

# EKSENEL KOMPRESÖR TASARIM OPTİMİZASYONU ÇALIŞMASI

PREPARED BY	EDITED\CHECKED BY
SOFTINWAY	M. AHMET KOZANOĞLU LİDER HAD MÜHENDİSİ

06/04/2022

## Giriş

Son on yılda endüstri, kompresör akış yolunda ve bileşenlerinin tasarımında yoğun bir şekilde 3 boyutlu simülasyon kullanmaya başladı. Eksenel Kompresör tasarlamak işi bilim ile birlikte sanatı da getiriyor. Çünkü kişinin sezgisine göre parametreleri değiştirmesi gerekir. Bir parametredeki küçük değişiklik, başka bir parametrede büyük değişikliklere yol açabilir. Tasarım ve analizin her aşaması oldukça zaman alıcı olduğundan, çok büyük zaman ve çaba gerektirir. Bu makale, tek tip bir sistem kullanan eksenel akış kompresörünün tasarımını ve optimizasyonunu anlatmaktadır. Bir dizi tasarım parametresi için ön tasarım yapılmış ve test edilmiştir. Modelleme, 1 boyutlu ve 2 boyutlu simülasyonlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonrasında hem HAD hem de yapısal analiz 3 boyutlu simülasyon ile gerçekleştirilmiştir. Optimize edilmiş tasarımın sonuçları, kütle akışı açısından teorik tasarımla yakın bir uyum göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** HAD analizi, Eksenel kompresör optimizasyonu vb.

## 1. Terminoloji

1B tek boyutlu

2B iki boyutlu

3B üç boyutlu

HAD hesaplamalı akışkanlar dinamiği

FEM sonlu elemanlar yöntemi

G : Kg/sn cinsinden kütle akış hızı

M: Mach sayısı

AR: En boy oranı

C: m cinsinden bıçak akoru

S: m cinsinden bıçak aralığı

Ht: m cinsinden bıçak yüksekliği

R: J/Kg-K cinsinden gaz sabiti

$\gamma$ : Özgül ısı oranı.

Cp: J/Kg-K cinsinden sabit basınçta özgül ısı

N: Watt cinsinden güç gereksinimi

$n$ : Devir olarak dönme hızı

Tr: N-m cinsinden tork gereksinimi

U: m/s cinsinden bıçak hızı

V: m/s cinsinden akış hızı

$\beta$ : Derece cinsinden akış açısı

## 2. Problem Tanımı

Günümüzde bütünleşmiş yazılımlar kullanılarak turbo makine elemanları tasarımı yoğun bir şekilde gelişmektedir. Basitleştirilmiş hesaplama modelleri (1B/2B) ve kesin tam boyutlu modeller bu tür sistemlerde kullanılabilir. Dikkatle seçilmiş 1B/2B modeller, deneysel verilerle HAD analizi kullanılarak aerodinamik hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması sonucu görülmüştür ki basitleştirilmiş hesaplamaların ön tasarım için yeterli doğruluktadır. Bu çalışma, proses endüstrileri için gaz türbini motoru için eksenel akış kompresörünün aerodinamik tasarımının optimizasyonunu amaçlamaktadır.

Tasarım

Atmosferik koşulda Kütle Akış hızı 4,91 kg/sn

Rotor hızı 27000 RPM

Giriş Toplam Sıcaklık 288 K

Giriş Toplam Basıncı 101325 N/m<sup>2</sup>

Aşama Sayısı 5

### 3. Ön Tasarım Aşaması

Ön tasarım çözüm üretici, aşama sayısı, geometrik boyutlar ve açılar, ısı düşüşü dağılımları vb. gibi optimum ana akış yolu parametrelerinin hızla seçilmesine yardımcı olur. Ön tasarım prosedürü, ters görev hesaplamasını, yani sınır koşullarına dayalı olarak gerçekleştirir ve akış yolu geometrisini hesaplar. Ön tasarım, aşağıdakileri içeren teknik gereksinimin belirlenmesi, tasarım görevinin ayarlanması ve kompresör kavramsal yerleşiminden başlar:

- Giriş basıncı, sıcaklık, basınç oranı vb. giriş ve çıkış sınır koşulları.
- Kompresör içindeki modül sayısı, her gruptaki kademe sayısı, meridyen ve eksenel boyut sınırlamaları, iş katsayısı gibi kavramsal tasarım ve boyutlandırma düzeni.
- Tasarımcı, tasarım kısıtlamaları olarak ne tür geometrik parametrelerin kullanılması gerektiğine, yani belirli çap ve aralıkları veya kesin değeri ve gereksinimlere veya varsayımlara dayalı olarak kanat yükseklikleri veya açılarına karar vermelidir.

