

Araştırma Makalesi / Research Article

Taguchi Yöntemiyle Sağlamlık Oranının Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini Performansına Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Himmet Erdi TANÜRÜN

Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Elbistan Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7814-7043>, erdi.tanurun@istiklal.edu.tr

Geliş/ Received: 11.05.2023;

Kabul / Accepted: 25.07.2023

ÖZET: Son dönemde, Dikey Eksenli Rüzgâr türbinlerinin (DERT) kullanımı kentsel alan uygulamalarında artmasından dolayı, DERT performansının geliştirilmesi üzerine pasif kontrol çalışmaları yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada, DERT'in güç katsayısı (C_p) performansını geliştirmek için sağlamlık oranı optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon, Taguchi metodu sayesinde elde edilmiştir. Türbin kanat sayısı (N), türbin kanadı veter uzunluğu (v), türbin çapını (D) içeren 3 kontrol faktörü ile çalışmalar yürütülmüştür. Belirlenen faktörler ile $L_9(3^3)$ ortogonal dizisi dizayn edilmiştir. Tüm modeller 2.62 kanat uç hız oranı (λ) ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak elde edilmiştir. Varyans analizi (ANOVA) yöntemiyle her bir kontrol faktörünün performansa olan katkı miktarları elde edilmiştir. Daha sonra Regresyon analiziyle, kontrol faktörlerini içeren lineer denklem oluşturularak, DERT'in tahmini C_p değerleri geliştirilmiştir. Sonuçlarda, sistem performansının optimal olmasını sağlayan parametre konfigürasyon $N=2$, $v=60$ mm, $D=1.2$ m, olarak elde edilmiştir. Optimal modelin C_p değeri, geleneksel DERT'e göre %9.96 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. ANOVA yöntemiyle parametrelerin DERT'in C_p 'ye olan katkı sıralaması $D>N>v$ olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara, göre D parametresi, %62.11 ile en majör etkiyi, v parametresi ise %1.73 ile en az etkiyi sağlamıştır. Doğrulama testi ile regresyon analizinden (RA) elde edilen tahmini sonuçlardaki mutlak yüzdellik değişimi (R^2) değerleri sırasıyla 0.995697 ve 0.971835, istatistiksel hata miktarı (İHM) değerleri ise sırasıyla 0.000296 ve 0.001187 olmasından dolayı, doğrulama testi ile RA elde edilen sonuçlar ile nümerik sonuçlar oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini (DERT), Sağlamlık Oranı, Optimizasyon, HAD, Güç katsayısı (C_p), Varyans Analizi (ANOVA)

*Sorumlu yazar / Corresponding author: erdi.tanurun@istiklal.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Tanürün, H.E. (2023). Taguchi Yöntemiyle Sağlamlık Oranının Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini Performansına Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(2), 355-372.

Numerical Investigation of the Effect of Solidity on Vertical Axis Wind Turbine Performance by Taguchi Method

ABSTRACT: Recently, since the use of Vertical Axis Wind Turbines (VAWT) has increased in urban applications, passive control studies on improving VAWT performance have become widespread. In this study, solidity optimization was performed to improve the power coefficient (C_P) performance of VAWT. Optimization was achieved by the Taguchi method. Studies were carried out with 3 control factors including turbine blade number (N), turbine blade chord length (v), turbine diameter (D). The L9 (3^3) orthogonal array was designed with the determined factors. All models are obtained using computational fluid dynamics (CFD) with a blade tip speed ratio (λ) of 2.62. The contribution amounts of each control factor to the performance were obtained by the analysis of variant (ANOVA) method. Then, the estimated C_P of VAWT were developed by creating a linear equation containing control factors with Regression analysis. In the results, parameter configuration N=2, v=60 mm, D=1.2 m, which ensures optimal system performance, was obtained. The C_P value of the optimal model was found to be 9.96% higher than the traditional DERT. With the ANOVA method, the contribution order of the parameters DERT to C_P was obtained as $D > N > v$. According to these results, the D parameter had the most major effect with 62.11%, and the v parameter had the least effect with 1.73%. Since the absolute percentage change (R^2) values in the estimated results obtained from the validation test and regression analysis (RA) were 0.995697 and 0.971835, respectively, and the statistical error amount (RMSE) values were 0.000296 and 0.001187, respectively, it was observed that the results obtained from the validation test and RA were in good agreement with the numerical results.

Keywords: Vertical axis wind turbine (VAWT), Solidity, Optimization, CFD, Power Coefficient (C_P), Analysis of Variance (ANOVA)

1. GİRİŞ

Son yıllarda, fosil yakıtların hızlı bir şekilde tükenmesine ek olarak fosil yakıtlardan kaynaklanan sera gazı salınımının çevreye verdiği ciddi zararlar, yenilenebilir enerji teknolojilerinin gelişimi hızlı bir şekilde artırmaktadır (Chen ve ark., 2017; Tanürün ve ark., 2020). Rüzgâr enerjisi, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının sahip olduğu avantajların yanı sıra daha ucuz olmasından dolayı dünyada yenilenebilir enerji alanında en hızlı büyüyen teknoloji durumundadır (Bhutta ve ark., 2012). Rüzgâr enerji genellikle dönüş yönüne göre dikey eksenli rüzgâr türbini (DERT) ve yatay eksenli rüzgâr türbini (YERT) olmak üzere 2 gruba ayrılmaktadır (Du ve ark., 2019). YERT'in yüksek veriminden kaynaklı, hem kıyıdan uzak hem de karadaki ticari uygulamalardaki kullanımı DERT'e göre daha yaygındır (Wang ve ark., 2016). Kıyıdan uzak bölgelerde, rüzgâr yönündeki anlık değişkenlik sınırlıdır ancak yüksek binalara sahip yerleşim yerlerinde rüzgâr yönü anlık olarak sürekli değişkenlik göstermektedir. Bu yüzden, DERT'in, YERT'e göre en önemli avantajlarından biri olan sapma mekanizmasına gerek kalmadan rüzgârı her bölgeden alabilme özelliği ve şehir merkezlerinde binalardaki çatı tipine kurulum uygunluğundan dolayı, DERT'in yakın gelecekteki kullanım alanının hızlı bir şekilde gelişeceği öngörülmektedir (Wang ve ark., 2018; Wang ve ark., 2018). Son dönemde uygulama alanının yaygınlaşması dolayı bilim insanların DERT'in performansı üzerinde çalışmalarını hızlandırmaktadır.

