

## RÖLANTİ ALTI KOMPRESÖR HARİTALARI İÇİN B-SPLINE TABANLI UZATMA

Emrah Güllü<sup>1</sup> ve Gökhan Aran<sup>2</sup>  
TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş., Ankara

### ÖZET

*Bu makalede özgün bir rölanti altı kompresör harita uzatma stratejisi sunulmuştur. Öncelikle, bir ön tahmin prosedürü geliştirilmiştir. Bu prosedür rölanti civarı bir hız verisini girdi olarak almakta ve rölanti altı hızlar için ön eğriler oluşturmaktadır. Daha sonra, bu ön eğriler üzerine B-spline eğrileri oturtulmuştur. B-spline eğrileri kontrol noktaları ile kolayca düzenlenebilen düzgün eğrilerdir. Son olarak, bu eğriler fiziksel olarak tutarlı hale gelecek şekilde düzenlenmiştir. Fiziksel tutarlılık daha önce Kurzke tarafından geliştirilen kurallar ile kontrol edilmektedir. Bu kurallar sıkıştırılamaz akış benzerlik yasalarını kullanmakta ve sıkıştırılabilirlik etkileri için bazı tahminler yapmaktadır. Literatürden alınan 2 adet örnek kompresör haritası geliştirilen metodoloji ile rölanti altına uzatılmıştır. Tahmin edilen torksuz yel değirmeni etkisi karakteri mevcut test verisi ile karşılaştırılmış ve iyi bir uyum gözlemlenmiştir.*

### GİRİŞ

Rölanti altı operasyon tamamen durağan durum ile stabilize rölanti durum arasındaki operasyonu ifade etmektedir. Rölanti altı operasyon sırasında motorda gerçekleşen temel fiziksel prosesler rölanti üstü operasyondan çok farklı değildir. Fakat, yüksek kalite komponent test verisi elde edilemediği için komponent performanslarındaki belirsizlik daha yüksektir. Çoğu akış çözücüsü ve performans korelasyonu da rölanti üstü için kalibre edilmiştir. Tüm bunlar fizik tabanlı bir rölanti altı harita uzatma stratejisine olan ihtiyacı göstermektedir.

Rölanti altı harita uzatma ile ilgili yapılmış erken çalışmalar sıkıştırılamaz akış benzerlik yasaları kullanarak basit ekstrapolasyon yöntemleri kullanmıştır [Sexton, 2001; Gaudet ve Gauthier, 2007; Riegler vd., 2001]. Daha yeni çalışmalar ise 0-hız eğrisi için bir hesaplama veya tahmin yapmayı ve ekstrapolasyon yerine interpolasyon yapmayı tercih etmektedir. Howard [2007], Zachos vd. [2010, 2011] ve Grech [2013] rölanti altı haritaları hesaplanan 0-hız eğrileri kullanarak interpole etmiştir. Bu 0-hız eğrileri HAD analizlerinden elde edilen kayıp katsayıları ile hesaplanmıştır.

Ferrer-Vidal vd. [2018] 0-hız ve torksuz yel değirmeni etkisi (0-tork) karakterlerini elde etmek için bir aksenel kompresör test düzeneği tasarlamıştır. Bu testten elde edilen veriler rölanti altı haritaları interpole etmek için kullanılmıştır. 0-tork karakterinin interpolasyon sürecine dahil edilmesi sonuçları önemli ölçüde iyileştirmiştir. Righi vd. [2020] 2 farklı düşük merteye model kullanarak 0-hız ve 0-tork eğrilerinin bir aksenel kompresör için hesaplanmasına çalışmıştır. Bu modeller üç boyutlu RANS HAD analizleri ve test sonuçları kullanılarak doğrulanmıştır. Ferrer-Vidal vd. [2020] bu hesaplanan 0-hız ve 0-tork eğrilerini kullanan bir rölanti altı harita interpolasyon stratejisi sunmuştur. Bu çalışma interpolasyon eksenini olarak düzeltilmiş shaft hızı yanında çıkış düzeltilmiş debi (ECMF) parametresini kullanmıştır. Bu parametrenin fiziksel önemi daha sonra açıklanacaktır.

<sup>1</sup> Şef Mühendis, Şef Mühendislik Ofisi, E-posta: emrah.gullu@tei.com.tr

<sup>2</sup> Kıdemli Şef Mühendis, Şef Mühendislik Ofisi, E-posta: gokhan.aran@tei.com.tr