Kompresör ön tasarımını yapabilmek için öncelikle Makine parametrelerinin belirtilmesi gerekmektedir:

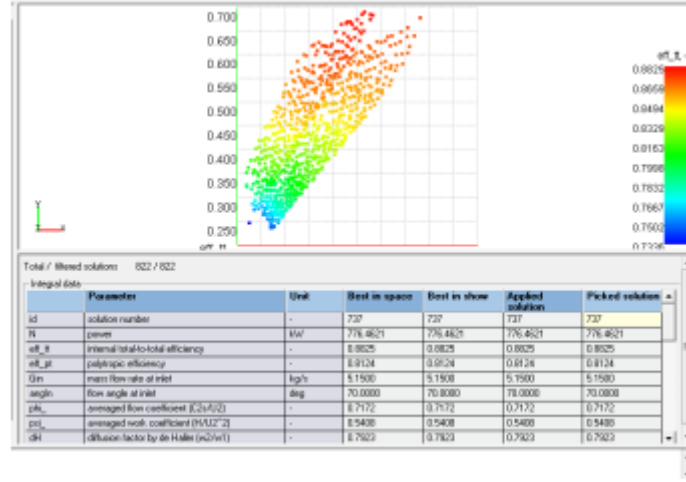
- Giriş ve çıkış durumu tipi ve değerleri.
- Tasarım kriteri, yani güç ve verimlilik seçimi.
- Modül sayısı.

Sonraki adım tasarım verilerine ihtiyaç duyar. Mevcut seçenekler belirli çap, arama noktaları aralığı, yani dikkate alınacak olası tasarım çözümlerinin sayısı, çıkış basıncı, IGV veya OGV kullanımı, tasarım parametre aralıkları veya kesin değerlerdir. Modül kısıtlamaları, aşama sayısı ve eksenel uzunluk sınırlamalarıdır. Verilen veriler ve kısıtlar dahilinde olası tasarımlar elde edilerek, simülasyonların sonuçları Şekil 1'de gösterildiği gibi olacaktır.

a. Oluşturulan tasarımlar

B. Çözümler gözden geçirme tablosu

Açıkça görülebileceği gibi, bu yalnızca kaba bir tahmin ve olası genel tasarımların genel görünümüdür; Tasarım Uzay Gezini'ni kullanarak elde edilen çözümü gereksinimlere göre ince ayar yapmak ve ayarlamak.



Şekil 1 Tasarım Uzay Gezgini

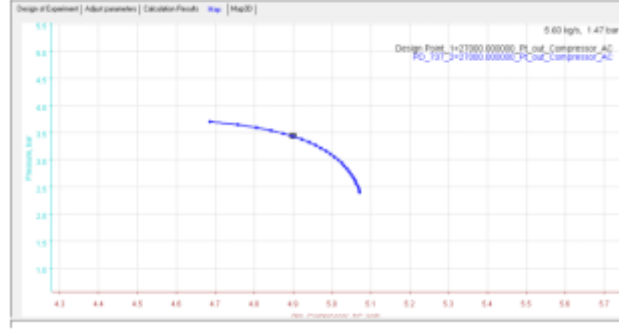
#### 4. Ön Tasarım Aşamasında Kompresör Performanslarının Doğrulanması

Ön Tasarım aşaması tamamlandı ve PD alanı üzerinde tasarım gereksinimlerine karşılık gelen birkaç nokta var. İlerlemek için aralarından en uygun olanı seçmesi gerekiyor. Gösterilen alanda en iyi verim #737 numaralı nokta ile sağlanır. Güncel bir tasarım olarak seçilmesi mantıklı. Amaç, tasarım modunda oluşturulan akış yolunun performanslarını doğrulamak ve gerekirse, ön tasarımı farklı ayarlarla tasarım noktasına veya bazı belirli çalışma aralıkları kriterlerine uyacak şekilde yeniden çalıştırarak bunları ayarlamaktır.

