lülenin arkasına 12 adet rotor kanadı yerleştirilmiştir.

- İlk tabaka ağ yüksekliği 0,01 mm
- Buna göre yaklaşık 150 bin eleman,
- y^+ değeri duvarlarda ortalama 2
- Skewness : 0,8 (0,5 üzerinde 10 adet eleman var)
- Aspect ratio : 20

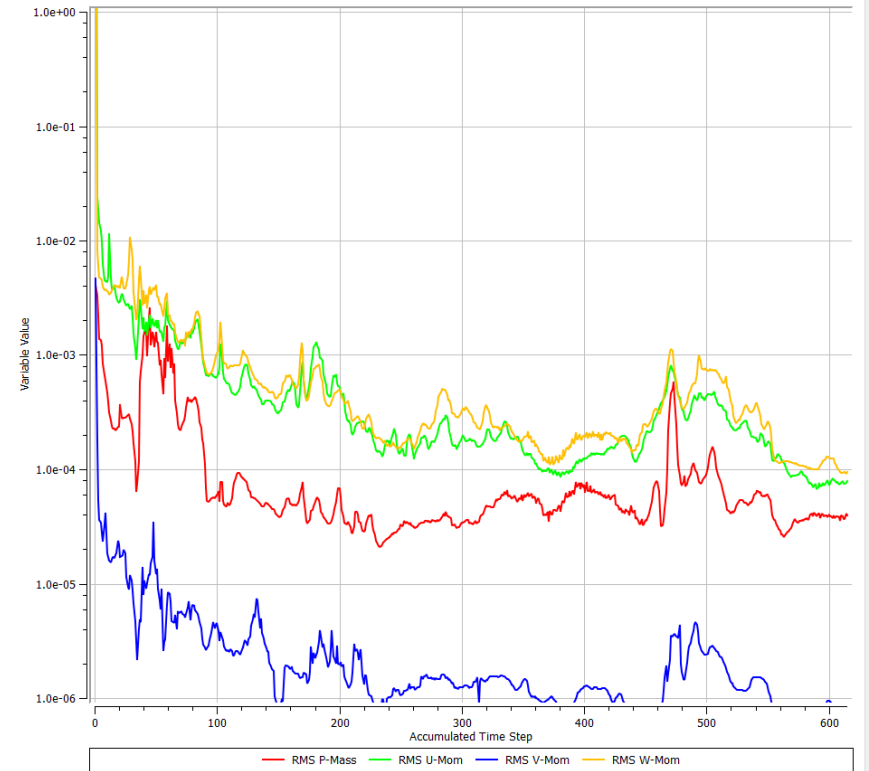
İki Boyutlu Lüle Analizleri Çözüm ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Sınır Şartları

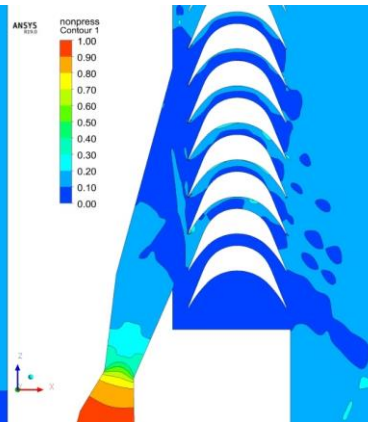
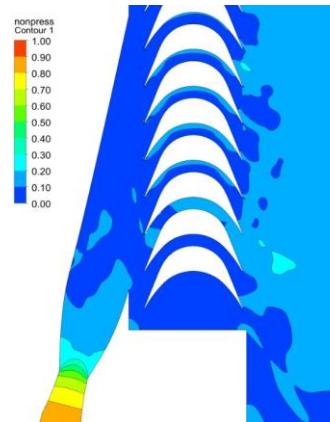
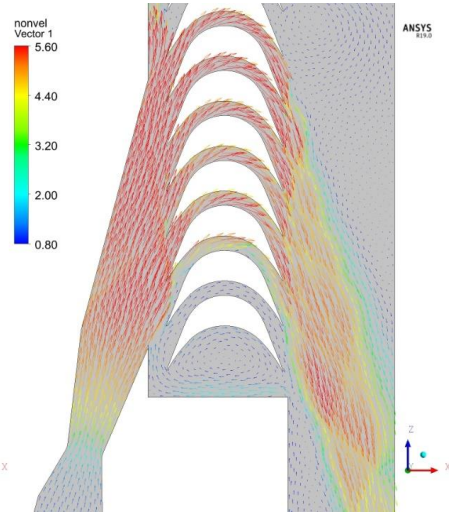
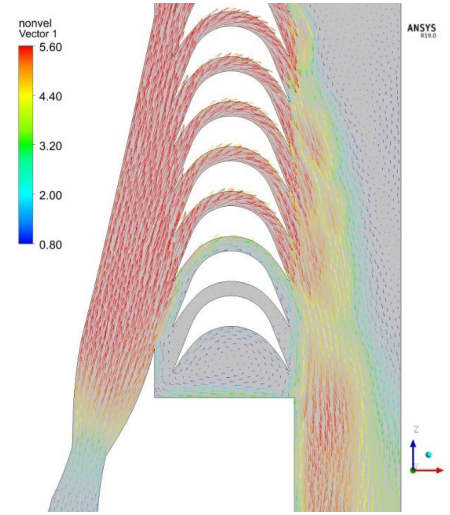
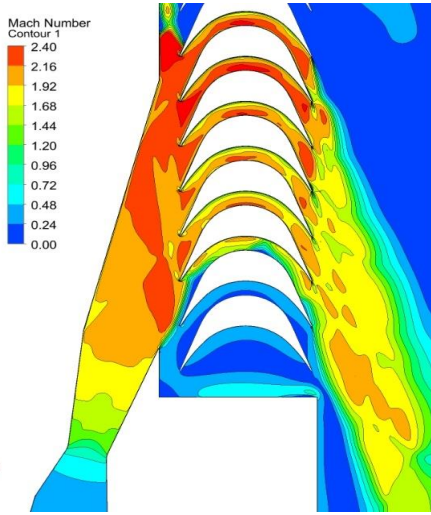
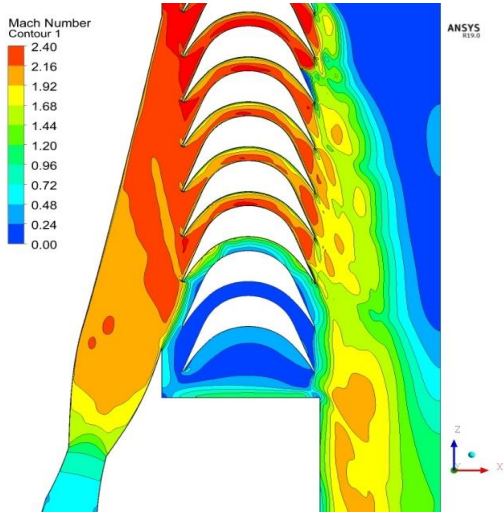
Toplam Sıcaklık	Basınç Oranı	Duvar Sınır Koşulu
-	0.133	Adyabatakik ve Kaymamazlık