DERT'in güç performansı (C_P) üzerinde sağlamlık oranının (σ) dikkate değer bir etkisi olduğu literatürde birçok çalışmada tespit edilmiştir. Jiang ve ark. (2007) H tipi DERT'lerde σ 'nın artması, maksimum C_P değerinin daha düşük kanat uç hız oranında (λ) gerçekleşmesine sebep olduğunu

belirlemişlerdir. Howell ve ark. (2010) σ ve türbin kanat pürüzlülüğünün kanat uç girdaplarının oluşumuna ve buna bağlı olarak DERT'in performansı üzerine olan etkisini 3 boyutlu sayısal çalışmalarda incelemişlerdir. Li ve Li (2010) düz kanatlı DERT'lerde farklı kanat veter uzunluğu (v) ve sayısına (N) bağlı olarak elde edilen 2 farklı σ 'nın C_P üzerine olan etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Bedon ve ark. (2012) DERT'in düşük σ değerlerinde yüksek üretim ve daha kontrol edilebilir bir türbin elde edildiğini belirlemişlerdir. Marco ve ark. (2012) DERT'in bir tam tur dönüşü sırasında Tork (T) varyasyonlarını sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuçlarda türbin N 'sinin artması, maksimum C_P değerini azalttığı ve aynı zamanda maksimum C_P değerini daha düşük λ 'da gerçekleştirdiğini tespit etmişlerdir. Benzer sonuçlar Tangler'in (2000) çalışmasında görülmektedir. Roh ve ark. (2013) 0.5 ve 0.8 σ aralığındaki sayısal analizlerinde, σ 'nın artmasıyla eliptik DERT'in, H-tipi DERT'e göre güç (P) eğrisi grafiğinde farklılıklar oluştuğunu tespit etmişlerdir. Joo ve ark. (2015) DERT'lerde σ 'nın azalması, blokaj ve girdapların olumsuz etkisini azalttığını ayrıca düşük λ 'larda negatif T oluşumunu azaltarak ilk uyarı probleminin çözümlenmesine olanak sağladığını tespit etmişlerdir. Lee ve Lim (2015) DERT'in v , rotor çapı, eğim açısı (β) ve helis açısı parametrelerinin P ve T performansına olan etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuçlarda, küçük λ aralığında düşük rotor çapı ve yüksek v 'ye bağlı olarak oluşan yüksek σ değerlerinde C_P 'nin geliştiğini gözlemlemişlerdir. Aksine yüksek λ aralığında, yüksek rotor çapı ve düşük v 'ye bağlı olarak elde edilen düşük σ 'nın daha yüksek performansa sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Abu-El-Yazied ve ark. (2015) DERT'lerde v ve N etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuçlarda v 'nin artışı belirli bir noktaya kadar C_P üzerinde olumlu etki sağladığını, belirli bir noktadan sonra verim üzerinde olumsuz etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Li ve ark. (2015) NACA 0021 kanat modeline sahip DERT'lerde, N etkisinin türbin performansına olan etkisini incelemişlerdir. N 'nin artması C_P 'yi azalttığını gözlemlemişlerdir. Sen Gupta ve ark. (2016), düşük rüzgâr hızı DERT'lerde ilk uyarı özelliklerini inceleyerek, enerji verim potansiyellerini anlamadaki önemli bir boşluğu ele almışlardır. Üç tip kanada sahip türbin modellerini kullanılarak yapılan deneyler sonucunda, simetrik olmayan veya yüksek σ sahip asimetric kanatların kullanılmasının H-Darrieus rotorlarının hem ilk uyarı hem de C_P iyileştirebileceği tespit etmişlerdir. Özellikle, simetrik olmayan S815 kanatlı rotor, muadillerine göre daha yüksek bir dinamik tork ve C_P sergileyerek, düşük rüzgâr koşullarında performans artışı için umut verici bir potansiyel olduğunu belirlemişlerdir. Delafin ve ark. (2016) aynı v 'ye sahip farklı kanat sayılarındaki Φ -DERT'lerin T , itki ve yanal kuvvet performanslarını deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuçlarda, 3 kanatlı türbinin 2 kanatlıya göre T , itki ve yanal kuvvetlerdeki dalgalanmanın daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Parra ve ark. (2018) H-tipi DERT'lerde σ 'ın azalması ilk uyarı probleminin çözümlenmesine ve P üretimde λ aralığının genişlemesine katkı sağladığını tespit etmişlerdir. Liang ve ark. (2018) 0.2-1.28 σ aralığında H-tipi DERT'in performansını incelemişlerdir. Sonuçlarda, 0.2-0.6 σ aralığında optimal sonuçları elde etmişlerdir. Kaya ve ark. (2022) yarıçapa bağlı σ 'nın, H-tipi DERT'in C_P 'si üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Sonuçlarda, düşük λ değerlerinde σ 'nın artması, yüksek λ değerlerinde ise σ 'nın azalması türbin veriminin performansını geliştirdiğini belirlemişlerdir.

Son yıllarda, güçlü dizayn metodolojisinden dolayı Taguchi metoduna olan ilgi mühendislik uygulamalarında artmaktadır (Athreya ve Venkatesh, 2012). Taguchi sistemi en iyi veriminin elde edilmesi için farklı bağımsız değişkenlerin belli bir algoritma altında analizini sağlayan istatistiksel bir yöntem olmasından dolayı birçok farklı DERT uygulamalarında kullanılmaktadır. Hu ve Rao (2011) YERT'lerde optimal performansı Taguchi metoduyla gerçekleştirmiştir. Wang ve ark. (2018) farklı genlik ve dalga boyuna sahip tüberkül yapılı hücum kenarı ile sarmal kanatlı yapıları DERT'lerde pasif kontrol yöntemiyle uygulamışlardır. Bu 3 değişkenin optimizasyon algoritması Taguchi metodu

sayesinde elde edilmiştir. Sonuçlarda en efektif tüberkülün dalga boyu ve genliği sırasıyla v 'nin %2.5'i ve %16.6'sı kadar olduğunu gözlemlemişlerdir. Ek olarak optimal verim kanat burkulma açısının 60° olduğu durumda elde etmişlerdir. Bu parametreler kullanılarak elde edilen optimal DERT, geleneksel DERT'den %18.3 daha yüksek verime sahip olduğu gözlemlemişlerdir. Qasemi ve ark. (2020) DERT'in akış yönü bölgesinin alt tarafına düz engel yerleştirerek, türbin performansına olan etkisini nümerik olarak incelemişlerdir. 5 farklı değişkenin DERT'in P performansına olan etkisini Taguchi metodu kullanarak optimize etmişlerdir. Sonuçlarda en optimal düz engel ile güçlendirilmiş DERT'in, geleneksel DERT'e göre verimi %16.42 daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Hassanpour ve Azadani (2021) çift Darrieus DERT'in C_P performansını üç boyutlu sayısal çalışmalar ile analiz etmişlerdir. 3 farklı parametreden oluşan çift Darrieus DERT konfigürasyonu Taguchi metodu sayesinde elde edilmiştir. Optimal çift Darrieus DERT konfigürasyonu, geleneksel Darrieus DERT'in performansını %26.6 geliştirdiğini tespit etmişlerdir. Detaylı literatür çalışması incelendiğinde, DERT'lerde σ analizi üzerine çalışmaların yoğun bir şekilde yapıldığı gözlemlenmiştir. Ancak Taguchi metodu kullanılarak DERT'in σ optimizasyonuna ve buna ek olarak ANOVA ile DERT'in σ 'yu etkileyen parametrelerin katkı miktarını ve doğrulama testlerini içeren sayısal bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır.

