

ATMOSFERİK AKIŞLARIN NÜMERİK ÇÖZÜMÜ VE POD YÖNTEMİYLE YENİDEN OLUŞTURULMASI

Tansu Sevine*, Engin Leblebici†
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

Mustafa Kaya‡
Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara

İsmail H. Tuncer§
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Rüzgar türbini tarlalarının seçiminde genelde meteorolojik ölçüm direği kullanılarak tek bir noktada gözlem verileri toplanır ve bu veriye dayalı olarak tüm rüzgar akış alanı yeniden yaratılır. Rüzgar akış alanlarının yeniden yaratılmasında ise nümerik akış alanı çözümleri üzerinde gözlem verisine göre ara-değerleme (interpolation) yapılır. Bu çalışmada rüzgar akış alanlarının yeniden yaratılması için Uyumlu Dik Ayrışım Yöntemi (Proper Orthogonal Decomposition, POD) kullanılmıştır. Uygulanan POD yöntemi öncelikle 2-boyutlu kanat profili üzerinde ve etrafında oluşan basınç alanlarının yeniden oluşturulmasında kullanılmış ve doğrulanmıştır. Ardından 3-boyutlu atmosferik akış alanları üzerinde elde edilen Navier-Stokes akış çözümleri kullanılarak, tek bir noktadaki rüzgar hızlarına göre farklılaşan akış alanları başarıyla yeniden oluşturulmuş ve doğrulanmıştır.

GİRİŞ

Rüzgar türbini tarlalarının yerleri bölgesel rüzgar akış alanlarının incelenmesiyle belirlenmektedir. Bu inceleme ilk aşamada topoğrafik haritalar, rüzgar atlasları, uydu görüntüleri vb. uygulamalar ile yapılır ve rüzgar çiftliğinin kurulması amaçlanan bölge belirlenir (macro-siting). Ancak bu kaynaklardan elde edilen veri, türbilerin seçilen bölgedeki konuşlandırma işlemi (micro-siting) için yeterince hassas bir yer göstermez. Dolayısıyla, konuşlandırmanın daha verimli yapılabilmesi yani türbinlerden elde edilen enerjinin daha fazla olması için, yüksek çözünürlüklü, daha hassas rüzgar akış alanı verisi elde etmek gerekmektedir [Leblebici ve Tuncer, 2016].

Akış alanındaki meteorolojik gözlem istasyonlarından (Met-MAST) alınan veriden ya da akış alanında yapılan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) çözümlerinden, bölgedeki hakim rüzgar

*Arş. Gör., Havacılık ve Uzay Mühendisliği, Email: tansu.sevine@ae.metu.edu.tr

†Arş. Gör., Havacılık ve Uzay Mühendisliği, Email: engin.leblebici@ae.metu.edu.tr

‡Dekan Yardımcısı, Hava Ulaştırma Fakültesi, Email: mkaya@thk.edu.tr

§Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Mühendisliği, Email: ismail.h.tuncer@ae.metu.edu.tr

yönü ve rüzgar hızı büyüklükleri hakkında hassas bilgi alınabilir. Bu çalışmada rüzgar tarlasının topoğrafya haritası çıkarılıp, harita verisi üzerinde kurulan akış alanından elde edilen nümerik çözümler ile meteorolojik ölçümler etkileşimli kullanılarak, akış alanının tek nokta etrafında yeniden oluşturulması amaçlanmıştır.

Çözümü yapılacak olan akış alanının yüzey topoğrafyası ne kadar yüksek çözünürlükte elde edilirse nümerik çözümler o kadar isabetli olur. Bu amaçla topoğrafya yükseklik bilgileri (DEM verisi), dünya çapında yüksek (1.5 arcsec, 30m) çözünürlüklü yükseklik verisine sahip olan ASTER-GDEM veritabanından temin edilmiştir. Nümerik hava tahmini, başlangıç ve sınır koşullarına bağlı bir problemdir. Tahminin başarısı, başlangıç koşullarının gerçek akış alanına yakınlığı ile doğrudan ilintilidir [Ahmet ve ark., 2010]. Günümüzde birçok ticari rüzgar tahmini yazılımı sabit değerli sınır koşulu uygulamaktadır. Bu çalışmada da 12 farklı sabit değerli sınır koşulu uygulanarak 12 ayrı nümerik akış alanı çözümü elde edilmiştir. Nümerik çözümlerin elde edilmesi için açık kaynaklı SU^2 yazılımı ve ticari FLUENT yazılımı kullanılmıştır.

SU^2 , Kısmi Diferansiyel Denklemlerin (Partial Differential Equations, PDEs) yapısız çözüm ağları üzerindeki nümerik çözümünü Sonlu Hacimler Yöntemi ile elde etmek ve bu denklemleri temel alan optimizasyon işlemlerini yapabilmek amacıyla geliştirilmiş ve C++ dilinde yazılmış bir koddur [Alonso ve ark., 2013]. Bu kodun temel uygulama alanları hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve aerodinamik yüzey optimizasyonudur ve kullanılabilir olduğu alanlar zamanla geliştirilmektedir (elektrodinamik, kimyasal reaksiyonlu akışlar vb.). SU^2 temel olarak Stanford Üniversitesi-Aerodinamik Laboratuvarı tarafından yazılmış ve daha sonra açık kaynaklı hale gelerek birçok üniversitenin ve ilgili kişilerin desteğiyle sürekli gelişmekte olan ve yaygın olarak kullanılmaya başlanan bir Navier-Stokes akış çözücüsüdür.