Debi Çıktıları

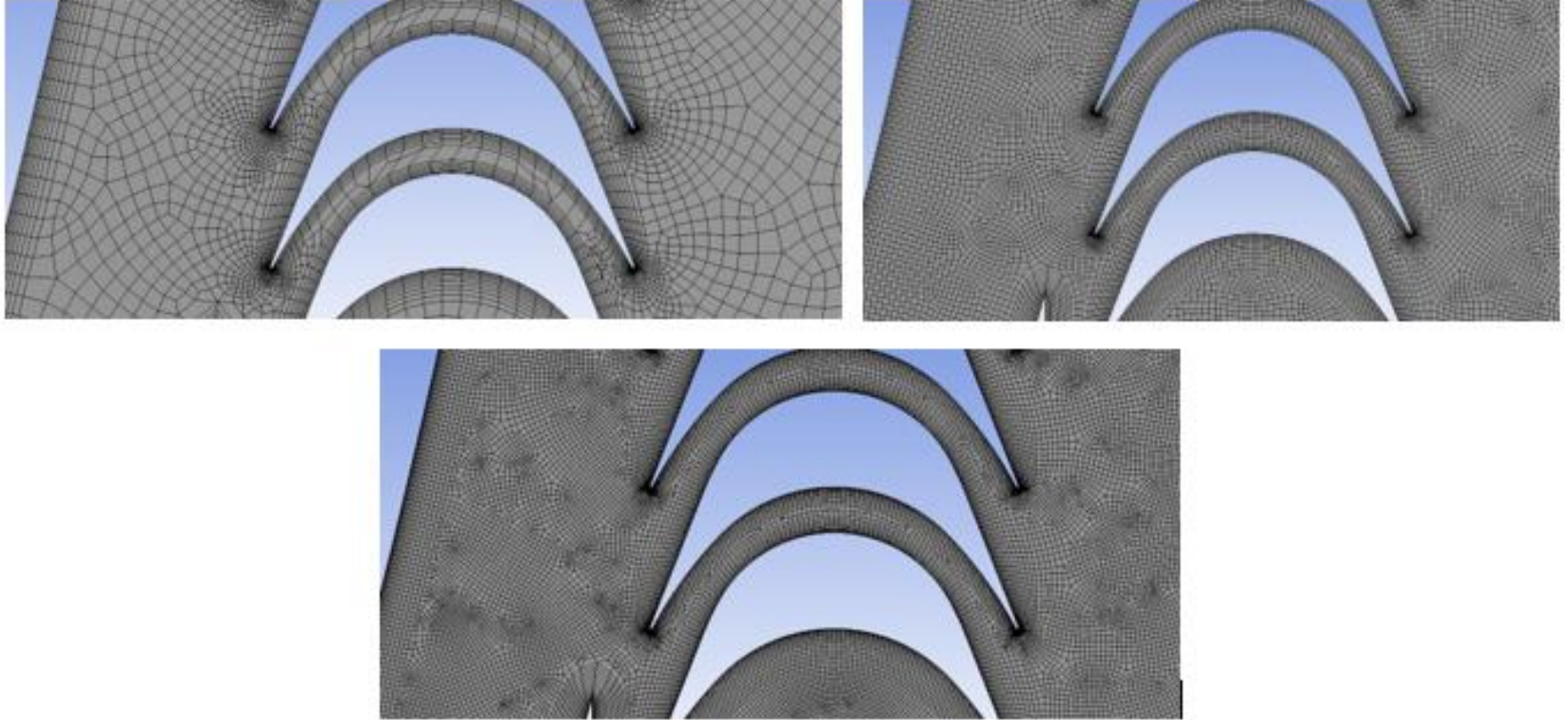
Hedef	Birinci Tasarım	İkinci Tasarım
	Debi Sayısı	
0.035	0.037	0.038



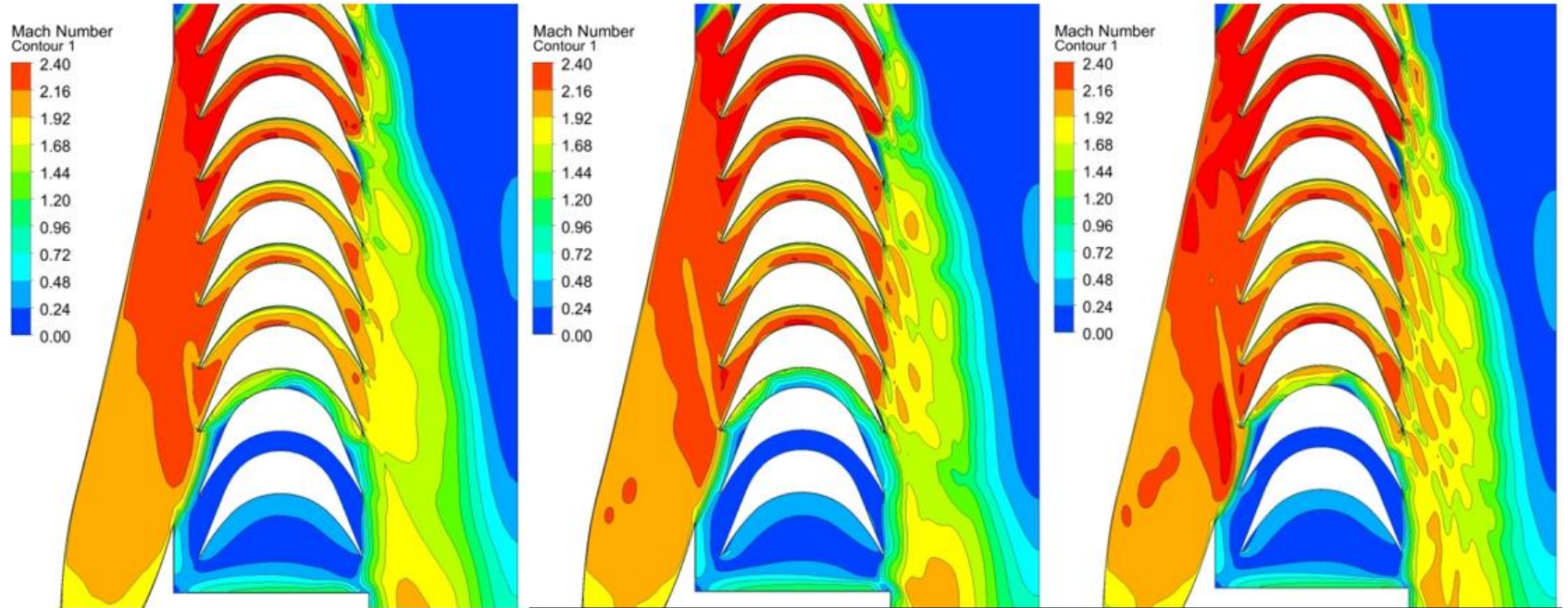
İki Boyutlu Lüle Analizleri Çözüm ve Sonuçların Değerlendirilmesi



İki Boyutlu Lüle Analizleri Çözüm Ağından Bağımsızlık Çalışması



İki Boyutlu Lüle Analizleri Çözüm Ağından Bağımsızlık Çalışması

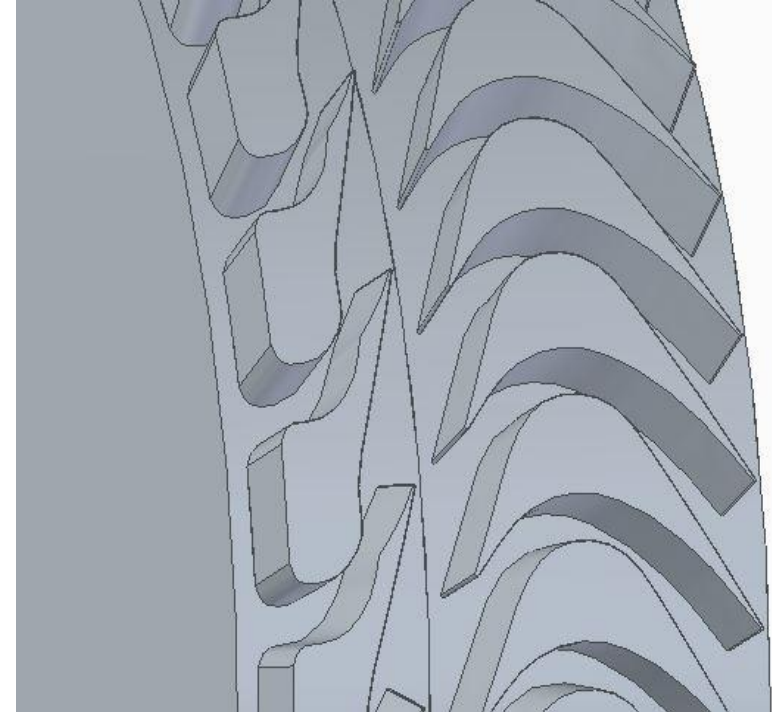


Çözüm Ağı Sayıları	30 bin	150 bin	300 bin
Debi Sayısı	0.039	0.037	0.037

Orta kalitedeki çözüm ağı yapısı ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir!