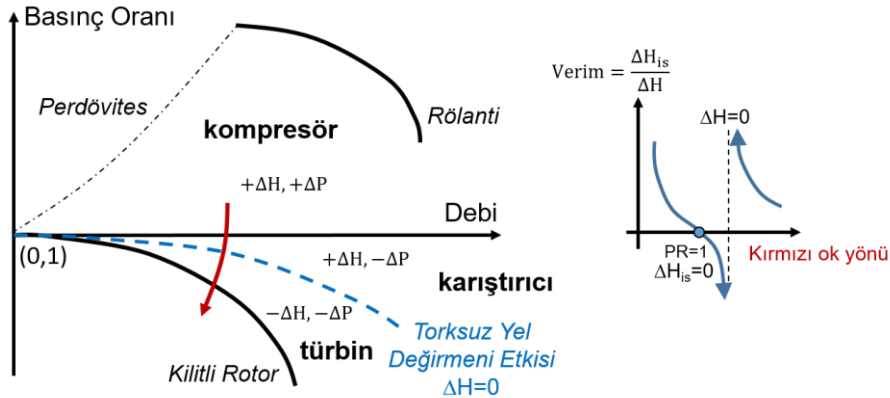
Kurzke ve Marie [2019] kompresör geometrisinin bilinmesini gerektirmeyen yeni bir rölanti altı harita interpolasyon stratejisi geliştirmiştir. Bu stratejide 0-hız eğrisi önce tahmin edilip daha sonra uzatılan harita çeşitli korelasyonlar ile kontrol edilmiştir. Bu korelasyonlar uzatılacak olan haritanın halihazırda mevcut olan kısımlarından türetilmiştir. Sıkıştırılmaz akış teorisi çıkış kılavuz kanadı Mach sayısını temel alan sıkıştırılabilirlik düzeltmeleri ile birlikte kullanılmıştır. Özgül düzeltilmiş tork ve düzeltilmiş debi arasındaki doğrusal ilişkinin sıkıştırılmaz bölgede hızdan bağımsız bir eğime sahip olduğu görülmüş ve bu tork haritalarını uzatmak için kullanılmıştır. Daha sonra, Kurzke [2023] bu stratejiler ile uzatılan haritaları kullanan bir turbofan modeli sunmuş ve bu haritaların gerçekten fiziksel olarak tutarlı olduğunu göstermiştir. Kısa süre önce, Kurzke [2023] çok düşük şaft hızları için bu uzatma stratejilerine bir iyileştirme yayınlamıştır. Kompresör haritalarını %10'dan daha düşük şaft hızlarına uzatmak oldukça zordur. Bunun sebebi iş-akış korelasyonlarının çok hassas hale gelmesidir. Kurzke [2023] bu problemi bu hızlar için ikinci bir beta çizgisi seti kullanarak çözmüştür. Beta çizgileri normalde kompresör haritalarını tablolayabilmek için kullanılan fiziksel anlamı olmayan yapay çizgilerdir. Ancak, Kurzke'nin %10'dan daha düşük hızlar için kullandığı ikinci beta çizgisi seti fiziksel bir anlama sahiptir ve sabit akış katsayısı noktalarını temsil etmektedir.

Bu makalede yeni bir rölanti altı kompresör harita uzatma stratejisi sunulmuştur. Bu strateji Kurzke ve Marie [2019] tarafından sunulan kuralları temel almaktadır. Öncelikle, bu kurallar ve arkasındaki teorik altyapı verilmiştir. Daha sonra, önerilen strateji detaylandırılmış, ilk tahmin prosedürünün nasıl çalıştığı ve B-spline eğrilerinin son düzenlemeleri yapmak için nasıl kullanıldığı açıklanmıştır. Son olarak, önerilen strateji kullanılarak 2 adet örnek eksenel kompresör haritası uzatılmış ve elde edilen torksuz yel değirmeni etkisi karakterleri test verileri ile karşılaştırılmıştır.

## TEORİK ALTYAPI

### Rölanti altı operasyon modları

Kompresörler rölanti altı operasyon sırasında farklı operasyon modlarında çalışabilir. Bunlar kompresör, karıştırıcı ve türbin modlarıdır. Şekil 1 bu modların kompresör haritasında nasıl yerleştiğini göstermektedir. Kompresör modu hem basınç hem entalpinin artmasını sağlar. Karıştırıcı modunda kompresör halen akışa enerji ekler, fakat basıncı artıramaz. Türbin modu ise akıştan enerji çekilmesine ve basınç düşümüne sebep olur. Şekil 1 beklenen verim davranışını da göstermektedir. Görüldüğü gibi bazı bölgelerde verim negatif, hatta tanımsız hale gelebilir. Bu sebeple, rölanti altı hesaplar için verim yerine tork haritalarının kullanımı tercih edilmektedir. Tork haritaları rölanti altı için daha düzgün ve öngörülebilir hareket etmektedir.



Şekil 1: Rölanti Altı Operasyon için Kompresör Çalışma Modları ve Verim Davranışı [Tio vd., 2022]

### Sıkıştırılmaz akış benzerlik yasaları

Tek kademe bir kompresör için sıfır sapma açısı ve sabit yoğunluk kabulleri yapılırsa, Euler türbin denklemi iş ( $\psi = \Delta h / U_2^2$ ) ve akış ( $\phi = W / (\rho_1 A_2 U_2)$ ) katsayıları arasında şu ilişkiyi verir:

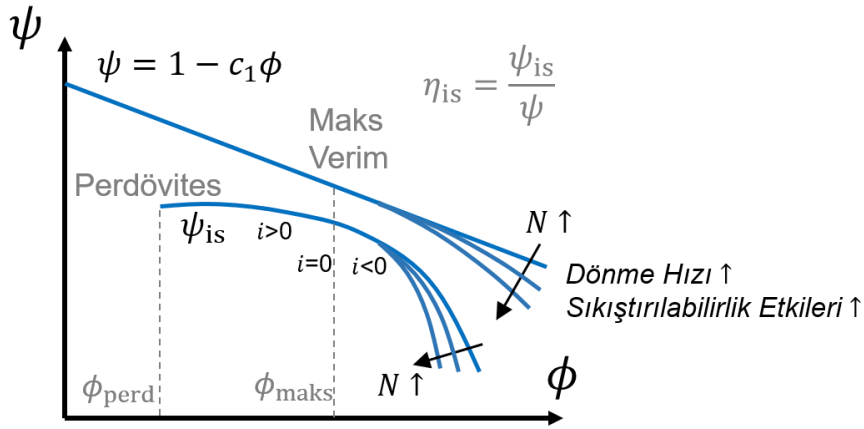
$$\psi = 1 - c_1 \phi \quad (1)$$

Burada  $c_1$  pozitif bir sabittir. Denklem 1 ve  $W \Delta h = \omega \tau$  eşitliği birlikte kullanılırsa, özgül tork ( $\tau / W$ ) için şu ilişki elde edilebilir:

$$\frac{\tau}{W} = c_2 U_2 - c_1 c_2 c_3 W = W c_2 c_3 \frac{\psi}{\phi} \quad (2)$$

Burada  $c_2$  ve  $c_3$  pozitif sabitlerdir. Denklem 2 düşük debi ve düşük hız bölgelerine tork haritalarını uzatmak için kullanılabilir. Bu bölgelerde sıkıştırılabilirlik etkileri ihmal edilebilecek kadar azdır. Bu denklem özgül tork eğrilerinin debiye göre çizildiğinde doğrusal olacağını ve farklı hıza ait eğriler arasındaki mesafenin hız farkı ile orantılı olacağını söylemektedir.

