

## TÜMLEŞİK KANAT ELEMANI - HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YÖNTEMİ İLE DİKEY RÜZGAR TÜRBİNİ PERFORMANSININ HESAPLANMASI

Gökten GÜZEL<sup>1</sup>  
Turbotek Ltd. Şti., Ankara

A. Ruhşen Çete<sup>2</sup>  
Turbotek Ltd. Şti., Ankara

### ÖZET

*Bu çalışmada Dikey Rüzgar Türbini (DRT) performansı tümlşik Kanat Elemanı - Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak hesaplanmaktadır. Kullanılan yöntemde 2 boyutlu DRT' nin bozuntusuz hava akışına olan etkisi momentum denkleminde kaynak terimleri olarak eklenmektedir. Bahsi geçen kaynak terimleri Kanat Elemanı yöntemiyle çok hızlı olarak elde edilmektedir. Daha sonra tüm akış alanı HAD ile çözülmektedir. Böylece basit analitik yöntemlere kıyasla daha doğru, geleneksel HAD' e göre ise çok daha hızlı sonuçlar elde edilmektedir.*

### GİRİŞ

Son dönemde artan enerji talebi ve buna paralel olarak artan enerji fiyatları farklı enerji kaynaklarına olan ilgiyi ve talebi artırmıştır. İnsanların çevre kirliliğine olan duyarlılıklarının da etkisiyle su, güneş ve rüzgar gibi temiz enerji kaynaklarına yönelim hız kazanmıştır. Bunların içinde özellikle rüzgar enerjisi konusundaki yatırımlar son 10 yılda oldukça hızlı bir artış göstermiştir. Şekil 1' de 2001-2010(tahmini) yılları arasında dünya üzerinde kurulu rüzgar enerjisi üretimi kapasitesi gösterilmektedir. Bu şekilden de görülebileceği üzere son 10 yıl içerisinde kurulu kapasite yaklaşık 8.5 kat artmıştır.



Şekil 1: Rüzgar Enerjisi Üretim Kapasitesinin Son 10 Yıldaki Değişimi [1]

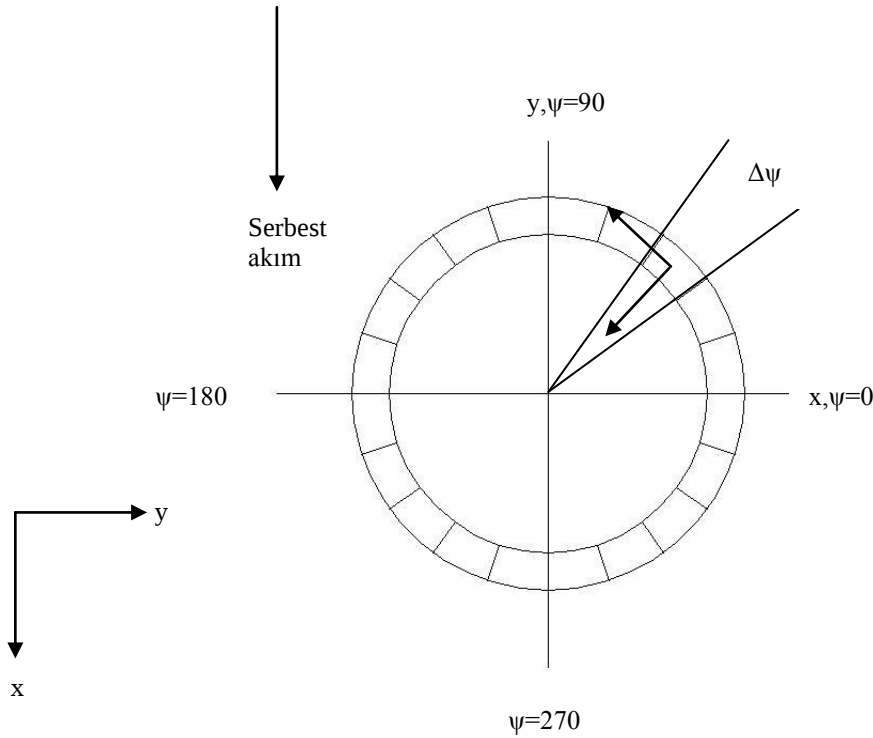
<sup>1</sup> Uçak Yüksek Mühendisi, E-posta: goktan@turbotek.com.tr