#### 5. Ön Tasarım Aşamasında Seçilen Tasarım Noktası İçin Performans Haritası Oluşturma

Ön tasarım haritalandırma aracı, hız hattında oluşturulan tasarım performanslarının değerlendirilmesine yardımcı olur. Ön tasarım haritalandırma aracı, başlangıçta seçilen kompresör özellikleri değerlendirmesi için gerekli kompresör eğrilerini hesaplamak için kullanılan bir araçtır. Tasarım sürecinin bu aşaması, hız çizgisinin tasarım noktası ile çakışmasını kontrol etmeli ve oluşturulan tasarımla ilerleyebilmesini sağlamak için gaz dinamik kararlılık aralıklarını değerlendirmelidir.

Giriş ve çıkış basınç aralığını kontrol edip ve düzenlenir. Hesaplamayı çalıştırılır ve sonuçlar görselleştirilmiş harita üzerinde görüntülenebilir. Bu hesaplanan performans haritası, tasarlanan kompresör performansları ile hedef tasarım noktası arasındaki farkı gösterir. Tasarımcı, kompresörü farklı performanslarda yeniden tasarlamaya ve tasarım noktasına uymaya karar verebilir, bu nedenle ön tasarımda kütle debisini artırmak veya azaltmak gerekir. Gaz dinamik kararlılık aralıklarını tasarım noktasına göre kaydırmak için ön tasarımda basınç oranını değiştirmek gerekir. Kabul edilebilir aralıktaki fark, mevcut sonuçlarla devam eder. Çözümleri aynı kriterlere göre filtreleyin (akış katsayısı, iş katsayı aralıkları, maksimum Mach sayısı) ve en iyi çözümü mevcut olanın yerine yeni tasarım olarak kaydedilir.



Şekil 2 Orijinal Konfigürasyon

AXMAP'de elde edilen performans karakteristik eğrisi Şekil 2'de gösterilmektedir. Kompresörün performansa uygun olduğunu gösterir, yani verilen hava kütlesini tasarlanmış çıkış basıncında verir, sadece bununla kalmaz, kompresör durma ve boğulma marjı için yeterince geniş bir aralığa sahiptir. Tasarlanan RPM'de boğulma aralığı 2,2 bar ve durma aralığı 3,7 bar'dır.

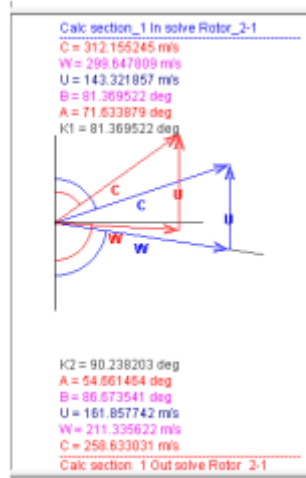
### 5.1 Tasarım Sonrası: Kompresör Akış Yolu Düzenleme

Akış Yolu düzenlemesi, tasarım sonrası Ters Tasarım Görevi çözücü olarak kullanılarak yapılır. Akış yolu geometrisini değiştirirken belirtilen sınır koşullarının ve kütle akış hızının korunduğu anlamına gelir ve bu koşullar aşağıdaki gibidir.

- belirli çap.
- en boy oranı ve kanat genişliği değerleri.