Şekil 2 gerçek ve ideal bir kompresör için iş ve akış katsayıları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu ilişki, daha önce bahsedildiği üzere, sabit yoğunluk ve sıfır sapma açısı için doğrusaldır. Fakat, basınç oranından direk olarak hesaplanabilen izantropik iş katsayısı ( $\psi_{is}$ ) ve akış katsayısı arasındaki ilişki kayıplar sebebiyle doğrusal değildir. Verimin maksimum olduğu bir akış katsayısı değeri vardır ve bu değerden uzaklaştıkça verim düşer. Düşük debilerde, hücum açısı artar ve bir noktada perdövites görülür. Yüksek debilerde ise boğulma akış kapasitesini limitler ve kompresör karakterleri dikleşir. Bu dikleşme dönüş hızı arttıkça sıkıştırılabilirlik etkileri daha önemli hale geldiği için artar. Maksimum verim tüm rölanti altı hızlar için aynı  $\phi$  ve  $\psi$  değerlerine denk geldiği için, Denklem 2'den görüldüğü üzere maksimum verim noktaları özgül tork - debi grafiğinde orijinden geçen düz bir çizgi oluşturmaktadır.



Şekil 2: Bir Kompresör için İş-Akış Katsayı Korelasyonları [Kurzke ve Marie, 2019]

### 0-Hız ve 0-Akış Karakterleri

Kompresörler kilitli rotor (0-hız) durumunda temel olarak kısıtlamalar ile dolu bir borudur. Toplam sıcaklık sabit kalırken toplam basınç sürtünmeler ve kısıtlamalar dolayısıyla düşer. Sıkıştırılmaz akış kabulü yaparsak, 0-hız çizgisi hakkında bilinenler şunlardır:

- Basınç oranı - Debi çizgisi ( $W = 0, PR = 1$ ) noktasından geçen bir parabolüdür:  $PR = 1 - k_1 W^2$ .
- Özgül tork - Debi çizgisi orijinden geçen düz bir çizgidir:  $\tau/W = -k_2 W$ .

$k_2$  sabiti mevcut düşük hız verisinin düşük debi bölgesinden hesaplanabilir. Fakat,  $k_1$  sabitini belirlemek daha zordur. Kilitli rotor durumunu simüle eden HAD analizleri veya rig testleri bu amaçla kullanılabilir.

Kompresörlerin 0-debi karakterleri hız üçgenlerinin bu durumda neye benzeyeceği öngörülerek elde edilebilir. Bu durumda kompresörler akışa enerji vermeye (yani kompresör olarak çalışmaya) devam eder. Bu Denklem 2'den de görülebilir (0-debi için  $\tau/W = c_2 U_2$ ). 0-debi basınç oranları ise şu şekilde hesaplanabilir:

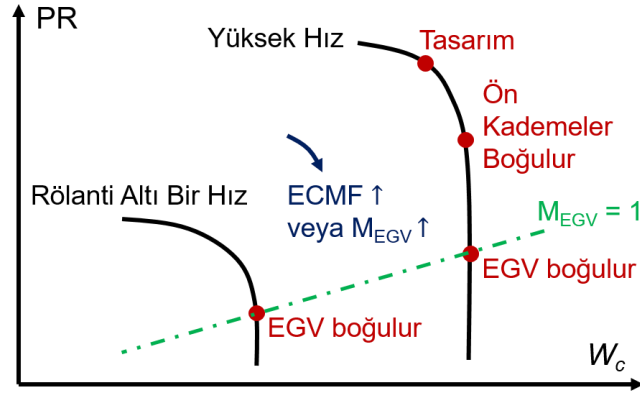
$$PR \frac{\gamma-1}{\gamma} = 1 + (\gamma - 1) \frac{U_2^2}{\gamma R T_1} \quad (3)$$

### Sıkıştırılabilirlik etkileri

Kompresörlerin çıkış kılavuz kanat (EGV) boğazı tasarım noktasında yüksek yoğunluklu bir akışkan görür ve bunun için tasarlanır. Fakat, düşük hızlarda kompresör boyunca fazla bir yoğunluk artışı olmaz. Bu düşük hızlarda maksimum debinin EGV boğazı tarafından kısıtlanmasına

sebepler olur. EGV boğazındaki toplam basınç ve sıcaklık kompresör çıkış değerlerine eşit kabul edilebilir. Boğaz alanı sabit olduğu için EGV boğaz Mach sayısı ( $M_{EGV}$ ) tamamen kompresör çıkışındaki düzeltilmiş debiye (ECMF) bağlıdır. Bu yüzden sıkıştırılabilirlik etkilerini değerlendirmek için  $M_{EGV}$  veya ECMF kullanılabilir.

Bir kompresör için tipik boğulma karakteri Şekil 3 ile gösterilmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi düşük hızlarda boğulma EGV boğazında olur. Yüksek hızlarda ise boğulma daha ön kademelerde başlar ve basınç düştükçe EGV'ye doğru kayar.  $M_{EGV} = 1$  çizgisi Basınç Oranı - Debi grafiğinde (0,0) noktasından geçen doğrusal bir çizgi olarak kabul edilebilir. Bu çalışmada tüm rölanti altı hızlarda boğulmanın bu çizgi üzerinde olacağı kabul edilmiştir.