<sup>2</sup> Dr. Uçak Mühendisi, E-posta: arcete@turbotek.com.tr

Bu artışa paralel olarak bilim insanları rüzgar türbinlerine daha fazla ilgi göstermeye başlamış ve mevcutlarının geliştirilmesi ve daha etkili türbinlerin tasarlanması için çalışmalar artmıştır. Bu çalışmalar içerisinde tasarımın bir parçası olan aerodinamik analizin gerçekleştirilmesinde ihtiyaca ve zaman sınırlamalarına göre kimi zaman analitik tabanlı araçlar kimi zaman da HAD kullanılmaktadır. Bu iki yöntemin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Her ne kadar analitik tabanlı araçlar hızlı sonuçlar verseler de, elde edilen sonuçlar HAD' in sağladığı sonuçlara göre daha az doğrulukta olmaktadır. Ayrıca türbin kanatları ve türbinin kendisi etrafındaki akış alanı hakkında yeterli bilgi sağlayamamaktadırlar. Bunun yanında HAD ile yapılan analizler akışın süreksiz yapısı dolayısıyla oldukça uzun zaman almaktadır. Ayrıca HAD ile tasarım iyileştirmesi yapmak yukarıda bahsedilen nedenden dolayı nerdeyse imkansız hale gelmektedir. Sonuç olarak hem analitik tabanlı araçların sağladığı hızda hem de HAD' in sağladığı doğrulukta bir aracın gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu amaçla bu iki aracın tümleştirilmesi esasına dayanan Kanat Elemanı - HAD yöntemi geliştirilmiştir [3].

### SAYISAL YÖNTEM

Kanat Elemanı - HAD yönteminde rüzgar türbini hesaplama alanı içerisine, kalınlığı kullanılan kanatın kalınlığında olan, bir halka olarak yerleştirilir. Bu halkanın merkezi türbinin dönüş merkeziyle çakışmalıdır. Daha sonra halka belirli sayıda ve eşit aralıkta hücrelere bölünür. Bu hücrelerden her biri toplamı 360 derece olan azimuth açısının  $\Delta\psi$  kadarlık kısmını temsil etmektedir (Şekil 2).



Şekil 2: Temsili 2 Boyutlu DRT Modeli

Her hücrenin merkezinde bilinen akış alanı kullanılarak hücum açısı, görece hız ve Reynolds sayıları hesaplanmaktadır. Görece hızın açısal ve radyal yönlerdeki bileşenleri aşağıdaki formuller ile ifade edilebilmektedir;

$$V_a = \omega R + u \cdot \cos \psi + v \cdot \sin \psi$$

$$V_r = u \cdot \sin \psi - v \cdot \cos \psi$$

Bu denklemlerde  $\omega$  türbinin dönüş hızını,  $R$  türbinin yarı çapını,  $u$  ve  $v$  yerel akış hızını, ve  $\psi$  hücre merkezinin açısıl konumunu ifade etmektedir. Bu hız bileşenleri kullanılarak hücum açısı aşağıdaki formülle hesaplanabilir;

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{V_r}{V_a} \right)$$

Artık hücum açısı ve görece hız ve kanat veter uzunluğu kullanılarak hesaplanabilecek yerel Reynolds sayısı bilindiğine göre, turbin kanatlarında kullanılan profilin taşıma ve sürüklenme değerlerine ait verilerin de yardımıyla söz konusu hücre merkezindeki taşıma ve sürüklenme kuvvetleri elde edilebilmektedir;

$$F_{L,D} = C_{L,D}(\alpha, Re)(0.5\rho V_{Rel}^2)c$$

Yukarıdaki denklemde  $c$  kanat veter uzunluğunu ifade etmektedir. Hesaplanan yerel taşıma ve sürüklenme kuvvetlerinin açısıl ve radyal yönlerdeki bileşenleri aşağıda verilen formüllerle hesaplanabilir;

$$F_a = F_L \sin \alpha - F_D \cos \alpha$$

$$F_r = F_L \cos \alpha + F_D \sin \alpha$$

Yine benzer şekilde, hesaplanan kuvvetlerin x ve y eksen koordinatları yönündeki bileşenlerini hesaplamak için aşağıdaki formüller kullanılır;

$$F_x = F_r \sin \psi - F_a \cos \psi$$

$$F_y = -F_r \cos \psi + F_a \sin \psi$$

Bu şekilde hesaplanan kuvvetler anlık kuvvetlerdir ve zamana göre ortalamalarının alınması gerekmektedir. Türbini temsil eden halka şeklindeki hesaplama bölgesi göz önüne alındığında, N adet kanata sahip türbinin bir tur dönüşü sırasında elde edilecek ortalama kuvvetler;

$$F_{x,y,o} = F_{x,y} \cdot N \frac{\Delta\psi}{2\pi}$$

şeklinde ifade edilebilir. Türbinin akış alanına etkisi bu kuvvetlerin ters işaretlisidir. Bu kuvvetler hücrenin hacmine bölünerek momentum denklemlerinin sağ tarafına kaynak terimi olarak eklenmektedir. Bu işlem türbinin hesaplanan verimi yakınsayana kadar her zaman adımında tekrar edilir. Türbin performansı ise aşağıda verilen formülle hesaplanmaktadır;

$$C_p = \frac{\sum(F_a \cdot R \cdot \omega)}{(0.5\rho V_\infty^3)S}$$

Yukardaki denklemde  $S$  türbin süpürme alanını ifade etmektedir [3]. Yukarıda özetlenen metod ticari bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımı olan FLUENT içerisine UDF (Kullanıcı Tarafından Tanımlanmış Fonksiyon) olarak eklenmiştir.