Bu çalışmanın ana amacı, DERT'in güç performansı üzerinde dikkate değer bir etkiye sahip olan σ 'yu içeren parametrelerden oluşan ortogonal dizayndaki denemeleri sayısal olarak incelemektir. Türbin kanat sayısı (N), türbin kanat veter uzunluğu (v), türbin çapını (D) içeren bu dizayn parametreleri Taguchi metodu ile tasarlanmıştır. Taguchi metodu ile oluşturulan dizilerden elde edilen σ optimize edilmiş DERT'in güç katsayısı (C_P) çıktısı açısından geleneksel DERT ile karşılaştırılmıştır. Ek olarak σ 'yu oluşturan N , v ve D parametrelerin DERT'in C_P 'ye olan katkı sıralamaları, ANOVA yöntemiyle elde edilmiştir. Ardından Regresyon analizi ile testler için lineer bir denklem oluşturulup, doğrulama testleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak σ optimizasyonu ile desteklenmiş DERT'in detaylı akış karakteristiği incelenmiştir.

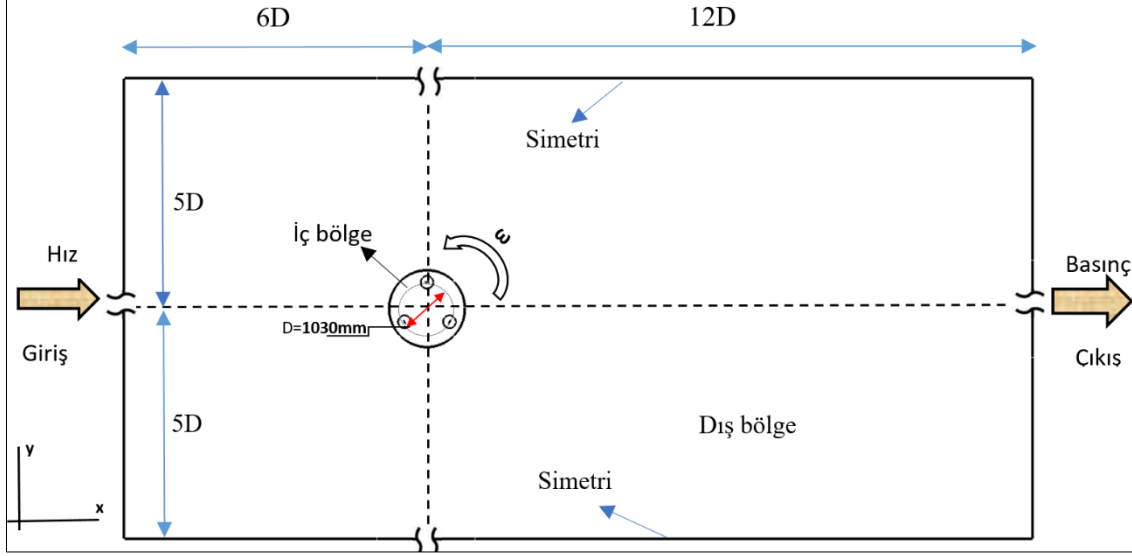
2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Geometri

Bu çalışmada, literatürdeki aerodinamik çalışmalarda (Şahin ve Acır, 2015; Tanürün ve Acır, 2019; Tanürün ve ark., 2021; Kaya, 2023) yaygın olarak kullanılan 4 rijitli NACA 0021 kanat modeline sahip DERT'in güç performansı elde edilmiştir. Türbin modelinde doğrulamada kullanılan v ve D sırasıyla 85.8 ve 1030 mm olarak belirlenmiştir (Castelli ve ark., 2011). Bu v ve D değerlerine bağlı olarak σ değeri 0.5 olarak elde edilmiştir. Türbinin dönme esnasında dikey eksenli kanatların hareket simülasyonunu elde etmek için dönen bir iç bölge oluşturulmuştur. İç bölgeler içinde, her kanadı ayrı ayrı çevreleyen kontrol çember1 ($k_{ç1}$), kontrol çember2 ($k_{ç2}$), kontrol çember3 ($k_{ç3}$) alanları oluşturularak her bir kanadın sayısal olarak daha iyi çözümlenmesi amaçlanmıştır. Akış hacmi, akış performansı üzerinde herhangi bir etki oluşturmaması için ideal boyutlar belirlenmiştir. Bu kapsamda diğer çalışmalara (Hao ve ark., 2021) dayanarak, Şekil 1'deki türbin merkezinin giriş, çıkış, alt ve üst yüzeylere olan uzaklığı sırasıyla 6D, 12D ve 5D olarak belirlenmiştir. Bölgeler arasında akış sürekliliğinin oluşması için her bir bölge arasına ara yüzler oluşturulmuştur. Çalışmada havanın girişteki serbest akış hızı (U_0) 9 m/s olarak ayarlanmıştır. Çıkış sınır koşulu, atmosferik basınç olarak seçilmiştir. Yanal alt ve üst sınır simetri ve kaymaz koşul olarak belirlenmiştir. Türbülans şiddeti (Tl) ve yoğunluk (ρ) değerleri sırasıyla %1 ve 1.225 kg/m^3 'dür. Çizelge 1'de, geleneksel DERT'in fiziksel özelliklerini gösterilmektedir.