Şekil 3: Bir Kompresör için Tipik Boğulma Karakteri

Sıkıştırılamaz akış teorisi belli bir  $M_{EGV}$  değerinden sonra bozulmaya başlar. Bu değer genellikle 0.35-0.4 arasındadır [Kurzke ve Marie, 2019]. Denklem 2 ile doğrusal olarak bulunan özgül tork çizgileri sıkıştırılabilirlik etkileri ile aşağıya doğru bükülür. EGV boğulma sonrası basınç oranının düşmesi rotorları etkileyemez. Bu yüzden özgül tork basınç oranı ile değişmez. Bu rölanti altı özgül tork - debi eğrilerinin dikey kısımlarının olmayacağını söyler. EGV boğulmasından sonra tüm basınç oranı noktaları aynı özgül tork değerine sahiptir.

### B-spline eğrileri

Bir B-spline birçok p-mertebe polinom parçasının kırılma noktalarında  $C^{p-1}$  sürekli bir şekilde birleştirilmesinden oluşur. Bir B-spline eğrisi parametrik olarak şu şekilde tanımlanabilir:

$$\mathbf{r}(u) = \begin{bmatrix} x(u) \\ y(u) \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^{n-1} \mathbf{c}_i N_{i,p}(u), \quad n \geq p + 1 \geq 1, \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (4)$$

Burada  $\mathbf{c}_i$  n sayıda kontrol noktasının koordinatları ve  $N_{i,p}(u)$  B-spline baz fonksiyonudur. B-spline koordinatları,  $\mathbf{r}(u)$ , parametrik bir şekilde  $u$  parametresi cinsinden tanımlanmıştır.  $N_{i,p}(u)$  şu şekilde özyinelemeli olarak hesaplanır:

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{for } U_i \leq u < U_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

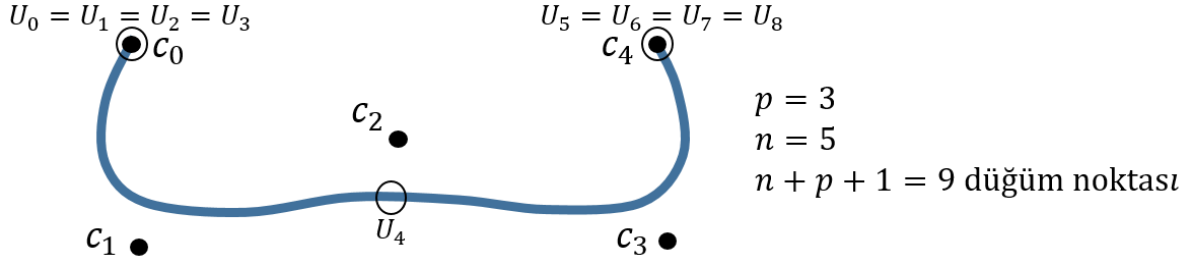
$$N_{i,p}(u) = \frac{u - U_i}{U_{i+p} - U_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{U_{i+p+1} - u}{U_{i+p+1} - U_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u)$$

Burada  $U$  n+p+1 elemana sahip düğüm dizidir ve şu şekilde tanımlanır:

$$U = \left[ \underbrace{U_0, \dots, U_p}_{\substack{p+1 \\ \text{eşit düğüm} \\ =0}}, \underbrace{U_{p+1}, \dots, U_{n-1}}_{\substack{n-p-1 \\ \text{düğüm} \\ \text{Eşit Aralıklı}}}, \underbrace{U_n, \dots, U_{n+p}}_{\substack{p+1 \\ \text{eşit düğüm} \\ =1}} \right] \quad (6)$$

Düğüm dizininin uç noktalarda p+1 kere tekrar edilmesi uç noktaların kontrol poligonu ile üst üste gelmesini sağlar. Buna kenetli B-spline eğrisi denir. Düğüm dizisi tanımına göre başka tipte B-spline eğrileri de elde edilebilir.

Şekil 4 kübik bir kenetli B-spline için örnek olarak kontrol ve düğüm noktalarını göstermektedir.



Şekil 4: Örnek Bir B-spline Eğrisi

B-spline eğrilerinin eğimi şu şekilde hesaplanabilir:

$$\dot{\mathbf{r}}(u) = \begin{bmatrix} \dot{x}(u) = dx/du \\ \dot{y}(u) = dy/du \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^{n-2} p \frac{c_{i+1} - c_i}{U_{i+p+1} - U_{i+1}} N_{i,p-1}(u) \quad (7)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy/du}{dx/du} = \frac{\dot{y}(u)}{\dot{x}(u)}$$

Eğim formülü için düğüm dizini Denklem 6'da verilen dizini ilk ve son elemanı atılarak elde edilir.

$\mathbf{Q} = [\mathbf{Q}_0, \dots, \mathbf{Q}_{m-1}]$  ile verilen  $m$  veri noktasına B-spline eğrisi oturtmak için en küçük kareler metodu kullanılabilir [Tang, 2015]. Burada amaç bir veri setine uyan en iyi  $n$  kontrol noktasını bulmaktır. Öncelikle bu çalışmada kenetli bir B-spline yapısı kullanıldığı için, ilk ve son kontrol noktaları için şu söylenebilir:

$$c_0 = \mathbf{Q}_0, \quad c_{n-1} = \mathbf{Q}_{m-1} \quad (8)$$

Geri kalan kontrol noktaları ( $n-2$  adet) en küçük kareler yöntemi ile hesaplanabilir. Bu kontrol noktaları cinsinden minimize edilmesi gereken maliyet fonksiyonu şudur:

$$f = \sum_{k=1}^{m-2} \|\mathbf{Q}_k - \mathbf{r}(u_k)\|^2, \quad u_k = \frac{k}{m-1}$$

$$f = \sum_{k=1}^{m-2} \left\| \mathbf{Q}_k - \sum_{i=0}^{n-1} c_i N_{i,p}(u_k) \right\|^2 \quad (9)$$

$$= \sum_{k=1}^{m-2} \left\| \underbrace{\mathbf{Q}_k - \mathbf{Q}_0 N_{0,p}(u_k) - \mathbf{Q}_{m-1} N_{n-1,p}(u_k)}_{\mathbf{R}_k} - \sum_{i=1}^{n-2} c_i N_{i,p}(u_k) \right\|^2$$

$$= \sum_{k=1}^{m-2} \left\| \mathbf{R}_k - \sum_{i=1}^{n-2} c_i N_{i,p}(u_k) \right\|^2$$