POD yönteminin akış alanlarının nümerik çözümlerine ve meteorolojik ölçüm verisine uygulanması sonucu atmosferik akış alanının yeniden oluşturulması amaçlanmıştır. POD öncelikle 2-boyutlu kanat profili üzerinde ve etrafında oluşan basınç alanlarının yeniden oluşturulmasında kullanılmış ve doğrulanmıştır. Ardından 3-boyutlu atmosferik akış alanları üzerinde elde edilen Navier-Stokes akış çözümleri kullanılarak, tek bir noktadaki rüzgar hızlarına göre farklılaşan akış alanları başarıyla yeniden oluşturulmuş ve doğrulanmıştır.

YÖNTEM

POD deneysel veya nümerik olarak elde edilen, belirli bir yapıya bağlı kalarak benzeşen veriler için modlar verir [Lee ve ark., 2002]. POD yöntemi bir çok aerodinamik ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği probleminde, eksik verinin tamamlanması yada yeni veri oluşturulmasında başarıyla kullanılmaktadır [Bui-Thanh, Damodaran ve Willcox, 2004]. POD yöntemi güncel bir araştırma konusudur ve uygulama alanları yaygınlaşmaktadır [Chou ve Qiu, 2006]. POD teorisi ve POD modlarının hesaplanması birçok çalışmada ayrıntılı olarak anlatılmıştır [Lee ve ark., 2002; Kirby ve Sirovich, 1987; Bui-Thanh, Damodaran ve Willcox, 2004; Beran ve Lucia, 2004].

POD yöntemi bir çok aerodinamik ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği probleminde, eksik verinin tamamlanması yada yeni veri oluşturulmasında başarıyla kullanılmaktadır [Bui-Thanh, Damodaran ve Willcox, 2004]. POD yöntemi güncel bir araştırma konusudur ve uygulama alanları yaygınlaşmaktadır [Chou ve Qiu, 2006]. POD modları bir kez bulunduktan sonra orijinal veri yeniden oluşturulabilir [Ahmet ve ark., 2010].

$$\vec{f} = [w_1\vec{\phi}_1 + w_2\vec{\phi}_2 + \dots + w_i\vec{\phi}_i + \dots + w_n\vec{\phi}_n] \quad (1)$$

Burada $\vec{\phi}_i$ POD modları, w_i ilgili modun katsayısıdır, $\vec{f}$ ise veri vektörüdür. Doğru katsayılar kullanılırsa $\vec{f}$ vektörü oldukça iyi elde edilebilir. Lee ve arkadaşlarının'ın çalışmasının bir kısmı şöyle

özetlenebilir; m boyutlu sütun vektörleri olan dik bazlar, $\phi = [\vec{\phi}_1, \vec{\phi}_2, \dots, \vec{\phi}_m]$, kullanılarak $\vec{x}$ vektörü şöyle ifade edilebilir;

$$\vec{x} = \alpha_1 \vec{\phi}_1 + \alpha_2 \vec{\phi}_2 + \dots + \alpha_m \vec{\phi}_m \quad (2)$$

POD yönteminin amacı, $\alpha_i \approx 0$ yakınsamasını ve herhangi bir m boyutlu $\vec{x}$ vektörü için ($i = n + 1, n + 2, \dots, m$) minimum n değerini sağlayan birim boyulu dik ayrışımı (ϕ) bulmaktır [Ahmet ve ark., 2010].

$$[X] = [\vec{x}_1 \ \vec{x}_2 \ \dots \ \vec{x}_l] \quad (3)$$

Denklem-3'teki l değeri Denklem-2'deki m değerinden küçüktür. POD modları ise $[C] = [X] \times [X]^T$ korelasyon matrisinin özvektörleridir. Burada ' $\times$ ' matris çarpımı, $[X]^T$ ise $[X]$ 'in devrik matrisidir. İlgili özdeğerlerin büyükten küçüğe dizildiği vektör POD modlarının önemini belirtir [Lee ve ark., 2002]. Bu modların diğer modlara baskınlığı Denklem-4'deki gibi hesaplanır ve uygulamada kullanılan baskın mod sayısı (r_l % oranı) arttıkça POD yakınsaması o kadar iyi olur.

$$r_l = \frac{\sum_{i=1}^l \phi_i}{\sum_{i=1}^m \phi_i} * 100 \quad (4)$$

Denklem-1 "En Küçük Kareler (Least Square)" yöntemi ile w_i 'ler için çözülüp 12 farklı çözümü niteleyen 12 farklı katsayı vektörleri $\vec{w}_i$ bulunmuştur. Her bir katsayı vektörü kullanılan baskın mod kadardır. Yani diğer bir deyişle, eğer 3 tane baskın POD modu kullanılırsa 3 tane katsayı vektörü elde edilmiştir.