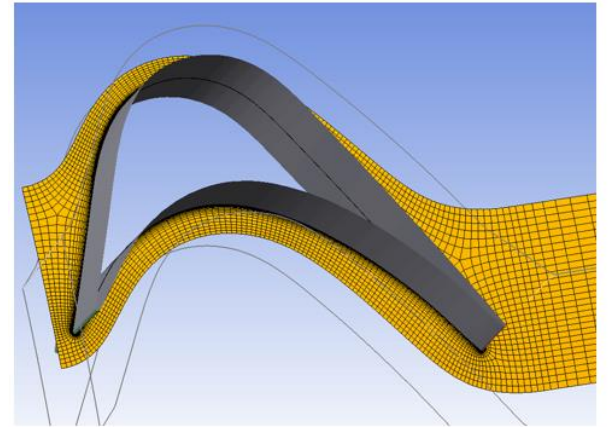
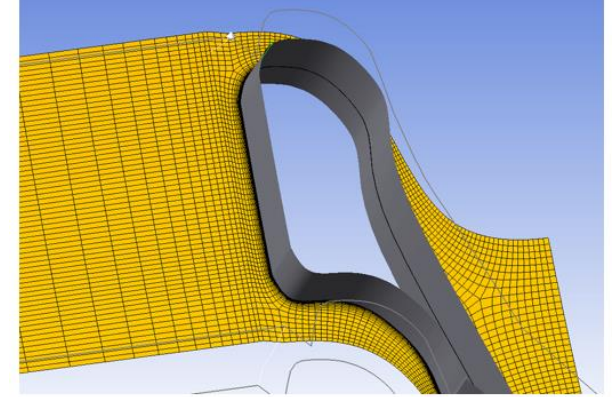
Üç Boyutlu Akış Analizleri Sayısal Modelin Sınanması

- Moffitt tarafından tasarlanan sesüstü türbinin geometrisinde 32 stator, 48 rotor kanadı bulunmaktadır.
- Bu çalışmada öncelikle yapısal olmaya ağ (unstructured), sonra ise yapısal ağ (structured) ile akış analizleri gerçekleştirilmiştir.



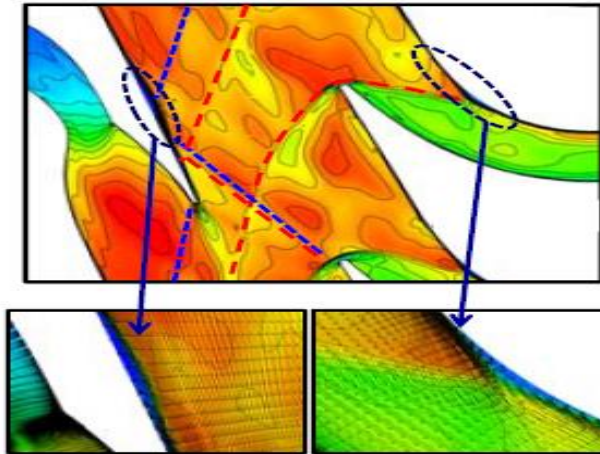
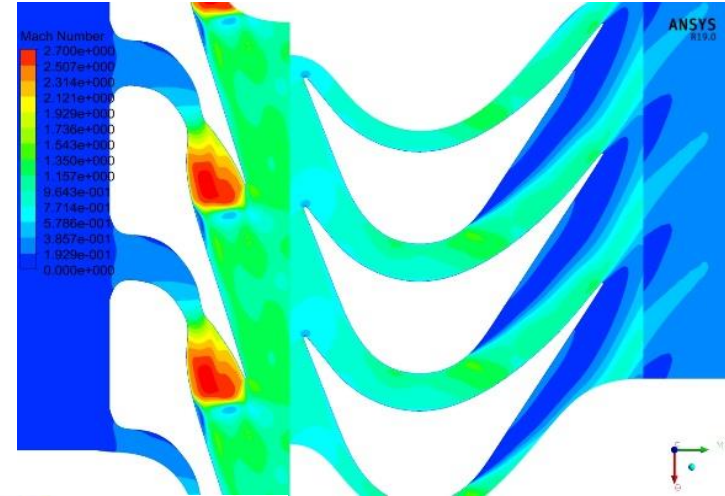
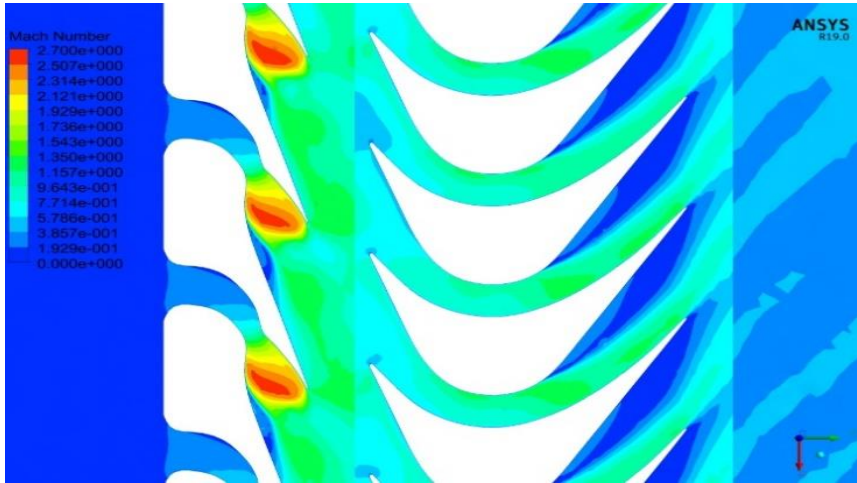
Güç Çıktısı	Kütlesel Debi	Devir Sayısı	Giriş Toplam Basıncı	Çıkış Statik Basıncı	İzantropik Verim
70 kW	0.29 kg/s	997 rd/s	0.54 MPa	0.018 MPa	%40