$f$  maliyet fonksiyonu  $c_l$  kontrol noktasına göre minimize edilmek istenirse, şu yazılabilir:

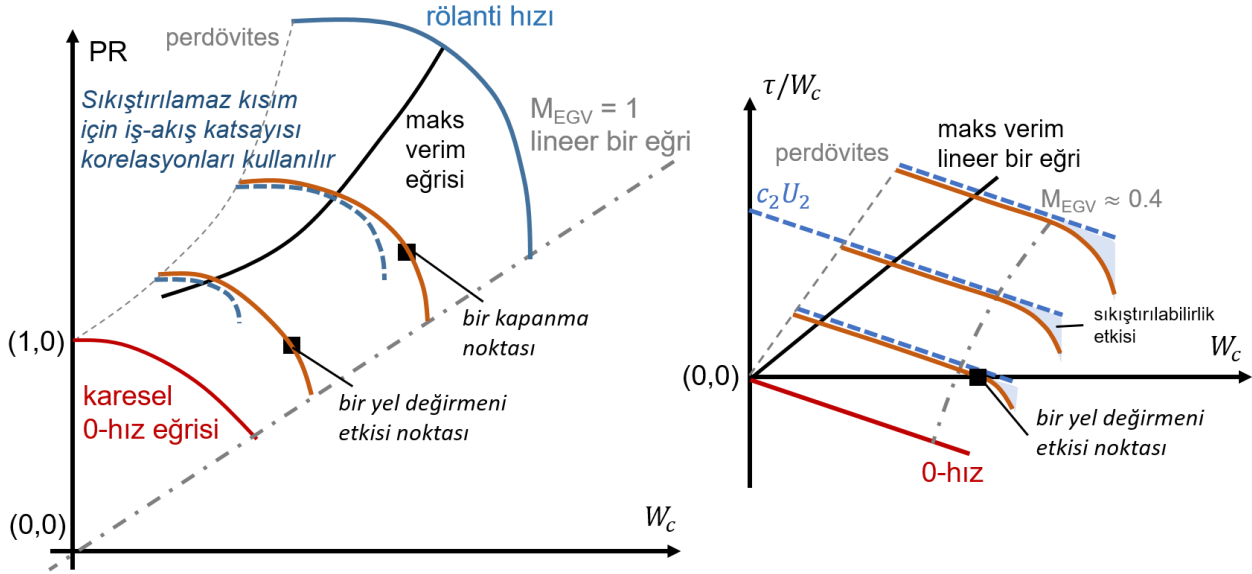
$$\frac{\partial f}{\partial c_l} = \sum_{k=1}^{m-2} \left( -2N_{l,p}(u_k) \mathbf{R}_k + 2N_{l,p}(u_k) \sum_{i=1}^{n-2} c_i N_{i,p}(u_k) \right) = 0, \quad l = 1, \dots, n-2 \quad (10)$$

Denklem 10  $n-2$  bilinmeyen kontrol noktası için  $n-2$  denklem tanımlamaktadır. Bu denklem sistemi şu şekilde düzenlenebilir:

$$\underbrace{\sum_{k=1}^{m-2} \sum_{i=1}^{n-2} N_{l,p}(u_k) N_{i,p}(u_k)}_{A_{l,i}} c_i = \sum_{k=1}^{m-2} \underbrace{N_{l,p}(u_k) \mathbf{R}_k}_{b_l}, \quad l = 1, \dots, n-2 \quad (11)$$