### DOĞRULAMA SONUÇLARI

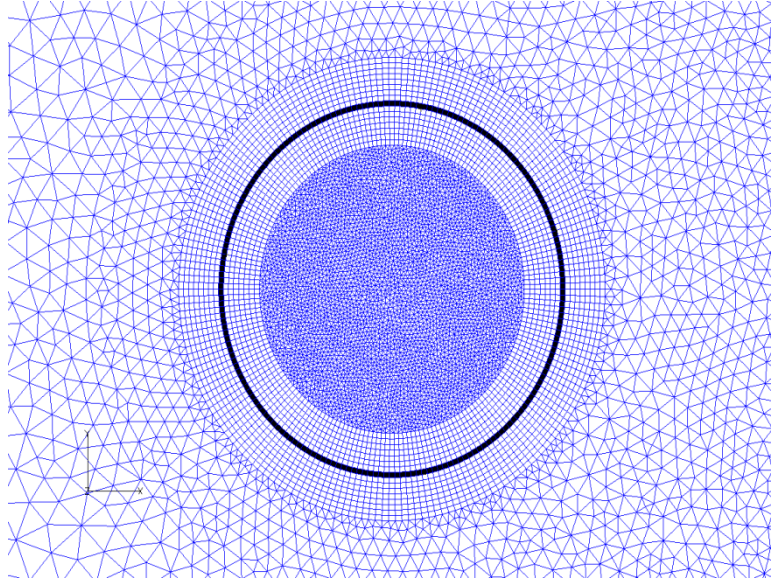
Kanat Elemanı - HAD yöntemini doğrulamak için kaynak [2]'de, yüksek çözünürlüklü Large Eddy Simülasyonu ile yapılmış olan analizlerde kullanılan DRT seçilmiştir. Bu DRT' nin seçilmesinin

sebebi, türbinin çalışırken kanatlarının maruz kaldığı Reynolds sayısı aralıklarında (yaklaşık 120.000 ile 700.000 arası) kullanılan kanat profiline ait deneysel taşıma ve sürüklenme verilerinin [4] bulunmasıdır. Ayrıca yine aynı çalışmada bahsi geçen türbin inşa edilmiş ve deneyleri yapılmıştır. Bahsi geçen türbine ait geometrik bilgiler Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1: Analizi Yapılan DRT' ye Ait Bilgileri

|                     |           |
|---------------------|-----------|
| Kanat profili       | NACA 0018 |
| Türbin kanat sayısı | 3         |
| Türbin yarıçapı     | 1.8 m.    |
| Kanat veteri        | 0.3 m.    |
| Kanat boyu          | 2.4 m.    |
| Katılık oranı       | 0.25      |

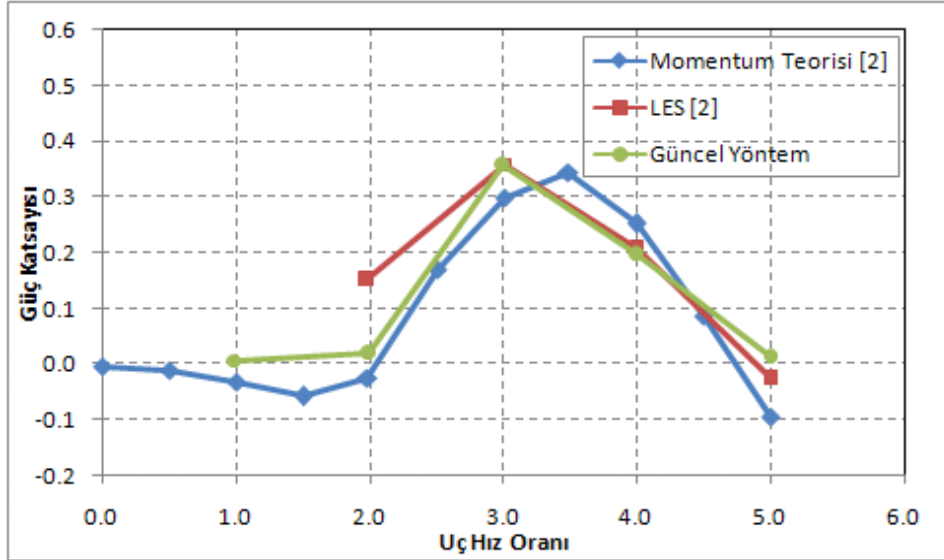
Çalışmada serbest akım hızı 6 m/s olarak belirlenmiş ve uç hız oranı 1 ile 5 arasında değişecek şekilde analizler yapılmıştır. Analizlerde hesaplama alanı içerisindeki hızların düşük değerlerde olacağı öngörüsüyle sıkıştırılmaz akış kabulü yapılmıştır. Hesaplama alanının uzak giriş sınırlarında serbest akım hızı tanımlanmış, uzak çıkış sınırlarında ise statik basınç atmosferik basınca eşitlenmiştir. Hesaplama alanının türbin civarındaki detayı Şekil 3' de gösterilmiştir.