Daha sonra katsayı vektörleri ($\vec{w}_i$) ve sınır koşulu olan hız yönleri arasında "eğri uydurma (curve fitting)" yöntemi ile baskın modların çarpılacağı uygun katsayılar ($\vec{\alpha}_i$) hesaplanmıştır. Bu katsayılar ($\vec{\alpha}_i$) ile modlar ($\vec{\phi}_i$) çarpılıp ve toplanıp akış alanındaki hız vektörleri her bir düğüm noktasında yeniden oluşturulmuştur.

UYGULAMALAR VE YORUMLAR

Bu çalışmada, atmosferik akış alanına ait nümerik çözümler kullanılarak POD yöntemi ile akış alanlarının yeniden oluşturulması sağlanmıştır. Öncelikle 2-boyutlu kanat profili üzerindeki basınç katsayısı dağılımı ve 2-boyutlu akış alanları üzerinde doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Ardından 3-boyutlu atmosferik akış alanlarının tek noktadaki akış hızı değerlerine göre yeniden oluşturulması sağlanmıştır.

2-Boyutlu Kanat Profili Üzerindeki Sonuçlar

NACA0012 kanat profili üzerinde 198×78 boyutunda bir çözüm ağı ile farklı hücum açılarında ve sabit Mach sayısında 12 farklı çözüm elde edilmiştir. Daha sonra her bir çözüm için elde edilen yüzey basınç katsayılarından korelasyon matrisi oluşturulmuş ve POD yöntemi ile farklı durumlar için basınç katsayıları elde edilmiştir.

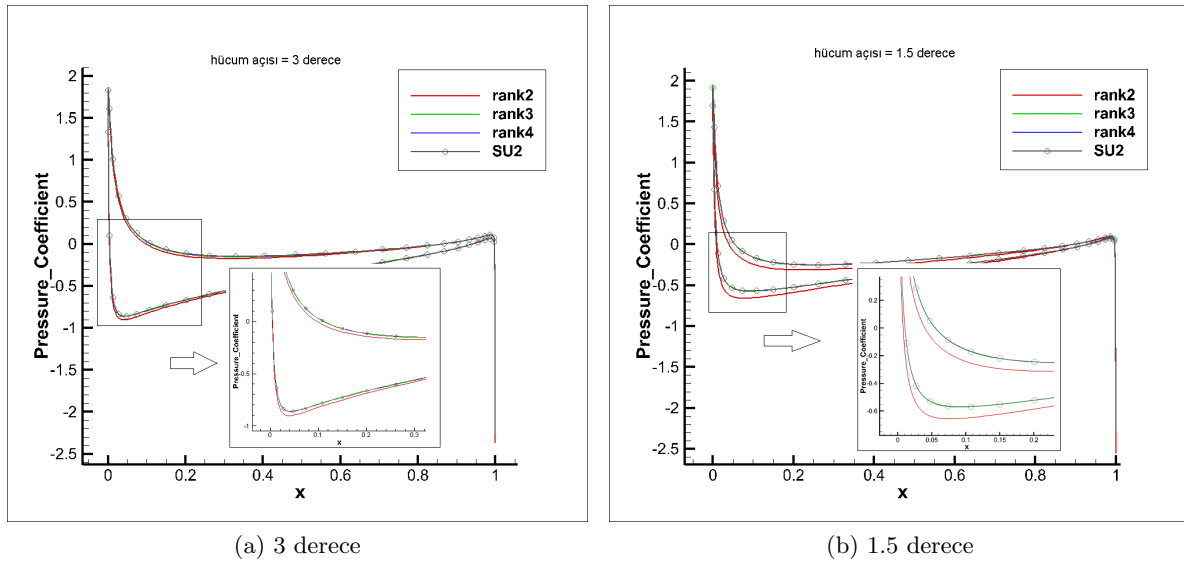
-6° , -5° , -4° , -3° , -2° , -1° , 1° , 2° , 3° , 4° , 5° ve 6° hücum açılarında 12 farklı çözüm elde edilmiş, kanat yüzeyindeki 198 adet basınç değerinden korelasyon matrisi oluşturulmuştur:

$$[X]_{198,12} = \begin{bmatrix} c_{P_{1,1}} & c_{P_{1,2}} & \dots & \dots & c_{P_{1,12}} \\ c_{P_{2,1}} & c_{P_{2,2}} & \dots & \dots & c_{P_{2,12}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{P_{198,1}} & c_{P_{198,2}} & \dots & \dots & c_{P_{198,12}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Korelasyon matrisinin ($[C] = [X] \times [X]^T$) 2, 3 ve 4 baskın modu kullanılarak yeniden elde edilen basınç dağılımları SU^2 akış çözücüsü ile elde edilmiş olan sonuçlarla kıyaslanmıştır (Şekil 3). İlk 2 modun baskınlığı (r_2) % 89.504 , 3 modun baskınlığı (r_3) % 98.985, 4 modun baskınlığı (r_4) ise % 99.46 dir.

Öncelikli çalışma elde var olan bir veriyi daha az mod kullanarak tekrardan oluşturmaya yönelik olan çalışmadır. $[X]$ matrisine girdi olarak giren "3°" hücum açılı basınç katsayısı çözümü POD methodu ile daha az mod kullanılarak tekrardan oluşturulmuş ve SU^2 çözümü ile kıyaslanmıştır (Şekil 1a).