Çizelge 1. Doğrulama modeli için oluşturulan geleneksel türbin karakteristiği

Parametre	Değer
Türbin çapı (D)	1030 mm
Türbin yüksekliği (H) (iki boyutlu)	1m
Kanat veter uzunluğu (v)	85.8 mm
Kanat profili	NACA 0021
Kanat sayısı (N)	3
Türbin Göbek-Kanat bağlantı noktası	0.5c



Şekil 1. Akış hacminin şematik diyagramı

2.2 Sayısal Metot

DERT'in rüzgâr türbini etrafındaki akış karakteristiğini URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier–Stokes) yöntemi ile modellenmiştir. URANS denklemleri, süreklilik ve Navier–Stokes denklemlerine, Reynolds (Re) ayrışımı ve ortalaması uygulanarak elde edilir ve şu şekilde verilir:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_i \partial \bar{x}_j} + \frac{\partial}{\partial \bar{x}_j} (-\overline{u'_i u'_j}) + \bar{f}_i \quad (2)$$

\bar{u}_i, u'_i ve \bar{f}_i sırasıyla ortalama hız, hız dalgalanması ve ortalama cisim kuvveti olarak tanımlanmaktadır. ν ve $-\overline{u'_i u'_j}$ ise sırasıyla kinematik viskozite ve Re gerilme tensörüdür. SST $k - \omega$ modeli, $k - \omega$ 'nın iç sınır tabaka akış üzerindeki yeteneği (Wilcox, 1998) ile $k - \varepsilon$ modelinin serbest akış üzerindeki yeteneğinin (Jones ve Launder, 1973) birleştirmekte ve yüzey akış ayrışmalarını (Dar'oczy ve ark., 2015) uygun bir şekilde çözümlenmektedir. Ayrıca bu çalışmada da kullanılan SST $k - \omega$ türbülans modeli güçlü girdap akışlarında olumlu sonuçlar vermesinden dolayı literatürdeki birçok çalışmada kullanılmıştır (Elkhoury ve ark., 2015; Balduzzi ve ark., 2016; Zuo ve ark., 2016).

DERT'e gelen akış, Eşitlik 3. de gösterildiği üzere türbin kanatlarında T'nin oluşmasına neden olmaktadır (Kaya ve ark., 2022).

$$T = \frac{1}{2} C_T \rho A R U_0^2 \quad (3)$$

Burada C_T ve ρ sırasıyla tork katsayısı ve yoğunluktur. Ayrıca A ve R sırasıyla süpürme alanı ve türbin çapı olarak ifade edilmektedir. DERT'in performansını incelemek için, C_P olarak ifade edilen güç performansı katsayısı tanımlanmıştır. C_P değeri Eşitlik 4. de ifade edildiği üzere C_T 'den türetilmiştir. C_P , bu çalışmada oluşturulan modeller arasındaki performansın karşılaştırılmasında kullanılmıştır (Tanürün ve Acır, 2022).

$$C_p = C_T * \lambda \quad (4)$$

Buradaki λ , kanat uç hız oranı (TSR) olarak tanımlanmaktadır ve aşağıda denklemde verilmiştir:

$$\lambda = \frac{R\omega}{U_0} \quad (5)$$

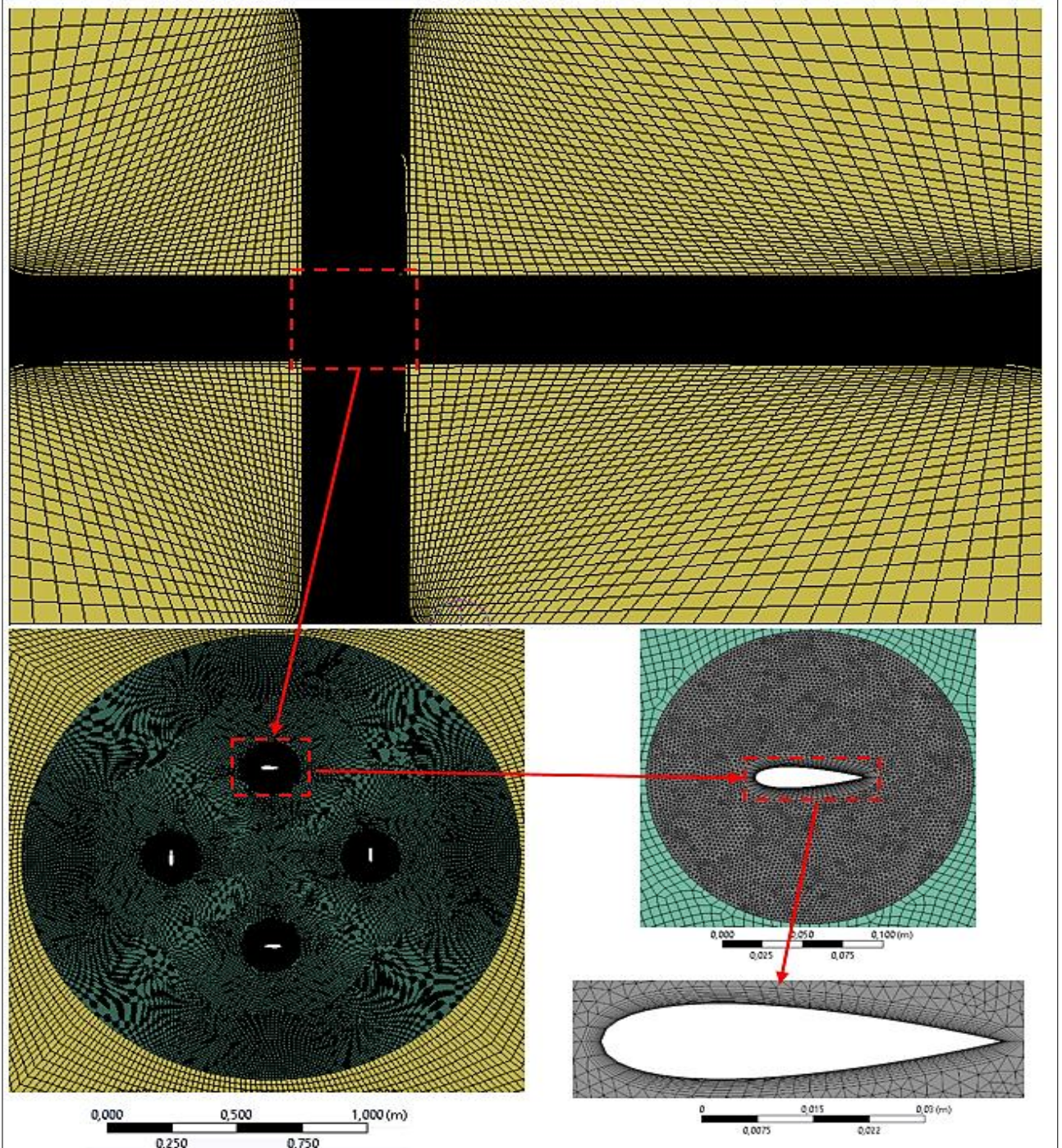
Buradaki R , ω ve U_0 sırasıyla türbin yarıçapı, açısal hız ve serbest rüzgâr akış hızı olarak tanımlanmaktadır.

$$\sigma = \frac{Nv}{D} \quad (6)$$

Eşitlik 6. da gösterilen σ , kanatların toplam alanının, türbinin süpürdüğü alana oranı olarak tanımlanmaktadır ki bu çalışmanın temel etken parametresini oluşturmaktadır.