Şekil 3: Türbin Modeli Civarındaki Hesaplama Alanı

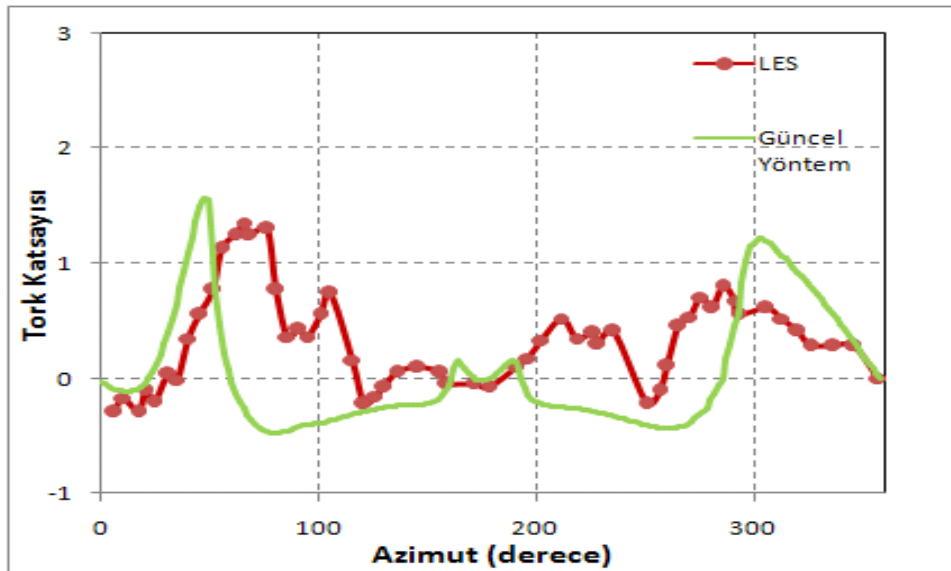
Şekil 4' de analiz sonucunda farklı uç hızı oranlarında elde edilen güç katsayılarının kaynak [2]' de LES analizi ve momentum teorisi yöntemleriyle elde edilen değerlerle karşılaştırılması verilmiştir. Şekilden görülebileceği üzere her 3 yöntemle benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bunun yanında LES ve bu çalışmada kullanılan yöntemin sonuçları daha düşük dönüş hızı için maksimum güç önermektedir. Bunun nedeni momentum teorisinin serbest akım hızında daha düşük yavaşlama tahmin etmesi olabilir. Düşük dönüş hızlarında LES ile diğer 2 yöntem sonuçları arasında büyük fark olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin ise LES yönteminin dönüş hızının düşük ve dolayısıyla kanadın gördüğü hücum açılarının yüksek olduğu akış şartlarında, yani dinamik akış ayrılmasının

türbinin performansında baskın olduğu rejimde, gerçeğe daha yakın sonuçlar vermesidir. Diğer 2 yöntemde dinamik akış ayrılması göz önüne alınmadığından ve sadece deney sonuçlarına dayalı taşıma ve sürüklenme verileri kullanıldığı için, yanlış sonuçlar verdikleri düşünülmektedir. Aynı çalışmada yapılan deneyler de göstermiştir ki türbin uç hız oranının 2 olduğu çalışma durumunda kendisi dönmekte, yani pozitif tork üretmektedir. Bu da LES sonuçlarının doğruluğunu göstermektedir. Yüksek dönüş hızları (düşük hücum açıları) için her 3 yöntem de oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Ayrıca belirtilmelidir ki momentum yöntemi yüksek dönüş hızları veya yüksek katılık oranları için kararlı olmayan sonuçlar üretebilmektedir [5].