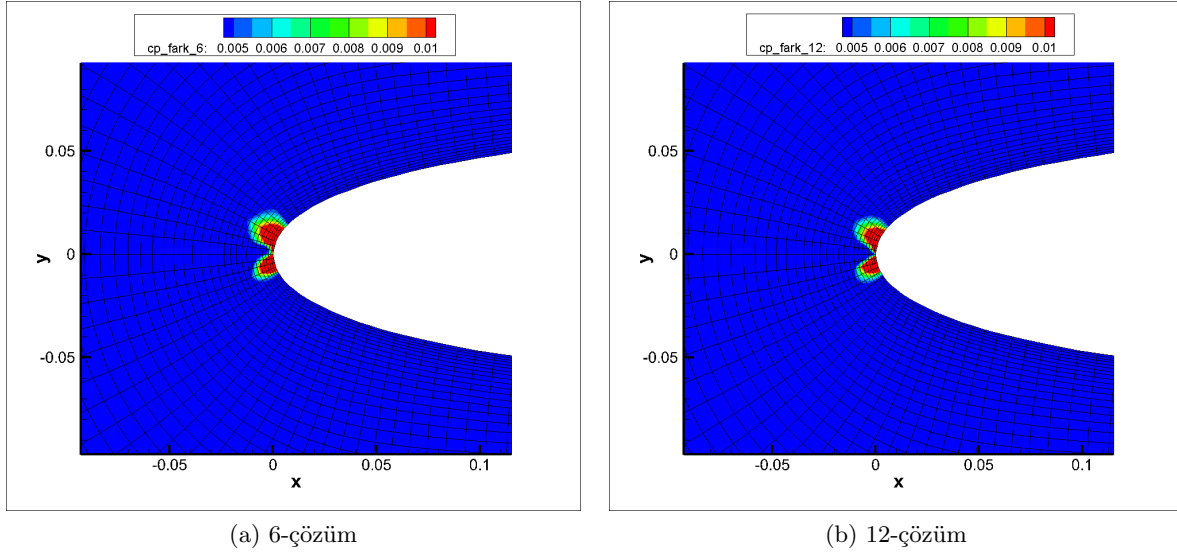
3°'lik yaklaşımın gerçek çözümle uyumlu olmasının ardından, 1.5°, matrise girdi olarak verilmeyen hücum açılı çözüm POD yaklaşımı ile oluşturulup, SU^2 'den alınan "1.5°" hücum açılı çözümün basınç katsayısı değerleri ile kıyaslanmıştır (Şekil 1b).



Şekil 1: NACA0012 kanat profili üzerinde POD methodu ve SU^2 akış çözücüsü kullanılarak elde edilen basınç katsayıları

2-Boyutlu Kanat Profili Etrafındaki Sonuçlar

2-boyutlu akış alanlarının yeniden oluşturulması için bir önceki çalışmada elde edilen kanat profili etrafındaki çözümler kullanılmıştır. POD yönteminde öncelikle 1.5°'lik yaklaşım elde etmek amacıyla, 6 çözüm (-6°, -4°, -2°, 2°, 4°, ve 6°) ve 12 çözüm (-6°, -5°, -4°, -3°, -2°, -1°, 1°, 2°, 3°, 4°, 5° ve 6°) uygulanmış, elde edilen basınç katsayısı değerleri SU^2 'den elde edilen nümerik çözümler ile kıyaslanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2: NACA0012 kanat profili üzerinde POD methodu ve SU^2 akış çözücüsü kullanılarak elde edilen basınç katsayıları