Üç Boyutlu Akış Analizleri Sayısal Modelin Sınanması

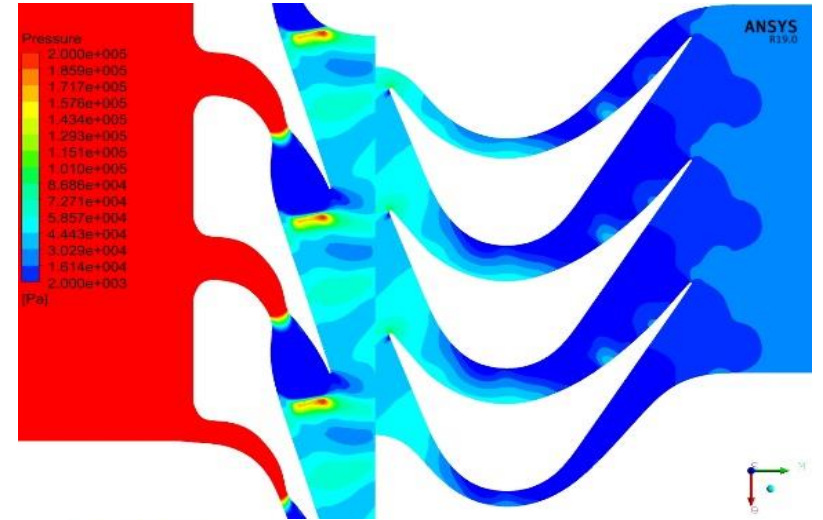
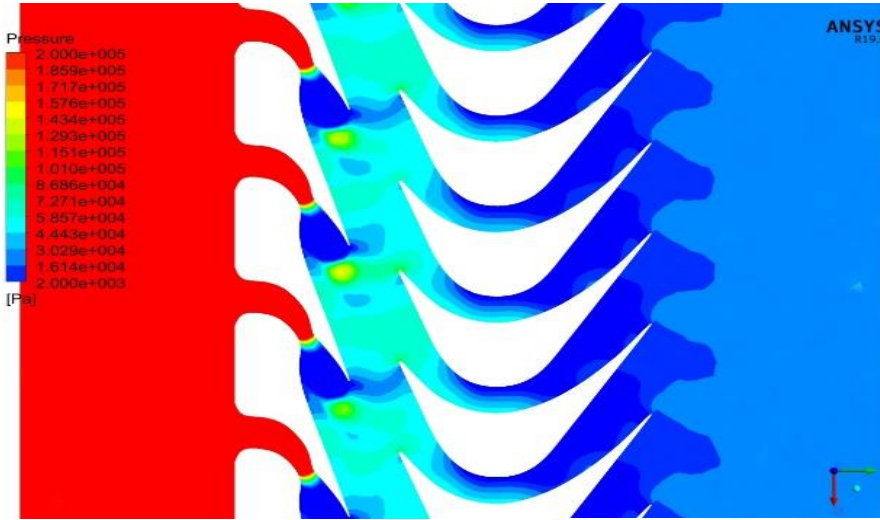


- Her iki ağ yapısında da yaklaşık 10 milyon eleman bulunmaktadır.

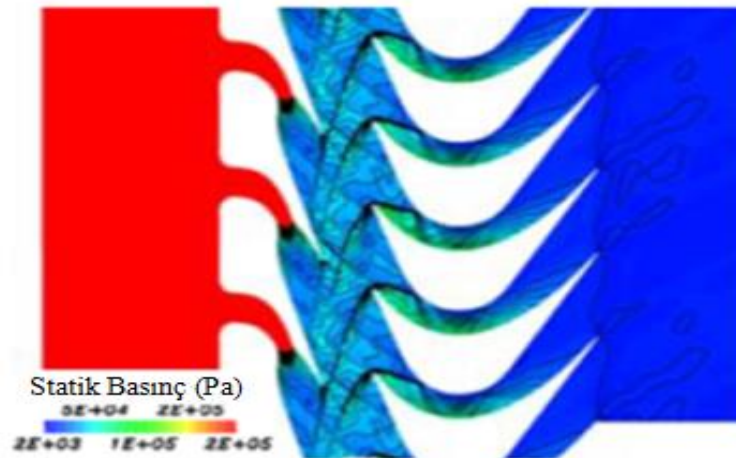
Üç Boyutlu Akış Analizleri Sayısal Modelin Sınanması



Üç Boyutlu Akış Analizleri Sayısal Modelin Sınanması



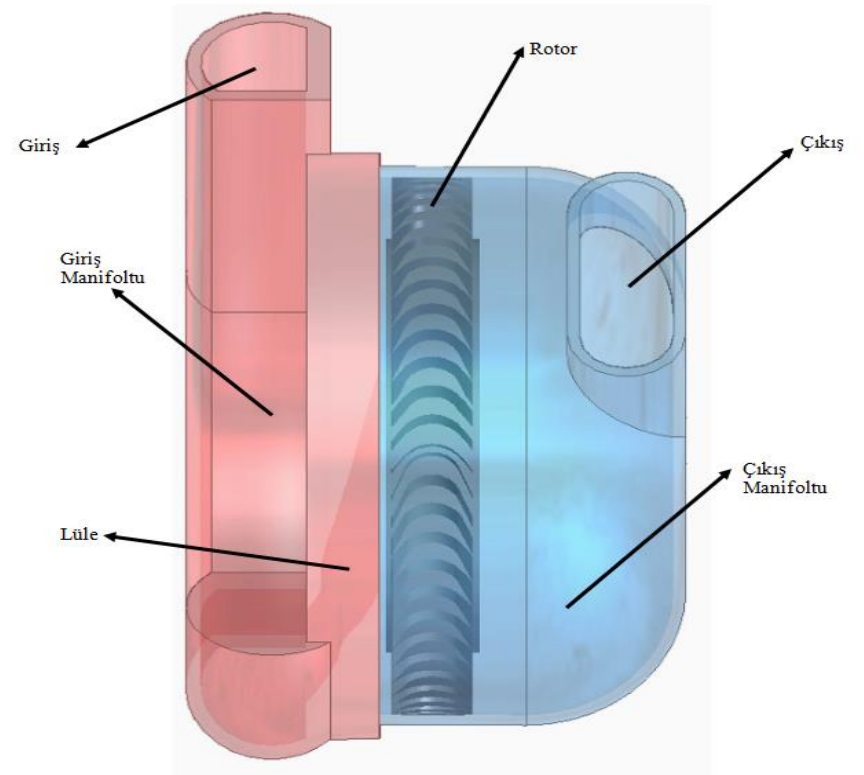
Güç Çıktısı	İzantropik Verim
75 kW	%39.4



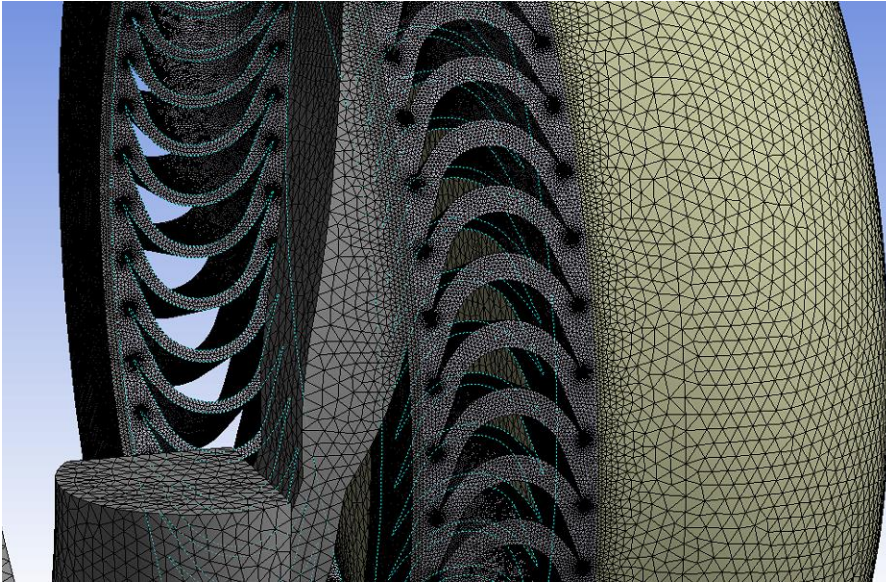
Güç Çıktısı	İzantropik Verim
76.7 kW	%40.7

Üç Boyutlu Akış Analizleri

- Bir çizim programı yardımıyla üç boyutlu katı modelin oluşturulması,
- Ansys Design Modeler yardımıyla akış hacminin oluşturulması,
- Ansys Meshing yardımıyla üç boyutlu çözüm ağı yapısının oluşturulması,
- Ansys CFX yardımıyla üç boyutlu RANS denklemleri çözülerek sayısal çözümün gerçekleştirilmesi,
- Ansys CFD-Post yardımıyla sonuçların incelenmesi.