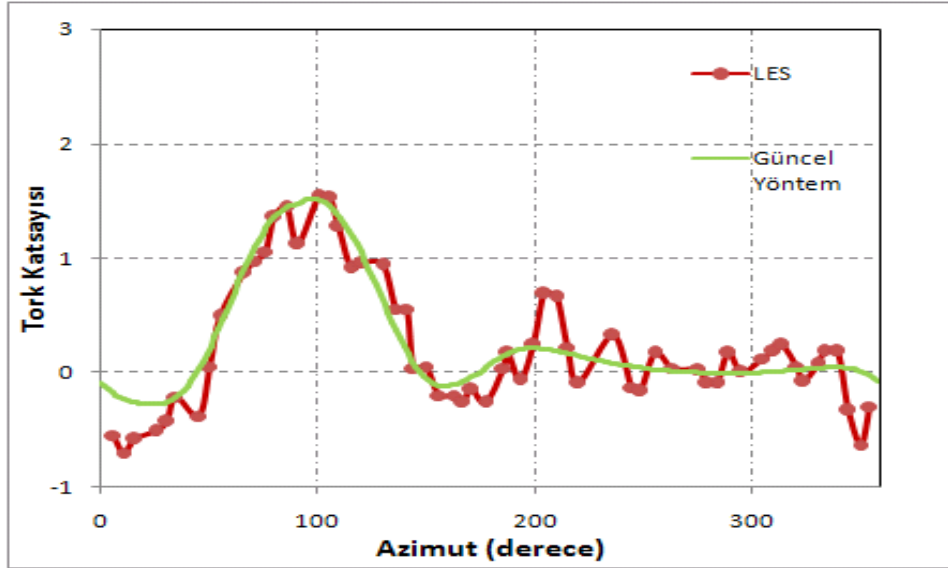


Şekil 4 : Güç Katsayısı - Uç Hız Oranı Karşılaştırması

Şekil 5 ve Şekil 6' da sırasıyla uç hız oranları 2 ve 4 için LES analizi ve bu çalışmada kullanılan yöntemle elde edilen tork değerlerinin azimuthal değişiminin karşılaştırılması verilmiştir.



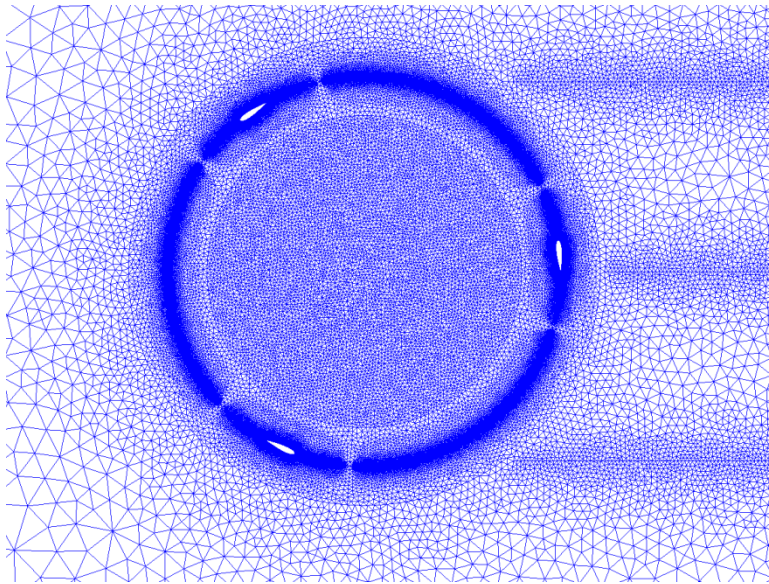
Şekil 5: Uç Hız Oranı 2 İçin Tork Değişimi Karşılaştırması



Şekil 6: Uç Hız Oranı 4 İçin Tork Değişimi Karşılaştırması

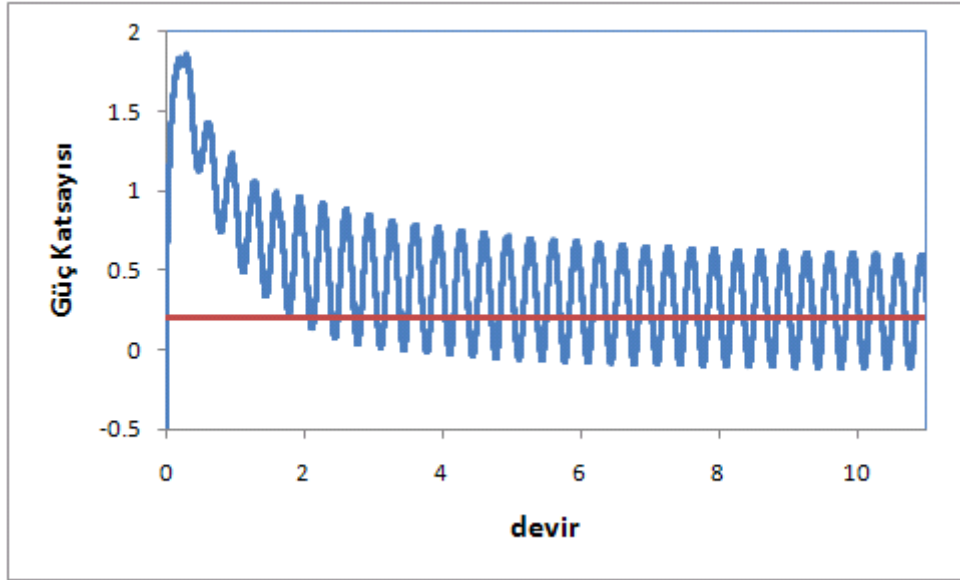
Şekil 5' deki karşılaştırma yukarda bahsi geçen uyumsuzluğu daha iyi açıklamaktadır. Tekrarlanacak olursa düşük dönüş hızları ve dolayısıyla yüksek hücum açıları (azimuth açısı 90 derece civarında) için LES yöntemi yüksek tork tahmin etmektedir. Bunun nedeni de kanat üzerindeki ayrılmayı gerekli doğrulukta tahmin edebilmesidir. Şekil 6' de ise dönüş hızının yüksek ve hücum açısının düşük olduğu rejimde LES ve kullanılan yönteminle elde edilen tork dağılımının oldukça uyumlu oldukları görülmektedir.