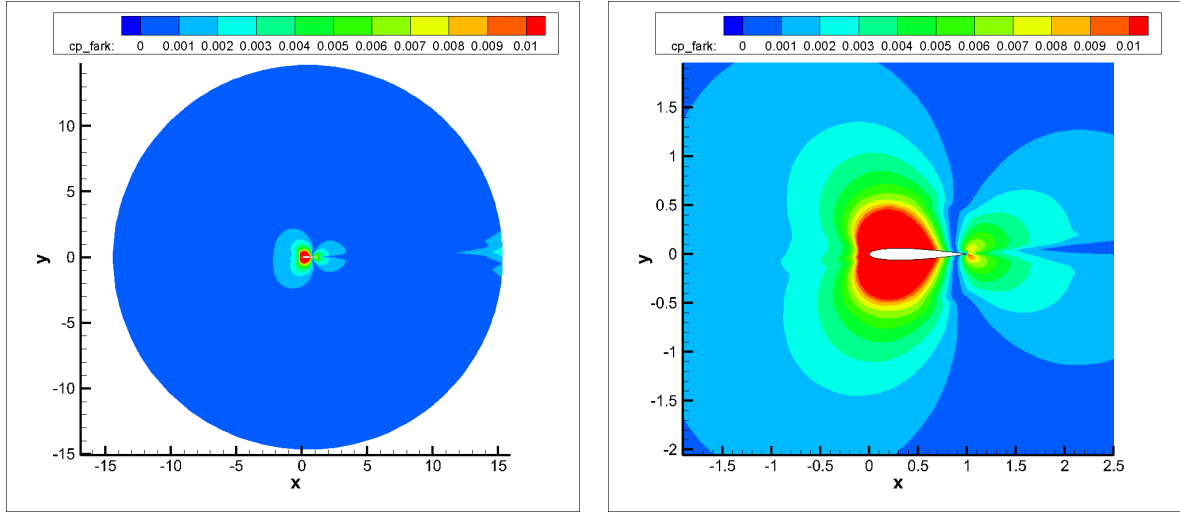
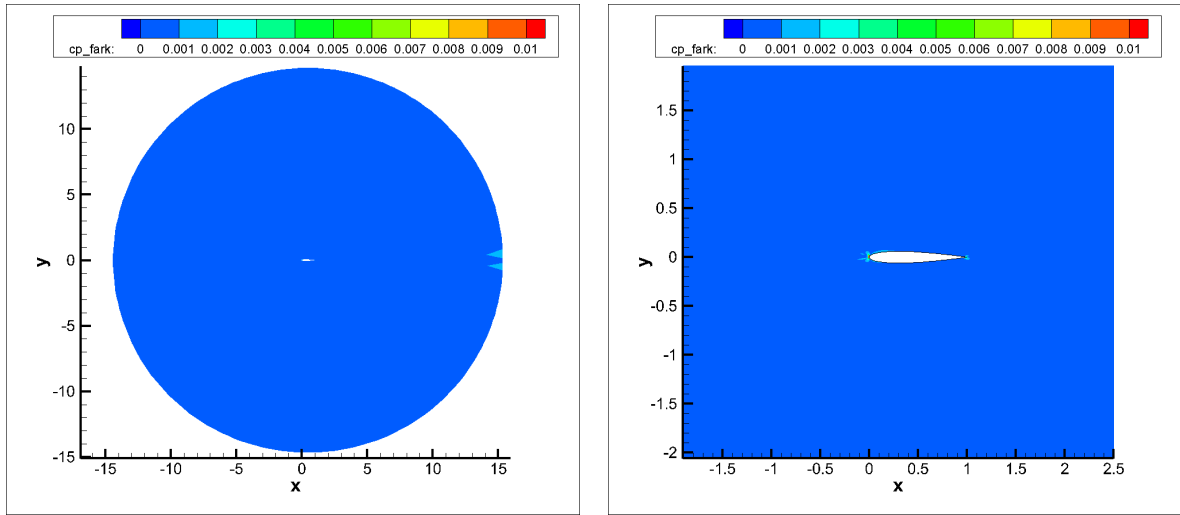
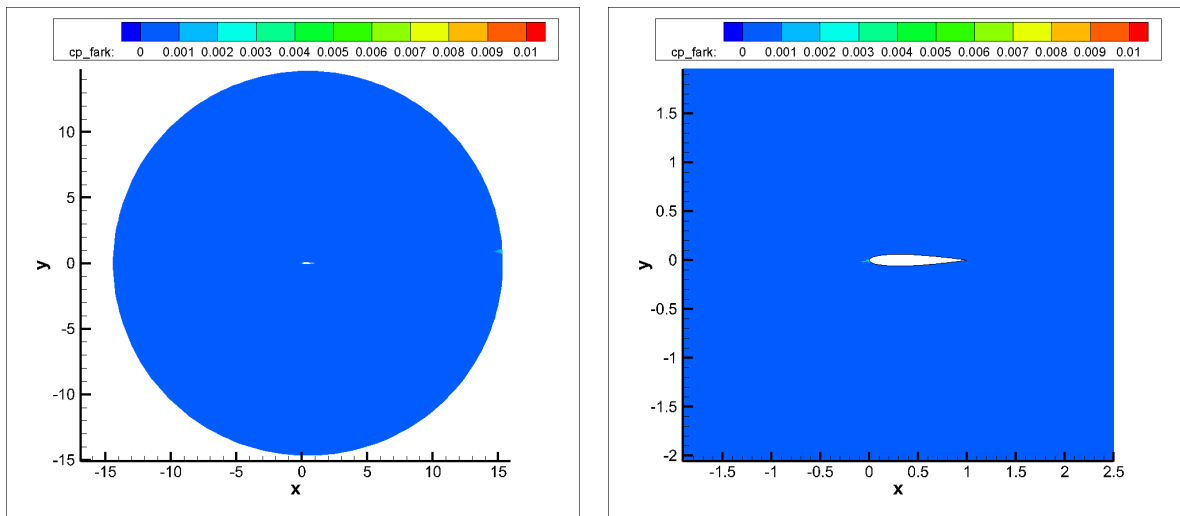
Korelasyon matrisi ($[C] = [X] \times [X]^T$) benzer şekilde oluşturulmuştur:

$$[X]_{15444,12} = \begin{bmatrix} c_{P_{1 \times 1,1}} & c_{P_{1 \times 1,2}} & \cdots & \cdots & c_{P_{1 \times 1,12}} \\ c_{P_{2 \times 1,1}} & c_{P_{2 \times 1,2}} & \cdots & \cdots & c_{P_{2 \times 1,12}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{P_{198 \times 1,1}} & c_{P_{198 \times 1,2}} & \cdots & \cdots & c_{P_{198 \times 1,12}} \\ c_{P_{1 \times 2,1}} & c_{P_{1 \times 2,2}} & \cdots & \cdots & c_{P_{1 \times 2,12}} \\ c_{P_{2 \times 2,1}} & c_{P_{2 \times 2,2}} & \cdots & \cdots & c_{P_{2 \times 2,12}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{P_{198 \times 2,1}} & c_{P_{198 \times 2,2}} & \cdots & \cdots & c_{P_{198 \times 2,12}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{P_{1 \times 78,1}} & c_{P_{1 \times 78,2}} & \cdots & \cdots & c_{P_{1 \times 78,12}} \\ c_{P_{2 \times 78,1}} & c_{P_{2 \times 78,2}} & \cdots & \cdots & c_{P_{2 \times 78,12}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{P_{198 \times 78,1}} & c_{P_{198 \times 78,2}} & \cdots & \cdots & c_{P_{198 \times 78,12}} \end{bmatrix}$$

Bu durum için ilk 2 modun baskınlığı (r_2) % 91.536 , 3 modun baskınlığı (r_3) % 99.471, 4 modun baskınlığı (r_4) ise % 99.74'tür. İlk 2,3 ve 4 mod kullanılarak 1.5 derece hücum açısı için elde edilen akış alanları Şekil 3'de verilmiştir. Görüldüğü gibi 3 mod kullanılarak elde edilen tüm akış alanındaki basınç dağılımındaki en yüksek hata %1 mertebesindedir.

3-Boyutlu Atmosferik Akış Alanı Sonuçları

Bu çalışmanın amacı tek noktadaki meteorolojik gözlem verisi üzerinden tüm akış alanının tekrardan oluşturulması olduğu için gözlem verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple 3 boyutlu atmosferik akış çözümleri, meteorolojik gözlem direği (Met-MAST) bulunan, Mersin ilinin Mut ilçesinde 3km x 2km bir topoğrafyada elde edilmiştir. Ancak bu gözlem verilerine erişim özel izinler gerektirdiği için şimdilik bu çalışmada gözlem verileri kullanılmamıştır. Gözlem verisi yerine POD uygulamasına girdi olarak verilmeyen farklı bir sınır koşullu nümerik çözümdeki tek bir noktanın rüzgar hızı değerleri ile de yeniden oluşturma yapılabilir.

(a) $r_2 = \% 91.536$ (b) $r_3 = \% 99.471$ (c) $r_4 = \% 99.74$

Şekil 3: NACA0012 kanat profili üzerinde POD methodu ve SU^2 akış çözücüsü kullanılarak elde edilen basınç katsayıları farkları

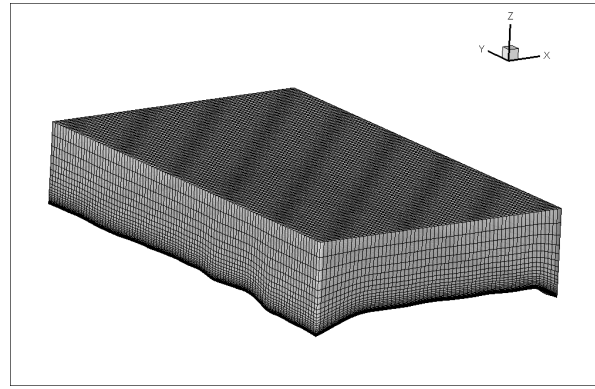
POD uygulamasının nümerik çözümdeki tek noktadan yeniden oluşturma yapabilmesi demek, gözlem verisi sağlandığı takdirde ondan da yeniden oluşturma yapabilmesi demektir. FLUENT programı ile elde edilen çözümlerde kullanılan yapılı çözüm ağı yüzeyde 30 m çözünürlüğe, dikey yönde ise 1 m çözünürlüğe sahip olacak şekilde modellenmiştir. Bu çözünürlük değerlerinde toplamda 175336 adet düğüm noktası ve 164700 hücre bulundurmaktadır (Şekil 4).

POD 'a uygulanacak olan farklı nümerik çözümler sınır koşulundaki hızların yönlerinin değiştirilmesi ile sağlanmıştır. İlgili atmosferik akış alanına, 10 m/s büyüklüğünde sabit değerli, 12 ayrı yönde 30°'lik (30°, 60°, 90°, ..., 330°, 360°) aralıklarla farklı hız sektörleri sınır koşulu olarak uygulanıp, toplamda 12 farklı nümerik çözüm elde edilmiştir.

Gözlem verisi yerine kullanılıp ve yeniden oluşturulacak olan 13. çözüm ise 100°'lik sektördür. Gözlem verisinin alındığı noktaya yakın bir düğüm noktası seçilip, bu noktadaki rüzgar hızı bileşenleri kaydedilmiş ve akış alanının yeniden oluşturulması için POD uygulamasına verilmiştir. 12 farklı sektörün hız bileşenleri kullanılarak korelasyon matrisi oluşturulmuştur:

$$[X] = \begin{bmatrix} u_{1,1} & u_{1,2} & \dots & \dots & u_{1,12} \\ u_{2,1} & u_{2,2} & \dots & \dots & u_{2,12} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{175336,1} & u_{175336,2} & \dots & \dots & u_{175336,12} \\ v_{1,1} & v_{1,2} & \dots & \dots & v_{1,12} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & \dots & \dots & v_{2,12} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{175336,1} & v_{175336,2} & \dots & \dots & v_{175336,12} \\ w_{1,1} & w_{1,2} & \dots & \dots & w_{1,12} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \dots & \dots & w_{2,12} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{175336,1} & w_{175336,2} & \dots & \dots & w_{175336,12} \end{bmatrix}$$