Üç Boyutlu Akış Analizleri Çözüm Ağı Yapısı



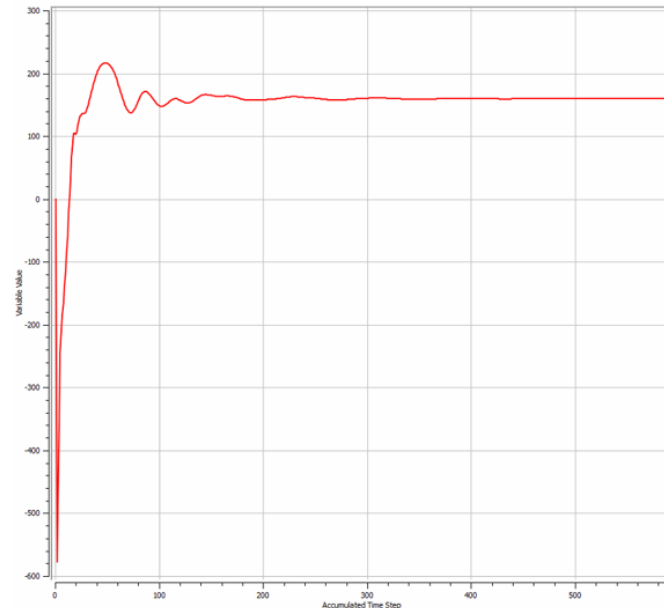
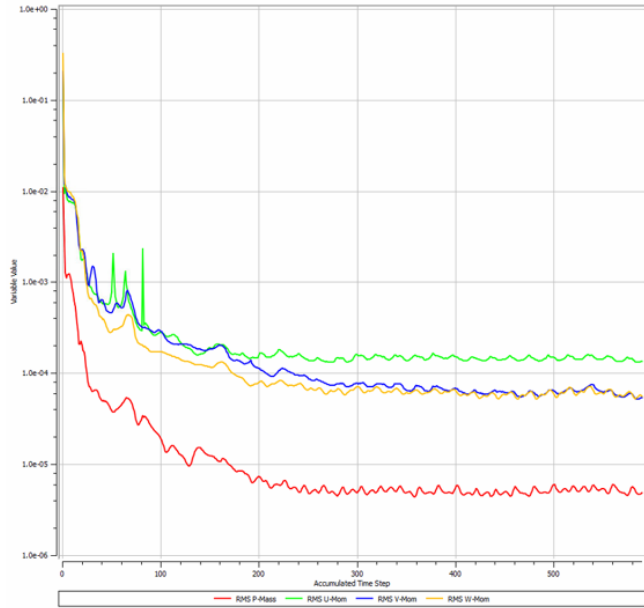
- İlk tabaka ağ yüksekliği 0,05 mm.
- Buna göre yaklaşık 30 milyon eleman, **kısmi üfleme olduğu için periyodik uygulanamıyor.**
- y^+ değerleri 2 civarında tutulamadığı için duvar fonksiyonları ile çözüm.

Üç Boyutlu Akış Analizleri Çözüm ve Sonuçların Değerlendirilmesi

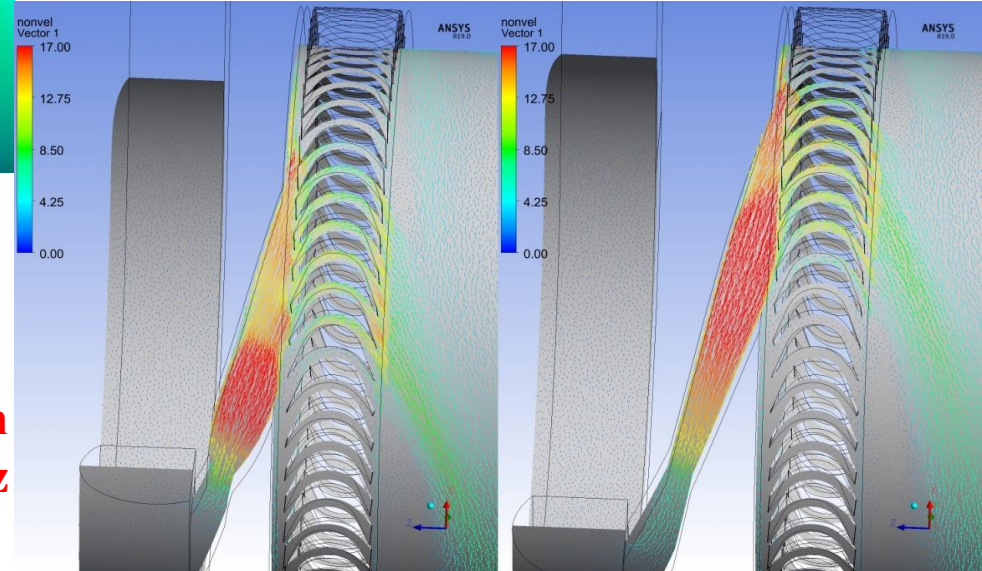
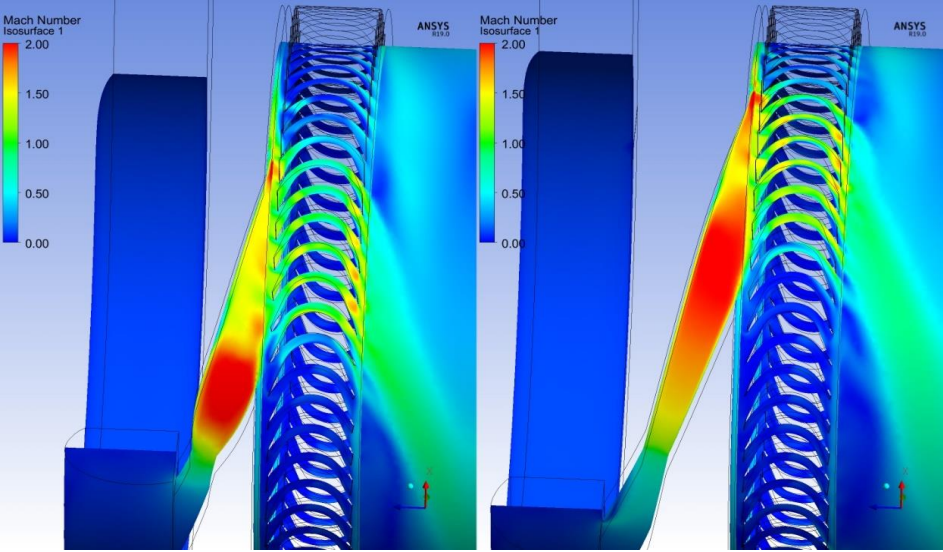
Sınır Şartları

Toplam Sıcaklık	Basınç Oranı	Duvar Sınır Koşulu
-	0.133	Adyabataklık ve Kaymamazlık

- **MRF** yöntem ile rotora dönme tanımlanmıştır.
- Rotor lüle arayüz modeli olarak **Durdurulmuş Rotor** kullanılmıştır.