Yine aynı DRT için, uç hız oranının 4 olduğu çalışma koşulunda, tek denklemlili türbülans modeline (Spalart-Allmaras) dayanan HAD çözümü de yapılmıştır. Buradaki amaç güncel yöntem sonucunda ortaya çıkan akış alanını HAD çözümleriyle karşılaştırmaktır. HAD çözümünde DRT, dönen ve hareketsiz iki hesaplama alanı şeklinde modellenmiştir. Hesaplama alanının türbin civarındaki detayı Şekil 7' de gösterilmiştir.



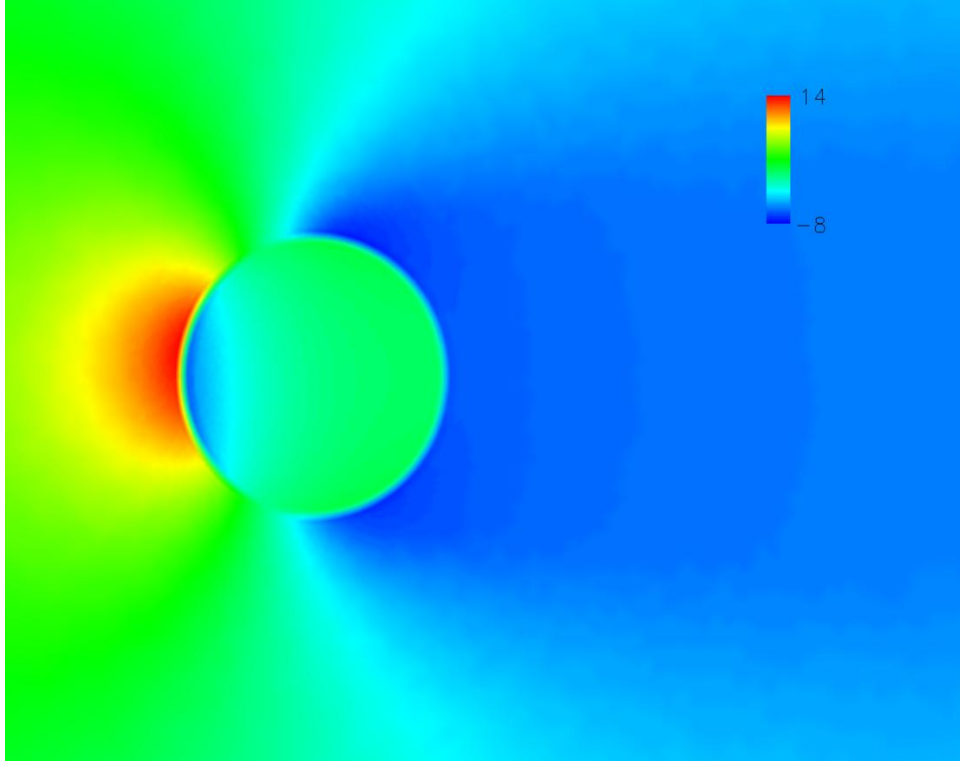
Şekil 7: Türbin Modeli Civarındaki Hesaplama Alanı

Bu çözüm için de sıkıştırılmaz akış kabulü yapılmış ve hesaplama alanının uzak sınırlarında, güncel yöntemdekine benzer sınır koşulları kullanılmıştır. Her zaman adımında DRT' nin yarattığı tork gözlemlenmiş ve tork değerleri periyodik yakınsama gösterene kadar hesaplamaya devam edilmiştir. Şekil 8' de HAD çözümünün yakınsama grafiği gösterilmiştir. Bu şekilde görülebileceği üzere HAD çözümünün yakınsaması oldukça uzun zaman almaktadır. Intel I7, 8 çekirdekli ve 3.07 Ghz hızda işlemcili PC' de, çözüm yaklaşık olarak 36 saat sürmüştür. Yakınsama sağlandıktan sonra çözüme akış alanının zaman ortalaması elde edilene kadar devam edilmiştir.