$u, v, w : x, y$ ve z eksenindeki hız bileşenleri

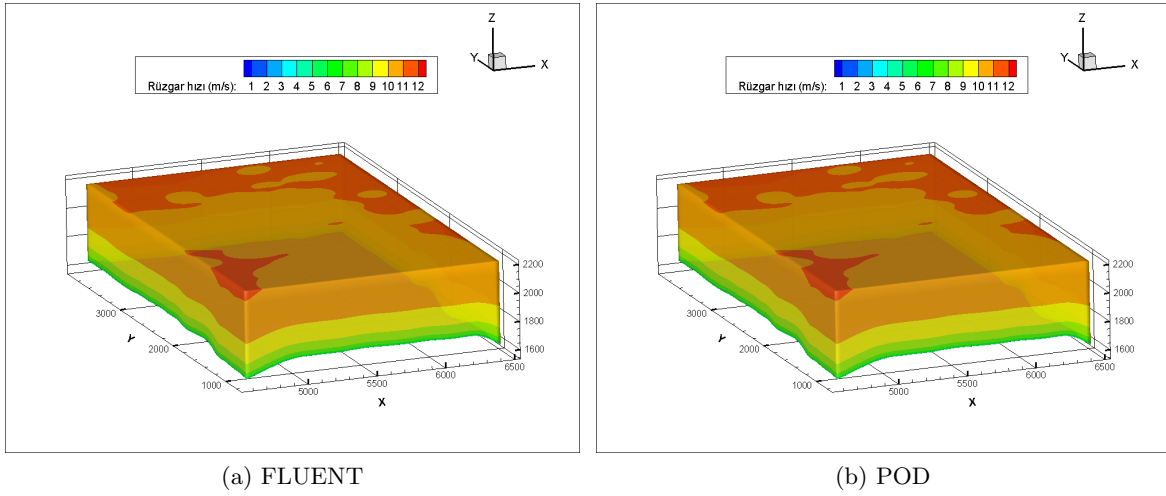


Şekil 4: 3-boyutlu akış alanı, Mersin/Mut

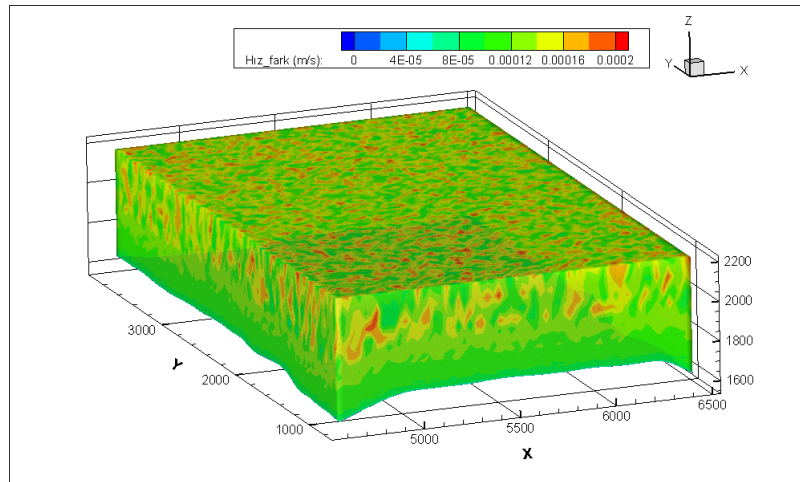
3-boyutlu akış alanını yeniden oluşturmak adına modların baskınlık değerleri hesaplanmış, toplamda 3 baskın r_3 (% 99.994) POD modu kullanılmıştır. 3 mod ile 12 farklı nümerik çözümün matris sistemi, en küçük kareler yöntemi ile çözülüp her bir akış alanı çözümünün katsayısı w_i bulunmuştur. Bu katsayılar ve 13. çözümdeki "tek nokta" arasında korelasyon sağlanıp, yeniden oluşturma için gereken uygun katsayılar α_i hesaplanmıştır. POD 'un 100°'lik akış alanı üzerindeki tek noktaya uygulanmasından ötürü, POD yaklaşımı ile 100°'lik FLUENT çözümünün örtüşmesi beklenmektedir.

Bu uygulamanın sonucunda POD hesabına katılmayan 100°'lik sektördeki nümerik çözüm ile POD yaklaşımından elde edilen akış alanları Şekil 5 'te kıyaslanmıştır. FLUENT 'ten elde edilen nümerik çözüm ile (Şekil 5a), POD yönteminden elde edilen yaklaşımın (Şekil 5b) birbiri arasındaki farkın akış alanının çoğu bölgesinde 0.01 m/s 'den küçük olduğu gösterilmiştir (Şekil 6).