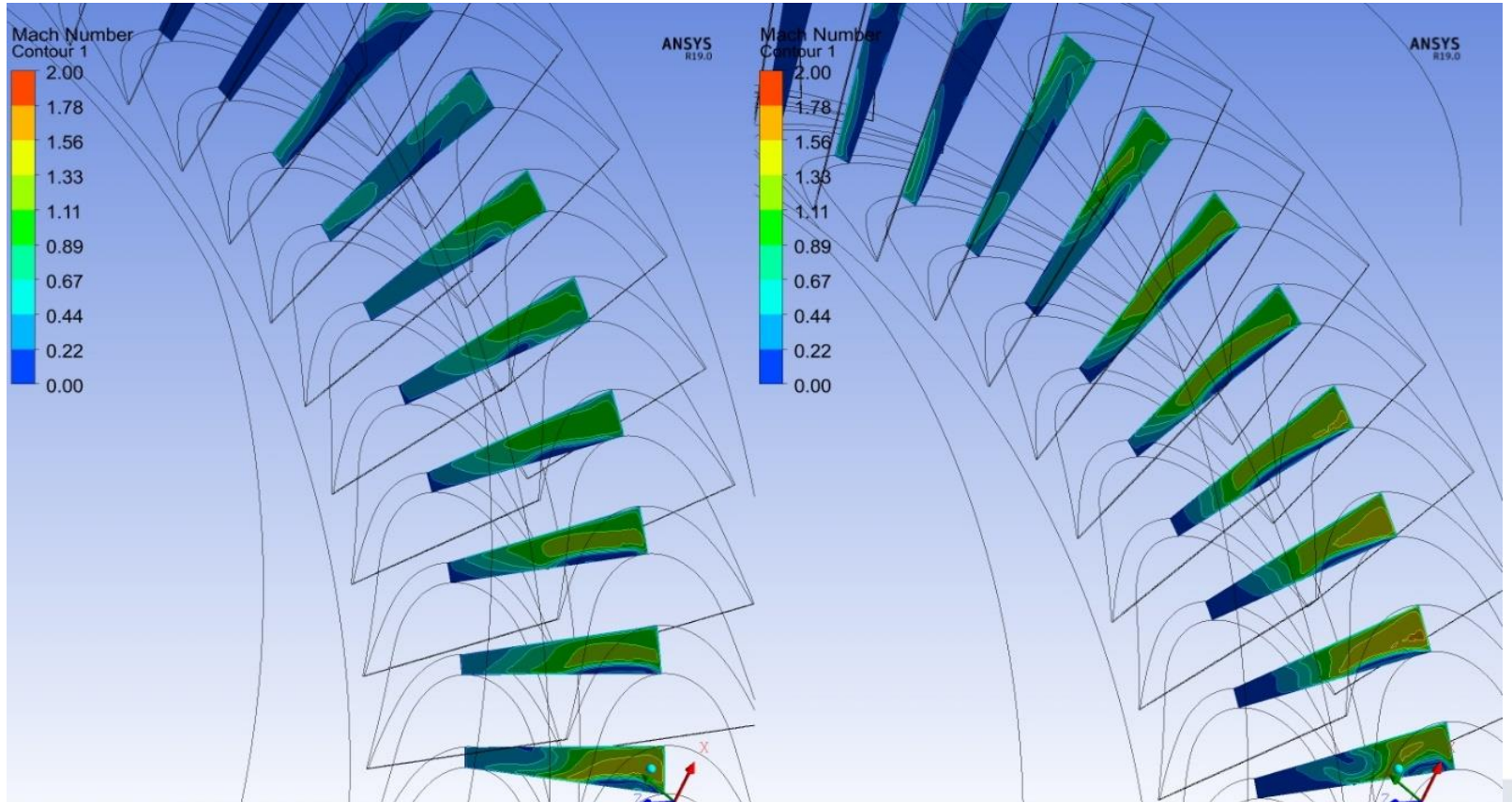


Üç Boyutlu Akış Analizleri Çözüm ve Sonuçların Değerlendirilmesi

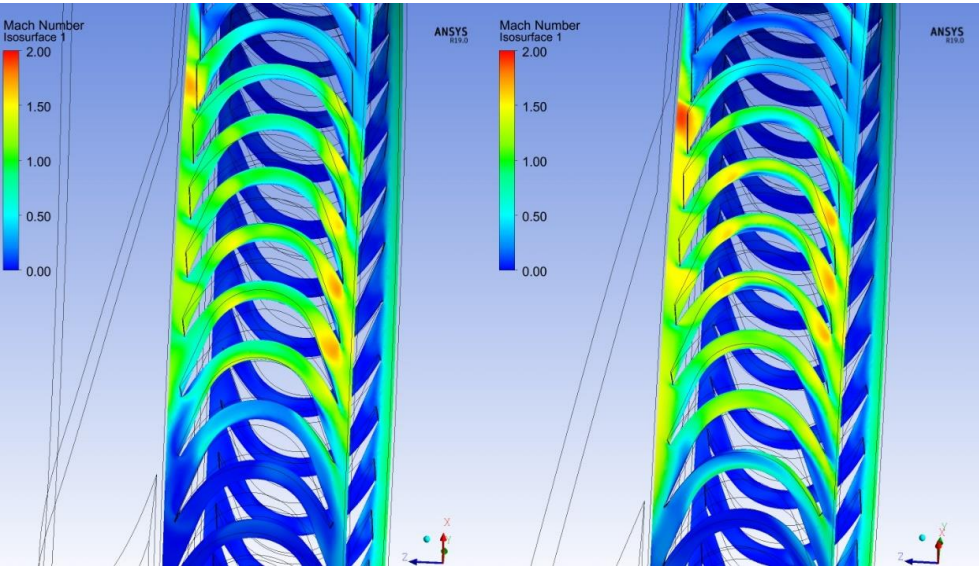


Görseller sırası ile birinci ve ikinci tasarım lüle ortalama yarı çaptaki boyutsuz özellikler olarak verilmiştir.

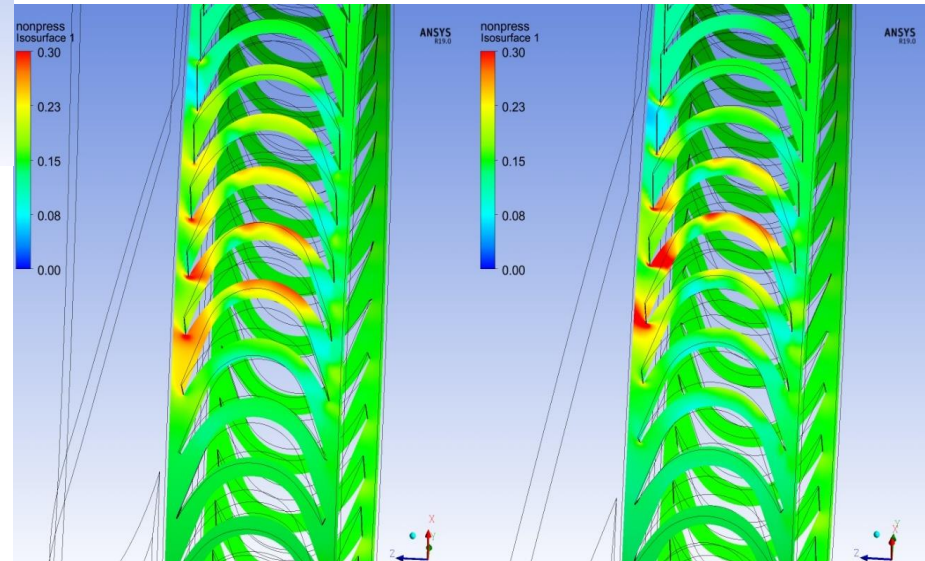
Üç Boyutlu Akış Analizleri Çözüm ve Sonuçların Değerlendirilmesi



Üç Boyutlu Akış Analizleri Çözüm ve Sonuçların Değerlendirilmesi



Görseller sırası ile birinci ve ikinci tasarım lüle ortalama yarı çaptaki boyutsuz özellikler olarak verilmiştir.