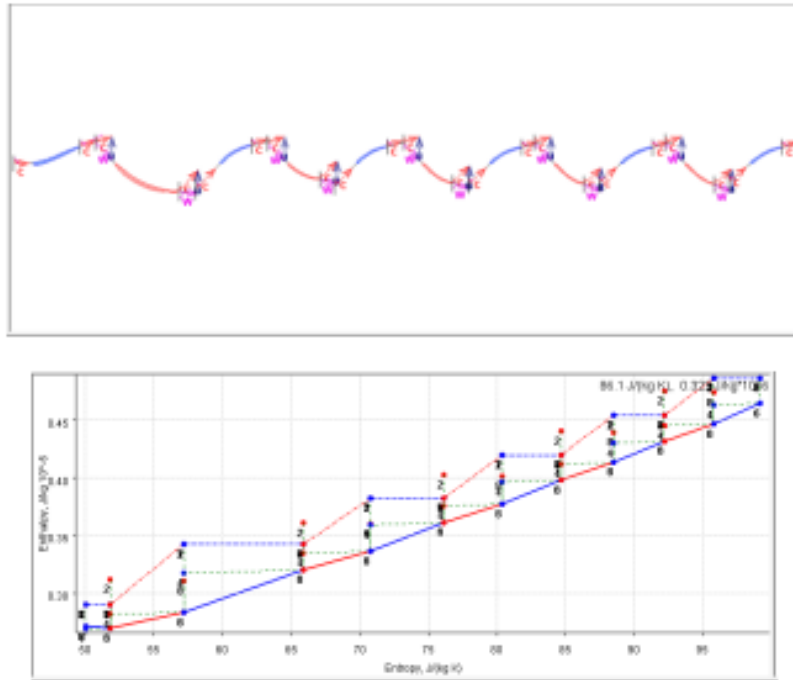
Akış yolu çıkışta yer alan belirli çaptaki genişliğe ve bıçak yüksekliğine bağlı olarak düzenlenebilir. Düzenleme noktalara seçilen çapa göre kullanılabilir. Tüm akış yolunun belirli çaplarının aynı anda ayarlanmasını tek seferde gerçekleştirir. Spline ayarı 4 kontrol noktası ile tanımlanır. Belirli bir çap değiştiğinde, ters tasarım görevi, kanat yüksekliklerini ve metal açılarını yeniden hesaplar.

Ön tasarım tarafından seçilen katılık (göreceli aralık) değere yakın tutularak kanat sayısı, giriş sayısı ve en-boy oranı kontrol etmek için tasarım sonrası geometri ayarı yapılabilir.



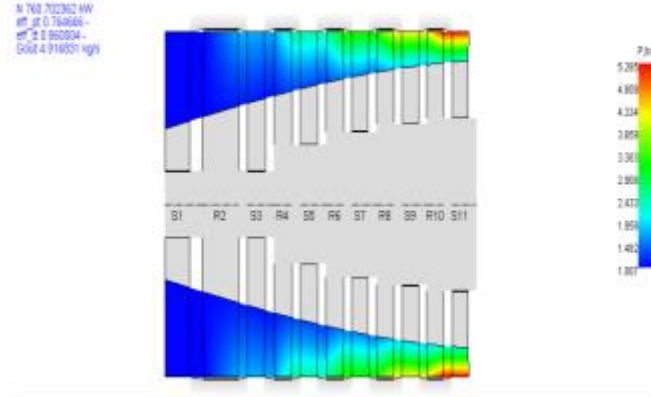
Şekil 3 Kesitte hız üçgeni

Post tasarımı, ilgili bölüm için hız üçgeni ve HS Diyagramını gösterir. Şekil 3 ve Şekil 4, makinenin 1. bölümü için hız üçgenini ve HS Diyagramını gösterir; bu, düzgün akışlı dönüş, yani bıçakların aşırı dönüşü olmayan bir durumu gösterir.



Şekil 4 Silindirin Yukarı Aşağı Hareketi





Şekil 7 Kesit boyunca basınç dağılımı görseli

## 7. AxMAP ile Tasarım Dışı Performans Hesaplaması

AxMAP, 2 değişken için bir dizi hesaplamayı çalıştıran performans haritası üretebilen bir araçtır. (parametre olarak ek değişkenler kullanılabilir). AxMAP, operasyonel parametrelerin kompresör tasarım dışı performansı üzerindeki etkisini incelemek için çok etkili bir araçtır. Ayrıca türbin-kompresör uyumu için gerekli olan kompresör eğrilerini hesaplamak için nihai araçtır. Dönüş hızı, toplam çıkış basıncı gibi değişkenler ve güç, toplam-toplam verim, kütleli debi ve çıkıştaki hacimsel debi, toplam statik ve toplam basınç oranı gibi hedefler seçilerek harita hesaplarının gerçekleştirilmesini sağlar.

Ayrıca Hedefleri ve tasarım değişkenlerini ve aralıklarını seçme.