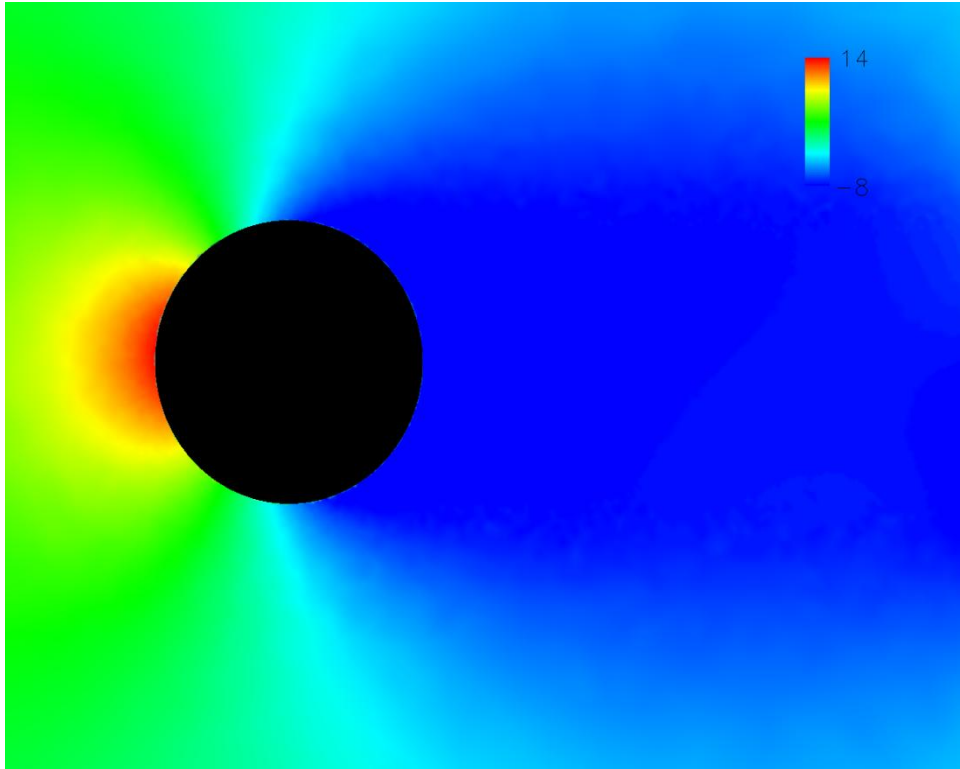


Şekil 8: HAD Çözümünün Yakınsama Grafiği

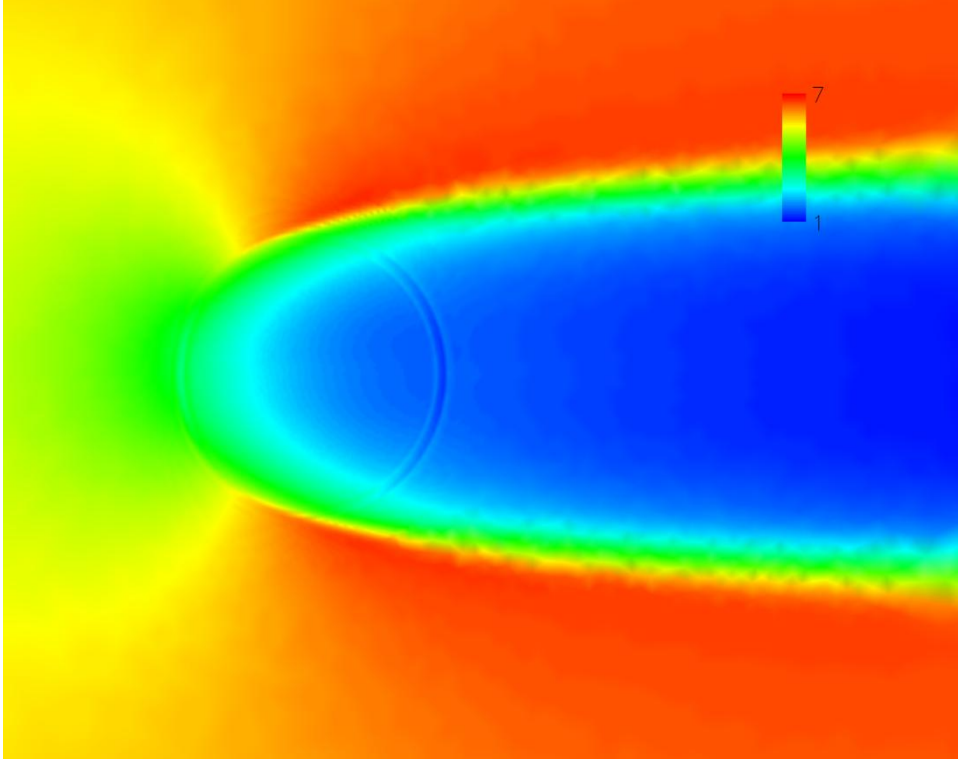
Şekil 9' da aynı uç hız oranı için güncel yöntem sonucunda elde edilmiş olan basınç alanı gösterilmektedir. Şekil 10' da ise aynı şartlar için HAD ile elde edilen basınç alanı gösterilmiştir. Şekil 11 ve Şekil 12' de ise sırasıyla güncel yöntem ve HAD ile elde edilmiş hız alanları gösterilmiştir. Bu şekillerden görülmektedirki her iki yöntem de benzer akış alanları hesaplamaktadır. Buradan güncel yöntemin DTR'lerin çevreleriyle etkileşimini içeren problemlerde kullanılabileceği görülmektedir.