	Debi Sayısı	Güç Sayısı	İzantropik Verim
Tasarım Noktası	0.035	4.6	-
Birinci Tasarım Lüle	0.036	4.4	%46
İkinci Tasarım Lüle	0.037	4.7	%50

⑧ DEĞERLENDİRME

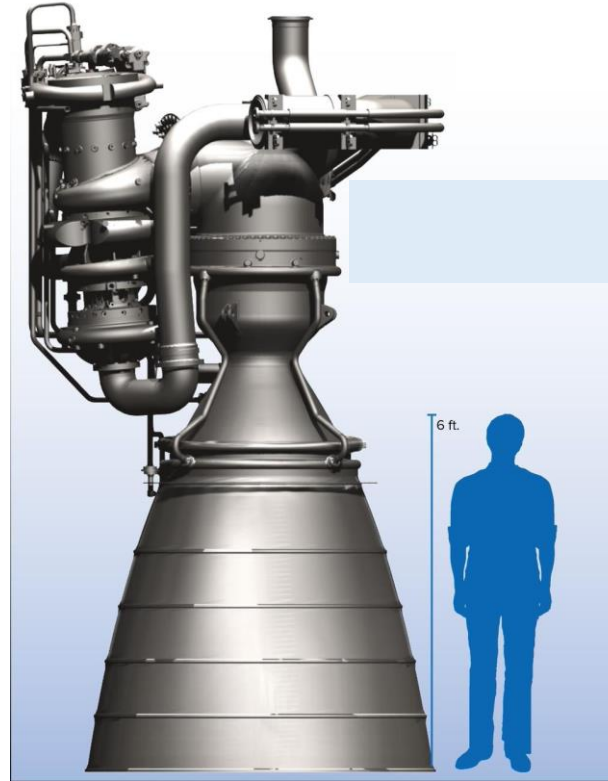
- ✓ Yüksek özgül entalpi düşüşüne sahip ya da yüksek enerji çıktısı gerektiren türbinlerin sesüstü akışlı etki tipinde olması gerekmektedir.
- ✓ Hacimsel bakımdan boyutların küçük olması gerekliliği de, türbin içerisinde sesüstü akışlara çıkılmasına neden olmaktadır.
- ✓ Düşük debi gereksinimi türbinin kısmi akışlı olması zorunluluğunu ortaya koymaktadır.
- ✓ Türbin girişinde istenilen hızlara ulaşabilmek için bir sesüstü yakınsak – ıraksak lüleye ihtiyaç vardır.
- ✓ Sesüstü lüle ve rotor kanadının belirlenmesinde Karakteristikler Yönteminden yararlanılmıştır.
- ✓ Bu tez kapsamında; tasarıma başlamadan önce nasıl parametrize edilmesi gerektiği anlaşılmıştır.
- ✓ Karmaşık geometrilerin ve problemlerin sayısal olarak modellenmesi kabiliyeti edinilmiştir.
- ✓ Tez sonucunda sesüstü akış ve HAD analizleri anlaşılmıştır.

ÖNERİLER

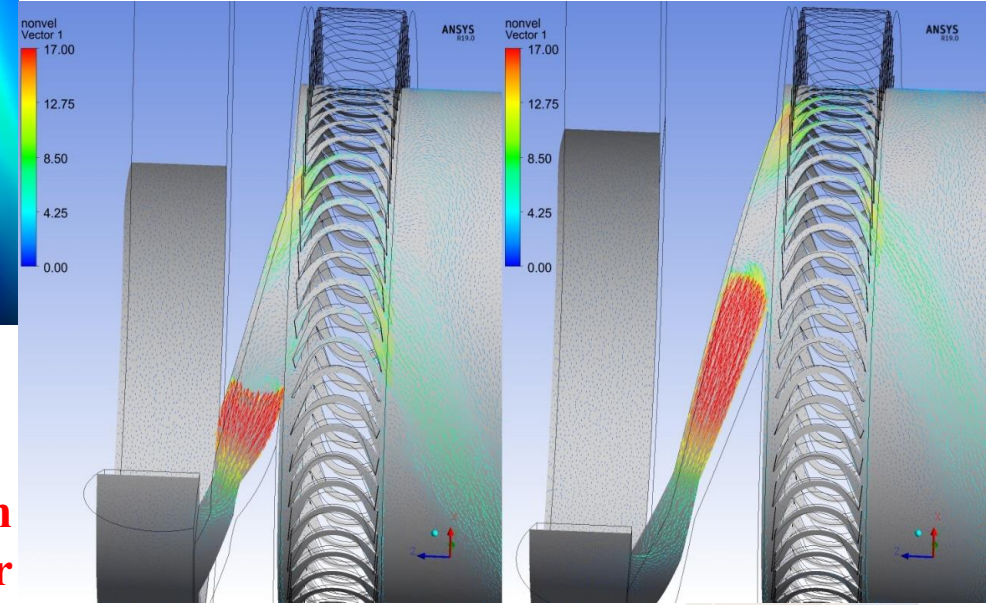
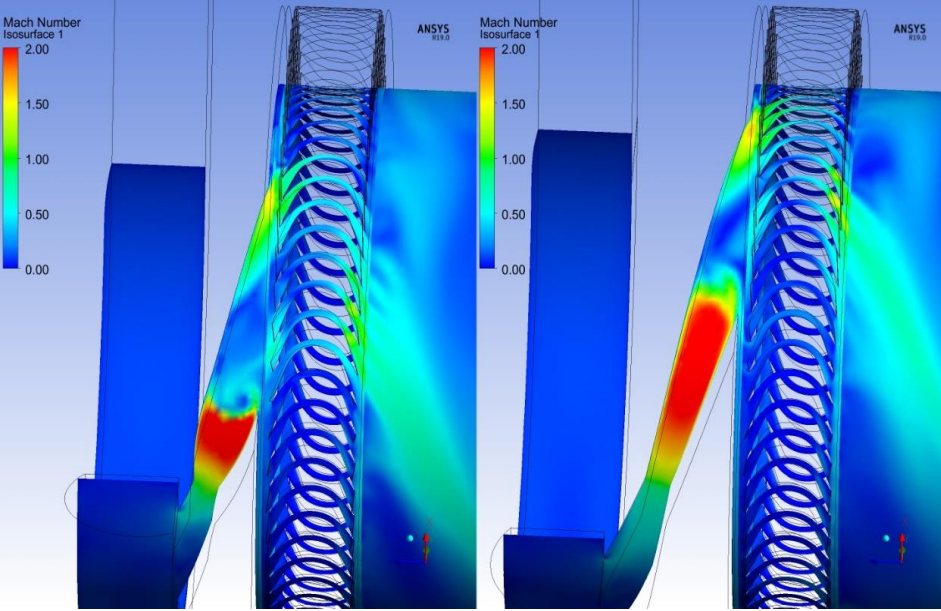
Gelecekte çalışılacak konu önerileri:

- Donanımsal olarak iyileştirilmeye gidilememesi halinde üç boyutlu akış analizlerinde çözüm ağından bağımsızlık çalışması yapılabilmesi için bir yöntem geliştirilmesi.
- Sayısal çalışmaların içerisine ısı transferli HAD analizlerinin de entegre edilmesi.
- Uç açıklığının ve uç kayıplarının sesüstü akışlı türbinlerde aerotermal olarak incelenmesi.
- Sesüstü türbinin tasarım dışı noktalardaki performansının incelenmesi.
- Sesüstü türbinin HAD analizlerinin deneysel çalışmalarla karşılaştırılması.