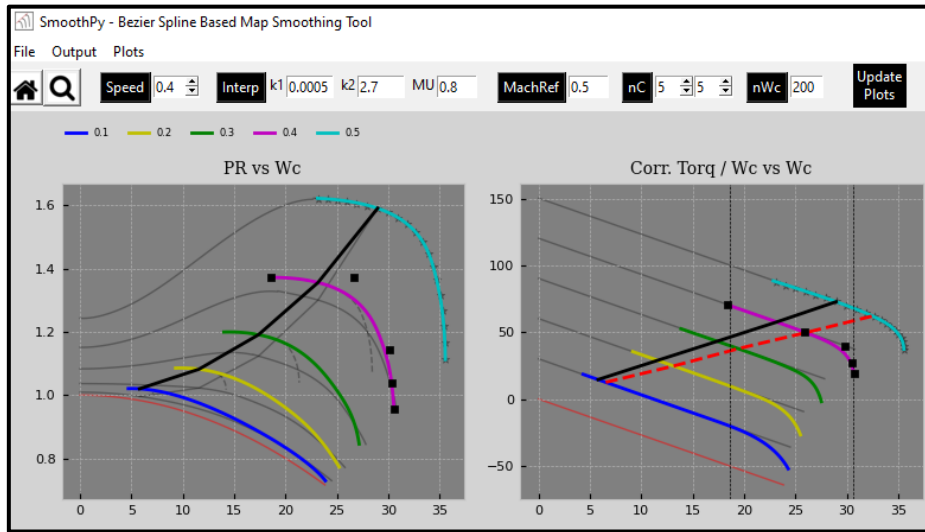
## ÖNERİLEN STRATEJİ

Bir önceki kısımda anlatılan teori Şekil 5 ile özetlenmiştir. Sıkıştırılmaz düşük debi kısımları iş-akış katsayı korelasyonları ile elde edilebilir. Sıkıştırılabilir kısım için Basınç Oranı - Debi grafiğinde EGV boğulmasının gerçekleşeceği ve karakterlerin dikeyleşeceği kısım bilinmektedir. Fakat, bu durum farklı eğriler tarafından sağlanabilir ve tek bir çözüme ulaşmak çok mümkün değildir. Eğer testlerden sıkıştırılabilir kısım için fazladan bilgi edinilebilirse, bu bilgi karakterleri kısıtlamada kullanılabilir. Bu bilgiler yel değirmeni etkisi veya motor kapatma testleri sırasında elde edilebilir. 0-hız ve torksuz yel değirmeni etkisi operasyonları için yapılan rig testleri veya HAD analizleri de sıkıştırılabilir kısımdaki belirsizliği azaltmada kullanılabilir. Özgül tork eğrileri için Denklem 2 kullanılabilir. Fakat, belli bir  $M_{EGV}$  değerinden sonra boğulma kayıpları artacak ve eğriler aşağı bükülecektir. Bu bükülmenin her hızda aynı  $M_{EGV}$  değerinden sonra başlayacağı ve eğimlerin  $M_{EGV}$  değerine göre olan trendinin benzer olacağı kabul edilmiştir.



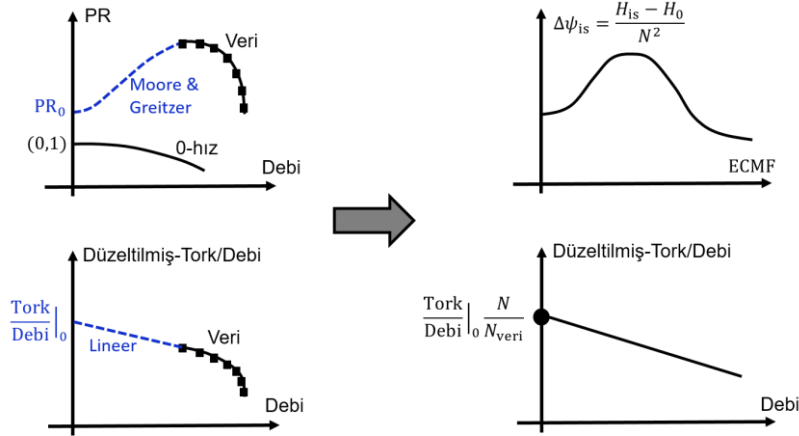
Şekil 5: Rölanti Altı Uzatma için Kullanılan Genel Strateji

Bahsedilen stratejiyi uygulamaya başlamak için ilk başta bir ön tahmin prosedürü geliştirilmiştir. Bu prosedür rölanti altı haritaları rölanti hızı verisini kullanarak otomatik olarak üretmektedir. Fakat, üretilen haritalar ufak düzenlemelere ihtiyaç duymaktadır. Bu düzenlemeler SmoothPy adı verilen kurum için bir araç sayesinde yapılmaktadır. Bu araç ön tahmini yapılan hız verilerine B-spline eğrileri oturtmakta ve gerçek zamanlı olarak kontrol noktaları ile yapılan düzenlemelerin korelasyonlar üzerine etkisini göstermektedir. Şekil 6'da bu araca ait bir ekran görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6: Kurum İçi Araç SmoothPy'dan Bir Ekran Görüntüsü

Ön tahmin prosedürü şu şekilde çalışmaktadır. Öncelikle elde olan rölanti hızı Moore ve Greitzer [1986] tarafından geliştirilen kübik karakter ve özgül tork karakterinin doğrusallığı kullanılarak 0-debiye uzatılmıştır. Daha sonra, bağıl izantropik iş katsayısı ( $\Delta\psi_{is}$ ) ve hıza göre normalize edilmiş özgül tork verisi sırasıyla ECMF ve debiye göre çizdirilmiştir. Elde edilen eğriler, her bir rölanti altı hız için PR ve tork karakterini elde etmek için kullanılabilir. Şekil 7 ile ön tahmin prosedürü görselleştirilmiştir. Bu prosedür ile elde edilen haritalar kullanıcıya güzel bir başlangıç noktası vermekte ve gerekli korelasyonlar ufak kontrol noktası düzenlemeleri ile sağlanabilmektedir.



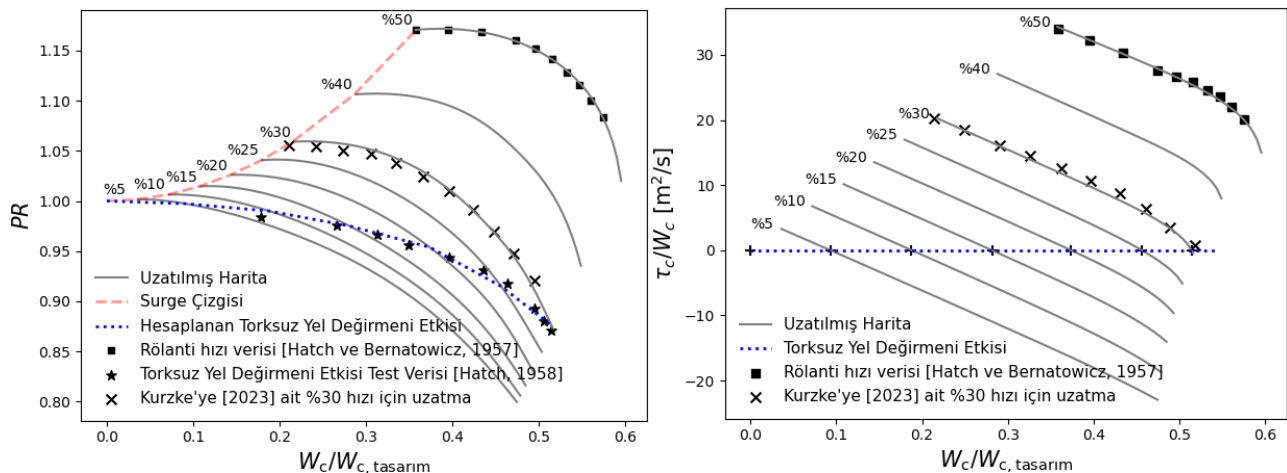
Şekil 7: Ön Tahmin Prosedürü

## UYGULAMALAR

Bu bölümde 2 farklı aksenal kompresör için geliştirilen metodoloji ile rölanti altı haritalar elde edilmiştir. Bu kompresörlerin torksuz yel değirmeni etkisi karakterleri için literatürde test verisi mevcuttur. Bu veri harita uzatma için kullanılan stratejinin doğruluğunu ölçmek için kullanılmıştır.