Çalışmada doğrulama için kullanılan DERT'in ağ örgüsü dağılımı Şekil 2'de gösterilmiştir. Düşük ağ örgüsü boyutları, doğru çözümü ulaşmayı kolaylaştırırken yüksek hesaplama süreleri oluşturmaktadır. Bu yüzden, düşük hesaplama süresinde ve yüksek doğrulukta ağ örgüsü boyutları belirlenmesi son derece önemlidir. Akış hacminde, türbin kanatlarından giriş, çıkış ve dış duvara doğru ağ örgüsü boyutları büyümektedir. Bunun sebebi türbin civarında daha hassas çözüm gerekmesinden kaynaklanmaktadır. $k\epsilon_1$, $k\epsilon_2$ ve $k\epsilon_3$ bölgelerinde "Ansys-meshing" kullanarak üçgen ağ örgüsü uygulanırken, hesaplama alanının diğer bölgelerinde kare ağ örgüsü yöntemi uygulanmıştır. Türbinin kanat yüzeyinin yakın bölgelerinde akış karakteristiğindeki değişkenliğin yüksek olmasından dolayı çözüm süresini uzamasına rağmen doğru çözüm elde edilebilmesi için üçgen yapısı uygulanmıştır. Şekil 2'de görüldüğü üzere kanat yüzeyindeki sınır tabakada, laminardan türbülansa geçişin olduğu oldukça karmaşık bir akış olayı gerçekleşmektedir. Bu akış olayının doğru bir şekilde çözümlenebilmesi için kanat yüzeyine ağ örgüsü sınır tabakaları oluşturulmuştur. Kanat yüzeyindeki sınır tabaka geçiş kalitesini denetleyen ve daha önceki çalışmalarda bahsedilmiş olan (Liu ve ark., 2020) kanat yüzeyindeki ilk sınır tabakaya y^+ denilmekte ve genel olarak dış akış uygulamalarında bu değer 1'den küçük olması amaçlanmaktadır. Bu çalışmada, y^+ değerinin, ilk sınır tabaka yüksekliği ve büyüme oranı sırasıyla 0.29 mm ve 1.2 olacak şekilde 12 sınır tabakadan oluşturularak, 1'den küçük olması planlanmıştır. Tüm bu ağ bileşeni içerikleri doğrultusunda geleneksel DERT modelinin ağ örgüsü sayısı 144 958 olarak elde edilmiştir. Belirlenen bu mesh sayısı, literatürdeki doğrulama yapılacak deneysel çalışmadan elde edilen C_P grafiği ile uyumlu olmasından dolayı kabul edilmiştir. Geleneksel model haricindeki 9 modelin boyut farklılıklarından kaynaklı ağ örgüsü sayısındaki küçük değişiklikler olmasına rağmen, tüm modellerin ağ örgüsü ile geleneksel DERT'in ağ örgüsü sayısı arasında %1'den daha düşük bir farklılık olduğu tespit

edilmiştir. Ağ örgüsü yapısının, eleman kalitesi, ortogonal kalite ve çarpıklık gibi parametreler ile de kalitesi değerlendirilmektedir. Eleman ve ortogonal kalitenin 1'e yakın, çarpıklık değerinin ise sıfıra yakın olması ağ örgüsü kalitesinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Bu çalışmada eleman kalite, ortogonal kalite ve çarpıklık değeri sırasıyla, 0.845, 0.878 ve 0.194 olarak elde edilmiştir. Bu değerleri yüksek ağ örgüsü kalitesinin elde edildiğinin göstermektedir.

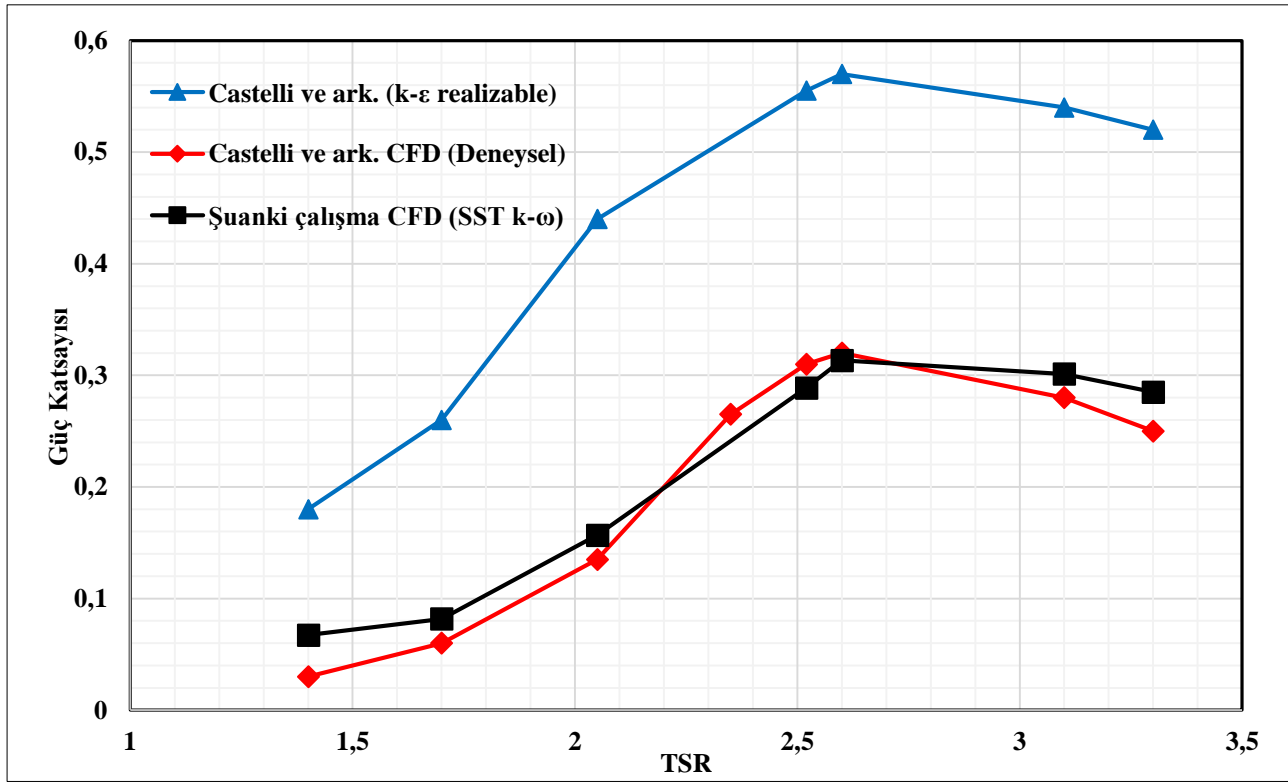


Şekil 2. Genel ve bölgesel alanlardaki ağ örgüsü

2.3 Model Doğrulaması

Nümerik çalışmalar güvenilirliği için deneysel çalışmalar ile doğrulama yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, Şekil 3'de görüldüğü üzere Castelli'nin (Castelli ve ark., 2011)

yürüttüğü deneysel ve sayısal çalışmalar ile doğrulama yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, tüm λ değerlerinde mevcut çalışma ile Ref. (Castelli ve ark., 2011)'nin deneysel sonuçları arasında iyi bir uyuma gözlemlenmiştir. Özellikle maksimum C_P değerinin olduğu 2.62λ değerinde deneysel çalışma ile oldukça benzer bir sonuç elde edilmiştir.