DİNLEDİĞİNİZ İÇİN TEŞEKKÜRLER

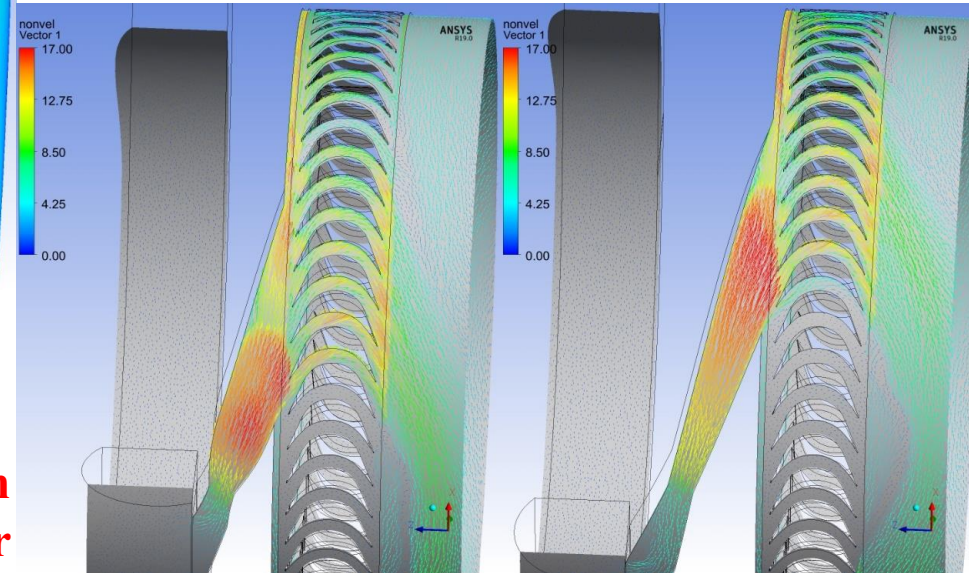
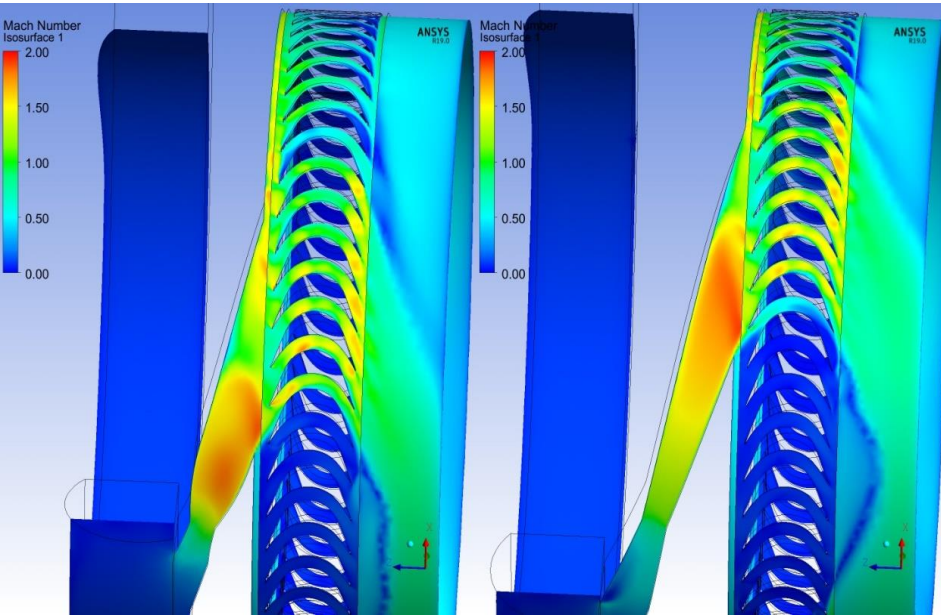


Üç Boyutlu Akış Analizleri Çözüm ve Sonuçların Değerlendirilmesi



Görseller sırası ile birinci ve ikinci tasarım lüle hub çapındaki boyutsuz özellikler olarak verilmiştir.

Üç Boyutlu Akış Analizleri Çözüm ve Sonuçların Değerlendirilmesi



Görseller sırası ile birinci ve ikinci tasarım lüle shroud çapındaki boyutsuz özellikler olarak verilmiştir.

FORMÜLLER

Makinanın Giriş ve Çıkış Şartlarının Belirlendiği Korelasyonlar:

- Toplam basınç oranı $\rightarrow \frac{p_{02}}{p_{01}} = \Pi$
- Toplam sıcaklık oranı $\rightarrow T = \Pi^{(\gamma-1)/\gamma} = \frac{T_{02}}{T_{01}}$
- Basınç-Mach sayısı ilişkisi $\rightarrow \frac{p_0}{p} = (1 + 0,2 M^2)^{3,5}$
- Sıcaklık-Mach sayısı ilişkisi $\rightarrow \frac{T_0}{T} = 1 + 0,2 M^2$
- Mach sayısı $\rightarrow M = \frac{c_{m,orta istasyon}}{\sqrt{\gamma R T}}$
- İdeal gaz yasasına göre yoğunluk $\rightarrow \rho = \frac{p}{\sqrt{R T}}$
- Toplamdan toplama izantropik verim $\rightarrow \eta_{TT} = \frac{\Delta h_0}{\Delta h_{0,s}}$

FORMÜLLER

Makine Enerji Transfer ve Hız Bileşenleri:

- Euler turbomakina denklemi $\rightarrow W = h_{02} - h_{01} = U_2 c_{\theta 2} - U_1 c_{\theta 1}$
- Kütle korunumuna göre aksel hız $\rightarrow c_x = \frac{(m/\rho)}{\pi(r_y^2 - r_g^2)}$
- Teğetsel hız $\rightarrow U = \Omega \cdot r$
- Gerçekte akışkana aktarılan güç $\rightarrow \Delta h_{0,s} \eta_{TT} = \Delta h_0 = U_2 c_{\theta 2} - U_1 c_{\theta 1}$
- Swirl hızları $\rightarrow w_\theta = U - c_\theta$
- Mutlak hız $\rightarrow c = \sqrt{c_x^2 + c_\theta^2}$
- Bağlı hız $\rightarrow w = \sqrt{w_x^2 + w_\theta^2}$
- Çıkış bağlı hız açısı (akış) $\rightarrow \beta_2 = \arctan\left(\frac{w_{\theta 2}}{c_{x 2}}\right)$
- Çıkış mutlak hız açısı (akış) $\rightarrow \alpha_2 = \arctan\left(\frac{c_{\theta 2}}{c_{x 2}}\right)$
- Giriş bağlı hız açısı (akış) $\rightarrow \beta_1 = \arctan\left(\frac{w_{\theta 1}}{c_{x 1}}\right)$
- Giriş mutlak hız açısı (akış) $\rightarrow \alpha_1 = \arctan\left(\frac{c_{\theta 1}}{c_{x 1}}\right)$