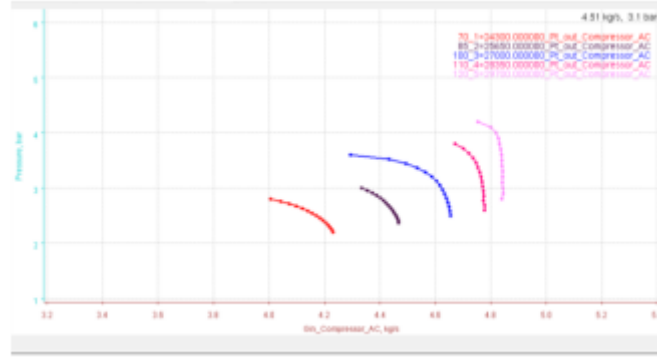
Birincil değişken olarak dönüş hızı, nokta sayısı (hız çizgileri) 5'e ayarlanır ve 24300 ila 29700 RPM arasında değişir

Toplam çıkış basıncını satır olarak ayarlamak için, nokta sayısı 10'a eşit ve hesaplamalar bittikten sonra 2,5 ila 4,0 bar arasında değişiyor, sonuçlar Şekil 7'de gösterilmektedir.

### 7.1 Difüzyon Faktörü ve Durma Tahmini

Tüm kompresör tasarımcıları için kritik sorular, mevcut çalışma modu için nerede (hangi sıralarda) durma olasılığının en yüksek olduğu nasıl tahmin edileceğidir. AxMAP, bu tür bir tahmin için, dolaylı, ancak çok doğru bir difüzyon faktörü kriteri kullanılarak kullanılabilir. Kompresördeki kademeler için farklı çalışma modlarında difüzyon faktörünü tahmin etmek yaptığı işlerden biridir. Bir aksenal akış kompresörünün tasarım dışı performansı, Şekil 8'de gösterildiği gibi geniş bir çalışma aralığını gösteren Güç, Kütle akış girişi, Toplam Basınç oranı ve verimlilik hedefler olarak değişkenler seçilirken, Toplam çıkış basıncı ve RPM olarak değişkenler seçilerek AXMAP kullanılarak değerlendirilir.





Şekil 8 Tasarım dışı performans haritası

## 8. Düz Kesitlerde Profilleme

Kavis hattı boyunca profilleme işlemi 2 eğri ile gerçekleştirilir.

- Kavis eğrisi (Camber line spline)
- Kalınlık eğrisi (thickness spline)

Kalınlık eğrisi simetrik bir profil olup, kavis çizgi eğrileri eğri boyunca ilerler.

Ana düzenleme yaklaşımları şunlardır:

- a. Profil oluşturma kılavuzunda parametreleri manuel olarak düzenleme
- B. Profil oluşturma bölmesiyle açıların düzenlenmesi
- C. Kamber çizgisi eğriliğinin düzenlenmesi
- D. Kalınlık eğrisi düzenlenmesi

Profil kalitesini kontrol etmek için aşağıda yer alan grafik ve konturlar kullanılabilir.

- Mach sayısı
- Bağıl basınç
- Profil eğimi
- Basınçtan kaynaklı yükleme
- Hızdan kaynaklı yükleme

Tasarım performansının kontrol edilmesi, özel bombeli profilleme seçeneği kullanılarak gerçekleştirilen kanat tasarımı ve profilin burii grafiği, uygun mach sayısı dağılımı, eğrilik ve sınır tabaka kalınlığı için 0,05'ten daha düşük bir değer gösterecek şekilde ayarlanması ile sağlanmıştır. HAD hesaplamaları yapılır, bu hesaplamalar mutlak ve bağıl mach sayısı, toplam ve statik basınç, toplam ve statik sıcaklık gibi parametrelerin varyasyonunu gösterir. Şekil 9'da gösterildiği gibi tasarım amacı ile çok iyi uyum gösterir.

### 9. 3 Boyutlu Kanat Tasarımı

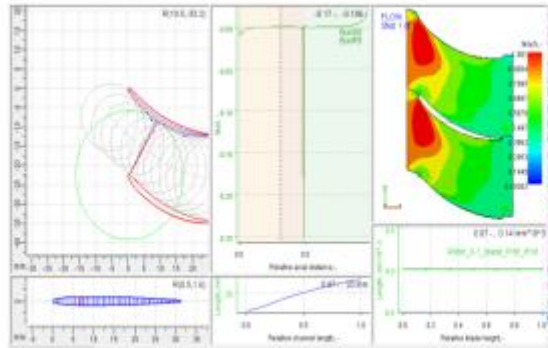
3B kanat tasarımı profil bölümünde gerçekleştirilir. Bu aşamada kompresör içerisinde yer alan kanatların yükseklik, kalınlık ve açı gibi parametreleri ayarlanarak kanat tasarımı sayısal olarak veya şekil üzerinde gerçekleştirilebilir.