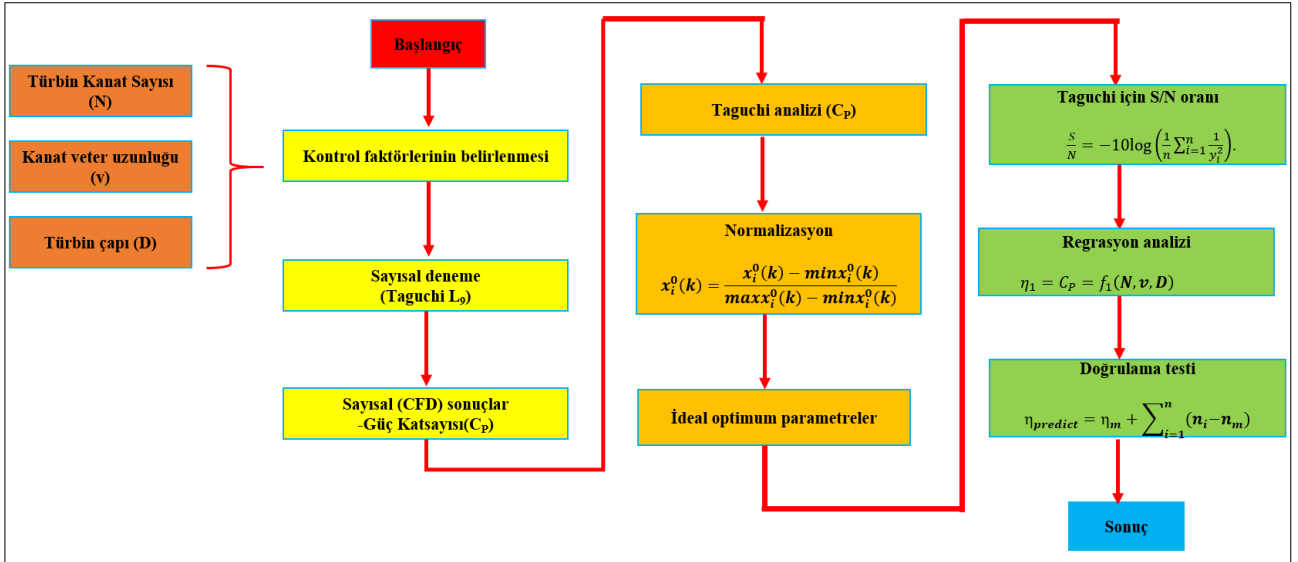


Şekil 3. Ref. (Castelli ve ark., 2011)'un nümerik ve deneysel çalışması ile mevcut çalışmanın güç katsayısı açısından karşılaştırılması

3. TAGUCHİ METOT

Rüzgâr türbini performansı üzerinde kanat aerodinamiğinin büyük etkisi bulunmaktadır. Rüzgâr türbini performansını etkileyen σ parametrelerini optimize etmek için Şekil 4'de akış şeması gösterilen Taguchi yöntemi kullanılmaktadır.

Bu çalışmada literatürde kullanılan ve kanat performansı üzerinde dikkate değer bir etkisi olan σ 'yı oluşturan parametrelerin etkisi incelenmiştir. Şekil 5'de NACA 0021 kanat modelinde türbin yarıçapı ve türbin kanat veter uzunluğuna sahip 3 kanatlı bir DERT türbini gösterilerek σ 'yı oluşturan parametreler ifade edilmiştir. Taguchi metodu, rüzgâr türbin performansını etkileyen parametrelerin optimize edilmesi için kullanılmaktadır. Taguchi metodu temelde amaç fonksiyonu tanımlanması, dizayn parametrelerinin belirlenmesi ve sinyal-gürültü yoğunluk oranı (S/N) analizlerine bağlı olarak optimal dizayn parametresinin elde edilmesi için sayısal denemelerin sonuçlarının kullanılması olmak üzere 3 ana unsuru içermektedir. Çizelge 2'de, N, v ve D olacak şekilde σ 'yı oluşturan parametreler kullanarak belirlenen faktörler ile amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonunda N, v ve D faktörleri A, B ve C olarak temsil edilmiştir. Taguchi metodunun en önemli adımlarından birisi de ortogonal dizisinin elde edilmesidir. 3 faktör ve her bir faktörün 3 seviyesi için, Çizelge 3'de $L_9 (3^3)$ ortogonal dizisi oluşturularak, 9 sayısal deneme ile hem optimal parametre konfigürasyonu hem de parametrelerin etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

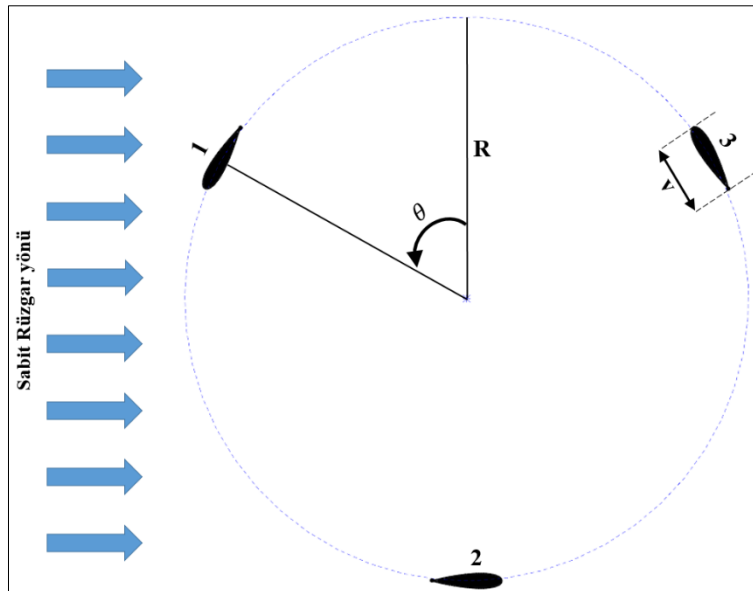


Şekil 4. Taguchi metodunun şematik gösterimi

Eşitlik 7. ile ifade edilen S/N amaç fonksiyonu parametrelerinin kalite ölçümünün bir göstergesi olarak tanımlanmaktadır. En yüksek C_p değerine sahip DERT'in σ faktörleri, optimal parametreler olarak belirlenmesinden dolayı Eşitlik 7. de "larger-the-better" modülü S/N oranıdır (Çakıroğlu ve ark., 2023; Evran ve Yıldır, 2023).