### NACA transonik kompresör

2 kademe bir transonik kompresöre ait rölanti üstü ve yel değirmeni etkisi karakterleri Hatch ve Bernatowicz [1957, 1958] tarafından verilmiştir. %50 hızı için verilen değerler kullanılarak geliştirilen metodoloji uygulanmış ve rölanti altı haritalar elde edilmiştir. Elde edilen yel değirmeni etkisi karakterleri için test verisi karşılaştırmaları Şekil 8 ve 9 ile verilmiştir. Ayrıca Kurzke [2023] tarafından %30 hızı için yapılan tahmin bu figürlerde görülebilir. Genel olarak test verisi ve Kurzke'nin tahminleri ile iyi bir uyum yakalanmıştır.

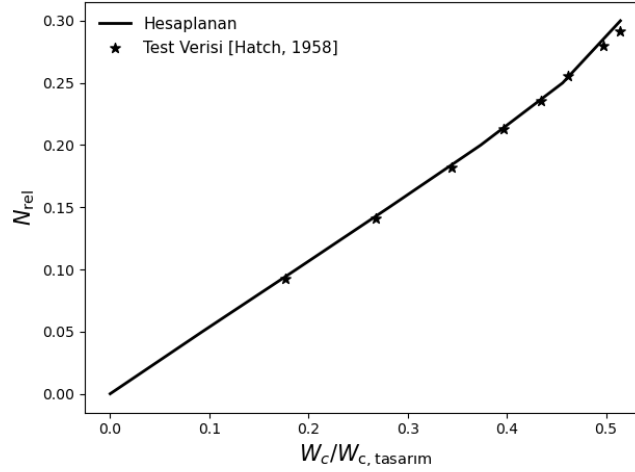


Şekil 8: NACA Transonik Kompresörü için Uzatılmış Harita ve Yel Değirmeni Etkisi Verisi

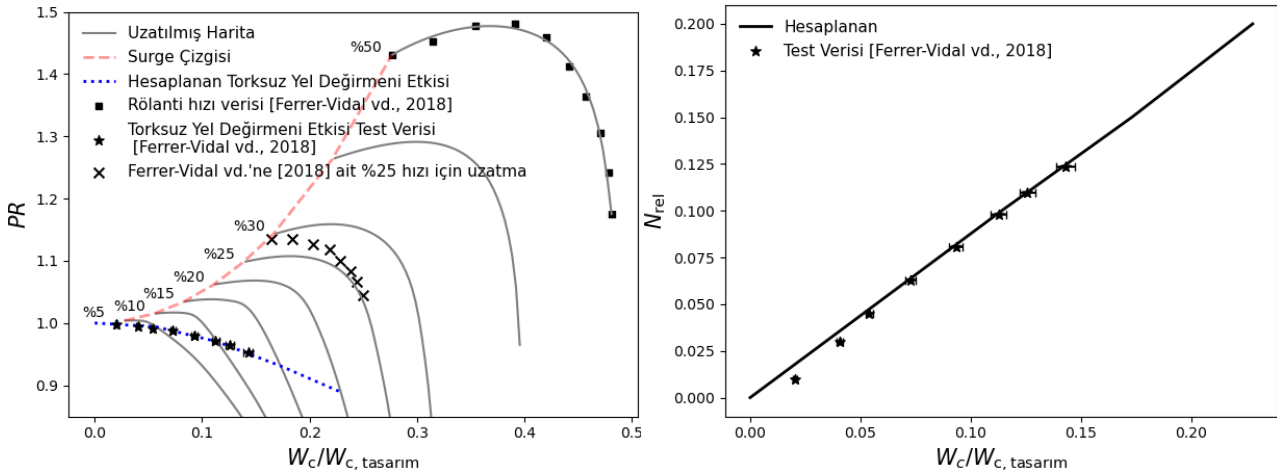
### Rolls-Royce M250 aksenal kompresör

Ferrer-Vidal vd. [2018] tarafından 6 kademe bir aksenal kompresör için rölanti üstü, kilitle rotor (0-hız) ve yel değirmeni etkisi verileri verilmiştir. %50 hızı için verilen değerler kullanılarak uzatma yapılmış ve yukarıdaki uygulamaya benzer şekilde karşılaştırmalar Şekil 10 ile verilmiştir. Ferrer-

Vidal vd. [2018] tarafından %25 hızı için yapılan tahmin ile bu çalışmadaki metodolojinin yaptığı tahmin arasında sıkıştırılmaz düşük debi bölgesinde bir fark görülmektedir. Bu kısımda iş-akış katsayıları ile benzerlik yasaları uygulanmaktadır ve belirsizliğin göreceli olarak daha az olması beklenmektedir. Bu yüzden bu farkın sebebi ve Ferrer-Vidal vd. [2018] tarafından bu kısım için yapılan uzatmanın detayları tam anlaşılammıştır. Farkın boğulma bölgesine doğru azaldığı görülmüştür.