Blades 3D aracının tasarım hedefleri;

- Açılar ve diğer geometrik parametrelerin düzgün dağılımını sağlamak
- İstenen kanat kalınlığını sağlamak
- İzin verilen gerilim sınırları içinde kanat yüksekliği boyunca düzgün gerilim dağılımı sağlamak

İki ana kanat tasarımı türü ayırt edilebilir:

- prizmatik kanat
- bükülmüş kanat



Şekil 9 Kanat tasarımı ve HAD analizi

### 10. AxSTRESS'te 3B Yapısal ve Modal Analiz

Mesh ön izleme yapılarak ve istenilen mesh kalitesi belirlenerek yapısal hesaplamalar yapılır. Seçilen ağda kullanılacak eleman sayısı hesaplama sayfasında gösterilir. Yapısal analiz kurulumunda, ağ kalitesini ve aerodinamik yüklerin türünü (sıkıştırılabilir veya sıkıştırılamaz akışkandan) ayarlanabilir, ardından merkezkaç yüklerin hesaplanıp hesaplanmayacağını seçilebilir ve modal analiz için doğal frekansların sayısını ayarlanabilir. Modal analizden gerilim dağılımını ve doğal frekansları

hesaplayabilir ve sonuçları incelenebilir. İstenen parametrenin kontur dağılımı verilebilir ve en yüksek, en düşük değerler nerede oluştu gösterilebilir.

## 11. AxCFD'de 3B Akış Analizi

Tasarlanan kanat yapısının değerlendirilmesi için AxSTREAM yazılımı içerisinde gömülü bulunan AxCFD aracı Navier-Stokes denklem altyapısı ve otomatik ağ oluşturma kabiliyeti ile akış analizleri gerçekleştirilebilir.

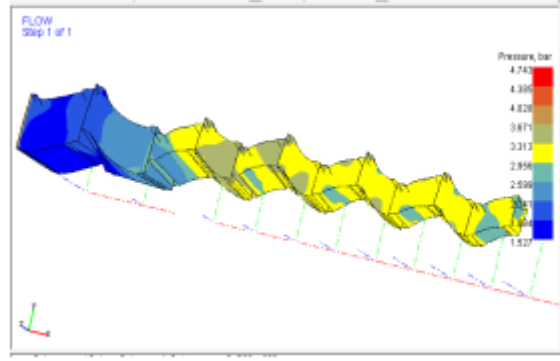
### 11.1 3B Akış Analizi Amaçları

- Akış yolu kalitesini değerlendirme
- 3B HAD sonuçları ile 'streamline' çözücünün sonuçlarının karşılaştırılması
- Akış ayrışması, süpersonik şok ve buna benzer parametrelerin etkilerinin gözlenmesi

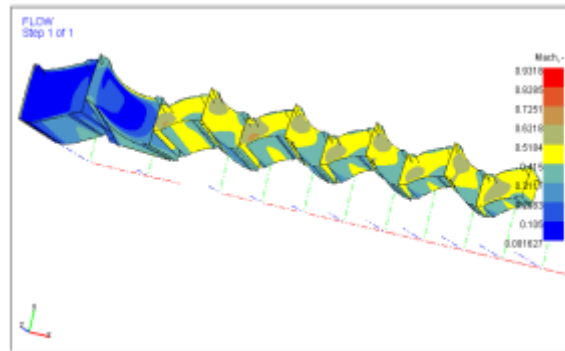
3B HAD çözücüsü aşağıdaki girdilere ihtiyaç duymaktadır.