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (7)$$

Buradaki n ve y_i ifadeleri sırasıyla sayısal deneme sayısı ve rüzgâr türbininden elde edilen C_p değeri anlamına gelmektedir.



Şekil 5. 3 kanatlı azimut açısında DERT'in şematik gösterimi

Çizelge 2. Taguchi yöntemi faktör ve seviyeleri

	Kontrol Faktör	Seviyeler		
		1	2	3
A	Türbin kanat sayısı (N)	2	3	4
B	Kanat veter uzunluğu (v)	0.6 m	0.8 m	0.1 m
C	Türbin çapı (D)	0.8 m	1 m	1.2 m

Çizelge 3. Taguchi yöntemine dayalı sayısal deneme ortogonal dizaynı

Deneme	Seviye			
	N	V (mm)	D (m)	σ
1	2	60	0.8	0.30
2	2	80	1	0.32
3	2	100	1.2	0.33
4	3	60	1	0.36
5	3	80	1.2	0.40
6	3	100	0.8	0.75
7	4	60	1.2	0.40
8	4	80	0.8	0.80
9	4	100	1	0.80

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 DERT'in Faktör ve S/N Etkileri

Temel DERT'in maksimum C_P değeri 2.62λ olmasından dolayı Çizelge 3'de gösterilen 9 sayısal denemenin tamamı bu TSR değerinde gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4'de, geleneksel DERT ve 9 denemenin C_P , S/N oranı ve güç artışı (%) gösterilmiştir. Geleneksel DERT'in C_P değeri 0.313 olarak elde edilmiştir. S/N "Larger is better" modülü olarak düzenlenmesinden dolayı yüksek S/N oranı değeri sahip modellerin yüksek C_P değerine de sahip olduğu görülmektedir. 3. ve 5. deneme tasarımlarının DERT'in performansını sırasıyla %9.158 ve %7.042 geliştirdiğini belirlenmiştir. Ortogonal diziye oluşturulan diğer 7 modelin DERT'in performansına olumsuz bir etki oluşturulduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlarda σ 'yı oluşturan parametrelerin C_P değeri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5'dan türetilmiş olan Şekil 6'da gösterildiği üzere, 3 faktörün her bir seviyesinin etki seviyeleri S/N cinsinden ifade edilmiştir. Daha önceden de bahsedildiği üzere, S/N değerinin yüksek olması DERT'in performansına olumlu etkisi olmasından dolayı her bir faktöründeki maksimum S/N seviyeleri optimal σ parametrelerinin elde edilmesine imkân sağlamaktadır. Bu kapsamda, N, v ve D faktörlerinin en yüksek seviye değerleri sırasıyla 2 (A1), 60 mm (B1), 1.2 m (C3) olarak belirlenmiş ki bu değerler ile σ değeri 0.2 olarak elde edilmiştir. Çizelge 4 incelendiğinde, optimal σ parametrelerinden meydana gelen A1B1C3 modeli ortogonal dizi içinde yer almamaktadır. L_9 'da belirlenmiş olan 9 sayısal denemeye ek olarak optimal modelinde sayısal analizi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4. Ortalama güç katsayısı, S/N oranı için sayısal analiz sonuçları

Deneme	C_p	S/N oranı	Türbin Güç performans oranı (%)
Geleneksel DERT	0.313	-	-
1	0.265932	-11.5046	-15.0378
2	0.30796	-10.2301	-1.610
3	0.341665	-9.3280	9.158
4	0.296744	-10.5524	-5.194
5	0.33504	-9.4981	7.042
6	0.268197	-11.4309	-14.314
7	0.305259	-10.3066	-2.473
8	0.220638	-13.1264	-29.509
9	0.247401	-12.1320	-20.958

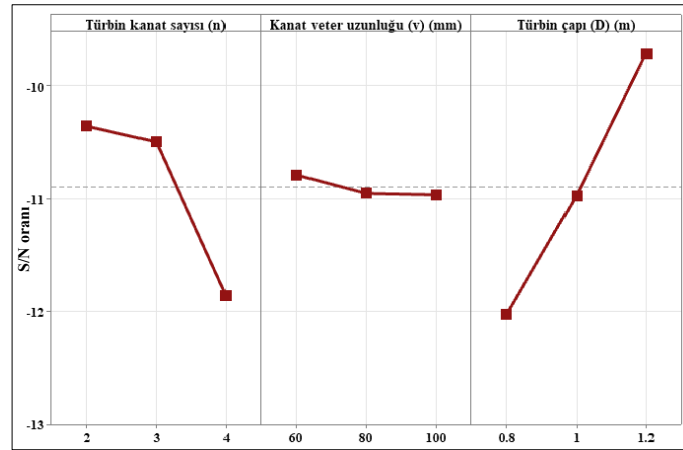
Çizelge 6’de, optimal modelin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizinde elde edilen sayısal analiz sonucu ve MINITAB 22 programından elde edilen tahmini değer gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, optimal modelin tahmini ile sayısal C_p değerleri sırasıyla 0.346522 ve 0.344187 olarak elde edilmiş ki bu değerler birbirine oldukça yakındır. Orta model ise optimizasyon yapılmadan önce ortalama olarak belirlenen σ uygulanmış olduğu DERT’den elde edilen bulgulardır. Çizelge 6 incelendiğinde, optimal model, ortalama modele göre DERT’in C_p performansını %16.03 geliştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca yine optimal modele sahip DERT’in, σ optimizasyonu yapılmamış olan geleneksel DERT’e ($C_p=0.313$ at 2.62 TSR) göre C_p performansını %9.96 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5. Güç katsayısı için S/N oranı

Seviye	Türbin kanat sayısı (N)	Kanat veter uzunluğu (V)	Türbin çapı (D) (m)
1	-10.354	-10.788	-12.021
2	-10.494	-10.952	-10.971
3	-11.855	-10.964	-9.711
Değişim	1.501	0.176	2.310
Etki Sırası	2	3	1

Çizelge 6. C_p için ortalama ve optimal parametrelerin tahmini ve sayısal sonuçları

	Ortalama	Optimal parametre	
	parametre değerleri	Tahmini	Sayısal
Seviye	A2B2C2	A1B1C3	A1B1C3
$C_{p,max}$	0.296611	0.346522	0.344187
S N / oranı (dB)	-10,6148	-9,05097	-9.26411
S/N oranı performans artışı	1.35069 dB		
Tahmini hata (dB)	0.21314		