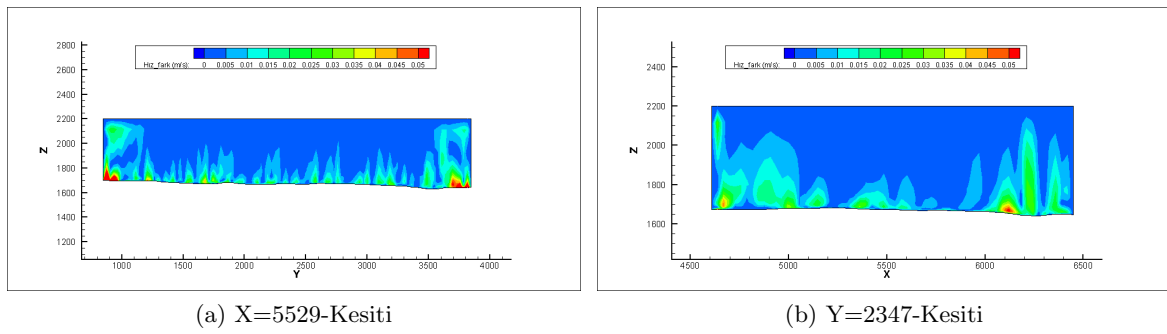
POD yaklaşımını daha detaylı incelemek adına X ve Y eksenlerinden birer kesit alınıp aynı hız büyüklükleri o kesitlerde de kıyaslanmıştır (Şekil 7). Akışın çok değişken olduğu yüzeye yakın kısımlarda, diğer kısımlara göre daha yüksek hız farklılıkları görülmüştür. Ancak yakından bakıldığında bu farkların çoğunun 0.01 m/s civarında olduğu ve en yüksek farkın 0.05 m/s olduğu düşünülürse, POD yaklaşımının nümerik çözümlerle uyumlu olduğu gösterilmiştir.



Şekil 5: 3 boyutlu akış alanında rüzgar hızı büyüklük değerleri



Şekil 6: 3 boyutlu akış alanında rüzgar hızı büyüklük değerleri farkı



Şekil 7: X ve Y ekseninden alınan kesitler üzerindeki rüzgar hızı büyüklük değerleri farkları

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında rüzgar türbini tarlalarının atmosferik akış alanları nümerik yöntemler ile çözülüp, POD yöntemi ile yeniden oluşturulmuştur. POD yöntemi öncelikle SU^2 'den alınan 2-boyutlu kanat profili üzerindeki ve etrafındaki akış çözümlerine uygulanmış ve doğrulanmış, sonrasında ise FLUENT 'ten 3-boyutlu atmosferik akış çözümlerine uygulanmıştır. POD yaklaşımı ile nümerik çözümler arasındaki farkın genelde %1'den küçük olması, POD yönteminin akış alanlarına uygulanılabilirliğini göstermiştir. İleriki çalışmalarda meteorolojik gözlem verisi kullanılarak POD sonuçları elde edilecektir. 3 boyutlu nümerik çözümlerinin SU^2 akış çözücüsüyle elde edilme çalışmaları halen devam etmektedir.

Kaynaklar

- Ahmet G., Kaya M., Kumru S., Tuncer İ. H., 2010. *Meteorolojik Hava Tahminleri İçin Uyumlu Dik Ayrışım (POD) Yöntemiyle Veri Asimilasyonu* , UHUK, Eskişehir, 16-18 Eylül .
- Lee H.P., Liang Y.C. , Lim, S.P. Lin W.Z., Lee K.H. and Wu C.G., 2002. *Proper Orthogonal Decomposition and Its Applications - Part I: Theory*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 252, No.3, s.527-544.
- Leblebici E., Tuncer İ.H. , 2016 *Coupled Unsteady OPENFOAM and WRF Solutions For An Accurate Estimation Of Wind Energy Potential*, ECCOMAS Congress, Girit Adası, Yunanistan, 5-10 Haziran.
- Beran P.S. and Lucia D.J. , 2004. *Reduced-Order Model Development Using Proper Orthogonal Decomposition and Volterra Theory*, AIAA Journal, Vol. 42, No.6, Haziran , s. 1182-1190.
- Alonso J. J. , Aranake A. C. , Campos A. , Colonno M. R. , Copeland S. R. , Economon T. D. , Lonkar A. K. , Lukaczyk T. W. , Palacios F. , ve Taylor T. W. R. , 2013. *Stanford University Unstructured (SU2): An open-source integrated computational environment for multi-physics simulation and design*, AIAA, Stanford CA.
- Castro F.A., Palma J.M.L.M., Pinto A.P., Ribeiro L.F., Rodrigues A.H. , 2008 *Linear and nonlinear models in wind resource assessment and wind turbine micro-siting in complex terrain*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96, s. 2308-2326
- Kirby M. and Sirovic, L. , 1987. *Low-Dimensional Procedure for the Characterization of Human Face*, Journal of the Optical Society for America, Vol. 4, No.3, s.519-524.
- Chou J. and Qiu C. , 2006. *Four-dimensional data assimilation method based on SVD: Theoretical aspect*, Theor. Appl. Climatol. Vol. 83, 2006, s. 51-57.
- Bui-Thanh T., Damodaran M. and Willcox K., 2004. *Aerodynamic Data Reconstruction and Inverse Design Using Proper Orthogonal Decomposition*, AIAA Journal, Vol. 42, No:8, Ağustos 2004, s: 1505-1516.