- Ağ kalitesi – Kanat boyunca gerekli olan ağ kalitesinin yakalanması gerekir.
- Akış analizi adım sayısı veya zamana bağlı analizlerde analiz süresi – Yakınsama kriterinin belirlenmesi
- Önceki adımlarda bulunan sonuçların girdi olarak girilmesi – özellikle zamana bağlı analizlerde önceki analizlerden alınan ilk değerlerin girilmesi.
- Akış analizi adım sayısı veya zamana bağlı analizlerde analiz süresi – Yakınsama kriterinin belirlenmesi
- HO-mesh – kanat profili yüzeyinin yakınında H-O kalitesinde ağ oluşturulması
- Verilen kütle akış miktarı için hesaplamaların yapılması – çıkış basıncı değerine yakınsamak için hesaplamada (esas olarak kompresör hesaplaması için) sabit kütle akış miktarının kullanılması gerekir. Kütle akış hızı değeri ilgili alanda belirtilmelidir.
- HAD analizi için mertebenin (order) belirlenmesi – böylece analiz daha doğru ve stabil bir şekilde koşacaktır.
- Viskozite – hesaplama sonuçları üzerinde viskozite etkisi sağlar
- Türbülans modelleri – türbülans modellerinin seçimi ve türbülans seviyesi
- Kanal uzantısı – kanal uzantısı uzunluğunu yüzde olarak ayarlanması

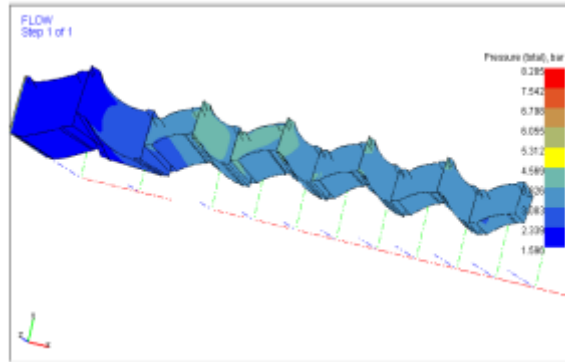
Hızlı yakınsama ve kaba tahmin için önce kaba ağ kalitesi ile, ardından ince ağ, viskozite, türbülans seviyesi ile hesaplamaları yapmak ve hedef kütle akışına, yani giriş kütle akış hızı, çıkış kütle akış hızına eşit olduğunda hesaplamaları tamamlamak. Şekil 10, 11, 12, 13 geniş boğulma ve durma marjı için AXSTREAM aracılığıyla optimizasyon hedefine ulaşmak için tasarıma çok yakın olan basınç, Mach sayısı gibi makine boyunca akış parametrelerinin varyasyonunu gösterir.



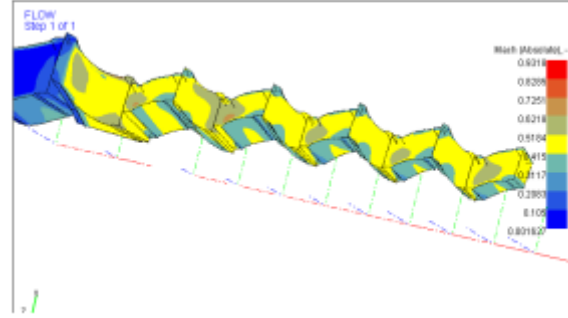
Şekil 10 Basınç Dağılımı



Şekil 11 Mach Sayısı Dağılımı



Şekil 12 Total Basınç Dağılımı



Şekil 13 Mutlak Mach Sayısı Dağılımı

## 12. Sonuç

Bir gaz türbin motorunun aksel akış kompresörü için aerodinamik tasarımın optimizasyonu, AXSTREAM kullanılarak elde edilir. Kademe çıkış ortalama basınç oranı ve mach sayısı, tasarım amacı ile eşleşmektedir. Difüzyon faktörü ve Dehaller sayısı, makine genelinde hem rotor hem de stator için izin verilen aralıktadır. Toplam kayıp katsayısı hem rotor hem de stator için 0,03 ila 0,08 aralığındadır. İlgili bölümdeki 2B HAD sonuçları, Mach sayısı mutlak basınç açısından tasarım değerleri ile uyumludur. AXSTRESS kullanılarak yapılan FEA hesaplamaları ve gerilmelerin izin verilen aralıkta olduğu gözlemlenmiştir, ancak Campbell diyagramı, çalışma modunu geçen doğal frekanslardan birinin, tasarımın yapısal hatasından kaçınmak için Rotor Dinamik Analizinin yapılması gerektiği anlamına geldiğini göstermektedir.