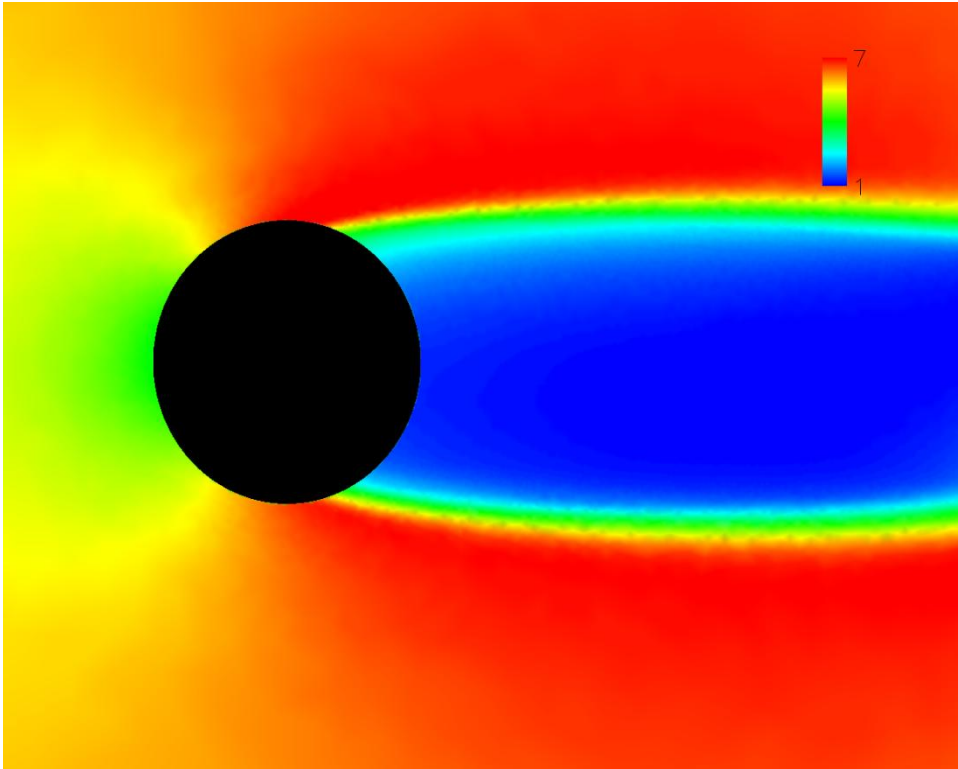
Şekil 9: Türbin Civarında Basınç Konturları (güncel yöntem)



Şekil 10: Türbin Civarında Basınç Konturları (HAD)



Şekil 11: Türbin Civarında Hız Konturları (güncel yöntem)



Şekil 12: Türbin Civarında Basınç Konturları (HAD)

## SONUÇ

Bu çalışmada kanat elemanı ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerinin beraber uygulanması esasına dayanan ve hız ve doğruluk açısından her iki yöntemin arasında yer alan bir metod uygulanmıştır. Uygulanan metodun sonuçları diğer bir çalışmada uygulanan HAD ve momentum teoremi yöntemlerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve tatmin edici oldukları görülmüştür. Ayrıca aynı türbin HAD ile tek denklemlili türbülans modeli kullanılarak modellenmiş ve bu analizin sonucunda çıkan akım alanına ilişkin detaylar yeni yöntemin sonuçlarıyla karşılaştırılmış.

Sonuç olarak söylenebilir ki, yeni metod DRT'lerin tasarım ve iyileştirme çalışmalarında büyük kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca yalın DRT'lerin modellenmesinde olduğu gibi, ileride karşılaşılacak rüzgar tarlası veya bina çatıları üzerindeki DRT'lerinin modellenmesi gibi etkileşim problemlerinde de tasarım ve iyileştirme süresinde büyük tasarruf sağlayabileceği öngörülmektedir.

## Kaynaklar

- [1] World Wind Energy Report. 2009
- [2] Iida, A., Kato, K., and Mizuno, A., "*Numerical Simulation of Unsteady Flow and Aerodynamic Performance of Vertical Axis Wind Turbines with LES*", 16th Australasian Fluid Mechanics Conference, Gold Coast, Australia, December 2007
- [3] Antheaume, S., Maitre, T., and Achard, J., "*A Innovative Modelling Approach to Investigate the Efficiency of Cross Flow Water Turbine Farms*", 2nd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, Timisoara, Romania, October 2007
- [4] Sheldahl, R. E. and Klimas, P. C., "*Aerodynamic Characteristics of Seven Airfoil Sections Through 180 Degrees Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines*", SAND80-2114, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico March 1981
- [5] Paraschivoiu, I., "*Double-Multiple Streamtube Model for Studying Vertical-Axis Wind Turbines*", AIAA Journal of Propulsion and Power, Vol. 4, 1988