Şekil 9: Hesaplanan Yel Değirmeni Etkisi Karakterinin Test Verisi ile Karşılaştırması



Şekil 10: M250 Eksenel Kompresör için Uzatılmış Harita ve Yel Değirmeni Etkisi Verisi

## SONUÇ

Gaz türbinli motorların rölanti altı performans tahmini oldukça zorlayıcı bir konudur. Bunun sebebi rölanti altı için yüksek kalite bileşen test verisinin elde edilmesinin zor olmasıdır. Motor üreticileri şimdiye kadar bu çalışma bölgesi için büyük ölçüde motor testlerini kullanmıştır. Ancak, güvenli ve optimum başlatma, yeniden başlatma ve kapatma prosedürleri rölanti altı modelleri sayesinde daha kolay bir şekilde tasarlanabilir. Bu makalede bu tarz modellerin oluşturulmasına yardımcı olabilecek özgün bir kompresör rölanti altı harita uzatma stratejisi sunulmuştur. Bu strateji literatürde yel değirmeni etkisi test verisi olan 2 adet kompresör ile test edilmiş ve iyi bir uyum gözlemlenmiştir. Gelecek çalışmalarda daha fazla rölanti altı veriye sahip kompresör test verisi bulunacak ve önerilen stratejiyi geliştirmek için kullanılacaktır.

### Semboller

$A_2$	Çıkış alanı [ $m^2$ ]	$W$	Debi [ $kg\ s^{-1}$ ]
$h$	Özgül entalpi [ $J\ kg^{-1}$ ]	$\gamma$	Özgül ısı oranı
$i$	Hücum açısı [ $^\circ$ ]	$\rho_1$	Giriş yoğunluğu [ $kg\ m^{-3}$ ]
$M_{EGV}$	Çıkış kılavuz kanat Mach sayısı	$\tau$	Tork [ $N\ m$ ]



$N$	Dönme hızı [rpm]	$\phi$	Akış katsayısı
$PR$	Basınç oranı	$\psi$	İş katsayısı
$R$	Gaz sabiti [ $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ ]	$\psi_{is}$	İzantropik iş katsayısı
$T_1$	Giriş sıcaklığı [K]	$\omega$	Dönme hızı [ $rad\ s^{-1}$ ]
$U_2$	Çıkış çevresel hızı [ $m\ s^{-1}$ ]		

## Kaynaklar

- Ferrer-Vidal, L., Pachidis, V. ve Tunstall, R.J., 2018, *An Enhanced Compressor Sub-Idle Map Generation Method*, Proceedings of GPSS Forum, Zürich, Switzerland.
- Ferrer-Vidal, L., Pachidis, V. ve Tunstall, R.J., 2020, *Generating Axial Compressor Maps to Zero Speed*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, vol. 235, no. 5, pp. 956-973.
- Gaudet, S.R. ve Gauthier, J.E.D., 2007, *A Simple Sub-Idle Component Map Extrapolation Method*, ASME Turbo Expo 2007, GT2007-27193, Montreal, Canada.
- Grech, N., 2013, *Gas Turbine Sub-Idle Performance Modeling; Groundstart*, Ph.D. Thesis, Cranfield University, UK.
- Hatch, J.E., 1958, *Comparison of Experimentally and Analytically Determined Windmilling Characteristics of a Compressor with Low Over-All Pressure Ratio*, NACA RM E57L12a, Lewis Flight Propulsion Laboratory, Cleveland, Ohio.
- Hatch, J.E. ve Bernatowicz, D.T., 1957, *Aerodynamic Design and Over-All Performance of First Spool of a 24-Inch Two-Spool Transonic Compressor*, NACA RM E56L07a, Lewis Flight Propulsion Laboratory, Cleveland, Ohio.
- Howard, J., 2007, *Sub-Idle Modelling of Gas Turbines: Altitude Relight and Windmilling*, Ph.D. Thesis, Cranfield University, UK.
- Kurzke, J., 2023, *Starting and Windmilling Simulations Using Compressor and Turbine Maps*, J. Glob. Power Propuls. Soc., vol. 7, pp. 58-70.
- Kurzke, J., 2023, *An Enhanced Compressor Map Extension Method Suited for Spool Speeds Down to 1%*, Proceedings of Global Power and Propulsion Society, GPSS-TC-2023-0236.
- Kurzke, J. ve Marie, D., 2019, *Generating Compressor Maps to Simulate Starting and Windmilling*, ISABE 2019-24299, Canberra, Australia.
- Moore, F. ve Greitzer, E., 1986, *A Theory of Post-Stall Transients in Axial Compression Systems: Part I-Development of Equations*, J. Eng. Gas Turbines Power, vol. 108, no. 1, pp. 68-76.
- Riegler, C., Bauer, M. ve Kurzke, J., 2001, *Some Aspects of Modeling Compressor Behavior in Gas Turbine Performance Calculations*, J. Turbomach., vol. 123, no. 2, pp. 372-378.
- Righi, M., Ferrer-Vidal, L. ve Pachidis, V., 2020, *Body-Force and Mean-Line Models for the Generation of Axial Compressor Sub-Idle Characteristics*, Aeronaut. J., vol. 124, no. 1281, pp. 1683-1701.
- Sexton, W.R., 2001, *A Method to Control Turbofan Engine Starting by Varying Compressor Surge Valve Bleed*, M.Sc. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg Virginia.
- Tang, S., 2015, *Global B-Spline Fitting by Least Squares*, Wolfram Demonstrations Project, URL: <http://demonstrations.wolfram.com/GlobalBSplineCurveFittingByLeastSquares/>
- Tio, F.R., Ferrer-Vidal, L., Aguirre, H.A. ve Pachidis, V., 2020, *Considerations on axial compressor bleed for sub-idle performance models*, ASME Turbo Expo 2020, GT2020-14413.
- Zachos, P.K., 2010, *Gas Turbine Sub-Idle Performance Modeling*, Ph.D. Thesis, Cranfield University, UK.
- Zachos, P.K., Aslanidou, I., Pachidis, V. ve Singh, R., 2011, *A Sub-Idle Compressor Characteristic Generation Method with Enhanced Physical Background*, J. Eng. Gas Turbines Power, vol. 133, no. 8.