Şekil 6. Her seviyenin her bir faktörü için S/N oranı değerleri

4.2 Varyans analizi (ANOVA)

Bu bölüme kadar, Taguchi metodu yöntemiyle faktör ve seviyeleri kullanarak DERT'in optimal performansı elde edilmiştir. ANOVA yöntemi, sonucun üzerinde birden fazla değişkenin etkisi olduğu durumlarda kullanılır. ANOVA amaç fonksiyonunda belirlenmiş olan faktörlerin, DERT performansına olan katkı miktarlarının belirlenmesini sağlamaktadır. Yüzelik katkı miktarı (YKM), Eşitlik 8. gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. Çizelge 7'de 3 faktörün DERT üzerindeki katkı miktarları gösterilmiştir. DERT'in performansı üzerindeki majör etkiyi %62.11 ile D, en az etki ise %1.73 ile v faktörlerinde olduğunu tespit edilmiştir. N'nin ise etkisi %30.86 olarak elde edilmiştir. Ek olarak, hata miktarı değeri %8.75 olarak elde edilmiş ki bu değer oldukça düşük olup literatürde kabul edilebilir seviyededir (Çakıroğlu ve ark., 2023).

$$\%YKM = \frac{(SS_A - (v_e)(v_A))}{SS_T} * 100 \quad (8)$$

Çizelge 7. C_p için ANOVA sonuçları

Kaynak	DF	Seq SS	Adj MS	F	P	YKM(%)
N	2	4.1247	2.06234	15.1	0.062	30.86
v	2	0.0578	0.02891	0.21	0.825	1.73
D	2	8.0247	4.01237	29.38	0.033	62.11
Mutlak Hata	2	0.2731	0.13655			8.75
Toplam	8	12.4803				91.25

4.3 Korelasyon ve Doğrulama Testi

Korelasyon, Regresyon analizi (RA) sayesinde amaç fonksiyonundaki N, v ve D parametrelerine bağlı olarak oluşturulan lineer denklem ile C_p performansını geliştirilmesi sağlamaktır. Eşitlik 9. de C_p ile amaç fonksiyonu faktörleri arasındaki ilişki gösterilmiştir. Eşitlik 10. da korelasyon denklemiyle, amaç fonksiyonundaki faktör ve seviyeler ile oluşturulacak tüm modellerin analitik olarak çözümüne imkân sağlamaktadır. Doğrulama testinde elde edilen C_p değerleri, eğitim verisi ve test verisi olmak üzere iki parçaya ayrılmıştır. Eşitlik 10. da korelasyon denklemi için, doğrulama testi uygulanabilmesi için Çizelge 3'deki ortogonal dizaynda modellerinin tamamı dahil edilmeden eğitilmiştir. 9 sayısal denemenin 6'sı eğitim verisi olarak seçilip, korelasyon

denklemleri oluşturulmasında kullanılmıştır. Diğer 3 model ise test verisi olarak seçilip, Eşitlik 10. daki korelasyon denkleminde uygulanarak doğrulama testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil. 7’de, RA’yla oluşturulan Eşitlik 10. daki korelasyon denkleminde elde edilen eğitim verisi ve test verisi değerleri gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde RA analiziyle elde edilen eğitim ve test verileri birbirlerine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir.

RA, eğitim ve test verisi olmak üzere iki aşamada yapılmıştır. İstatistiksel analiz çözümünün doğruluğunu denetlemek için eğitim verisi ve test verisi arasındaki hata miktarının belirlenmesini gerekmektedir. Eşitlik 11. ve 12. sırasıyla mutlak yüzdellik değişimi (R^2) ve istatistiksel hata miktarı (İHM) ifadeleri tanımlanmıştır (Çakıroğlu ve ark., 2023). R^2 1’e, İHM ise 0’a yakın bir değer olması çalışmanın yüksek güvenilirlikte olduğunu göstermektedir. Çizelge 8’de RA’dan elde edilen eğitim verisi ve test verilerinin istatistiksel analizleri gösterilmiştir. Sonuçlar incelediğimizde hem eğitim hem de test verisinin R^2 değerleri sırasıyla 0.995697 ve 0.971835, İHM değerlerinin ise sırasıyla 0.000296 ve 0.001187 olduğu görülmektedir. Bu değerler, nümerik çalışmanın, RA ile arasındaki güvenilirliği doğrular niteliktedir.

$$\eta_1 = C_p = f_1(N, c, D) \quad (9)$$

C_p için korelasyon denklemi

$$\eta_1 = 0.2528 - 0.02169(N) - 0.00507(v) + 0.04302(D) \quad (10)$$

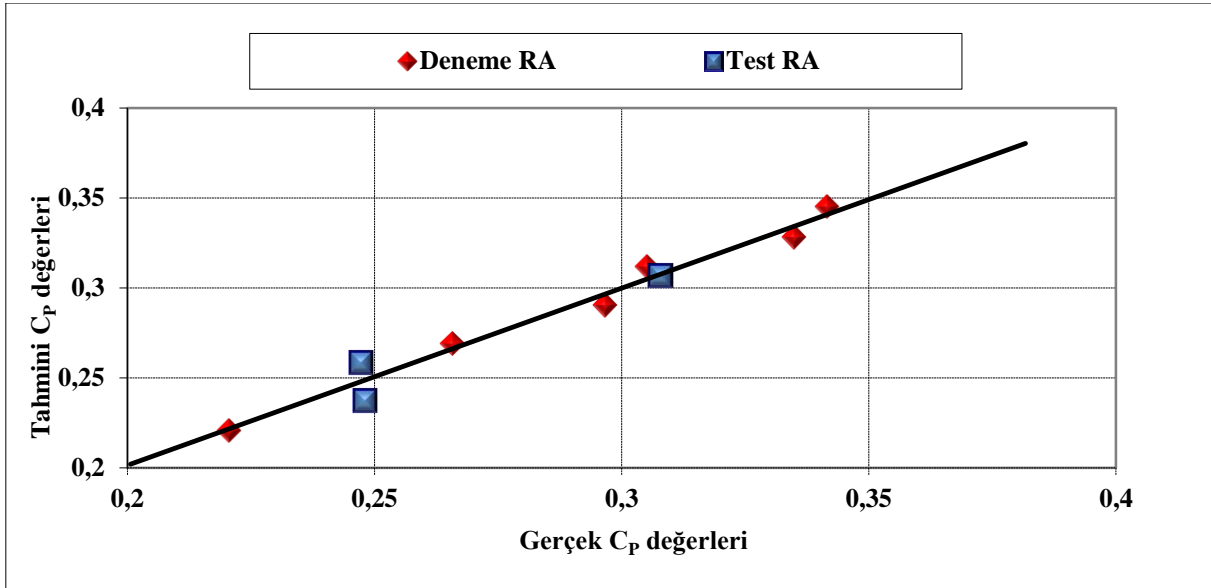
$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^N o_i^2} \right) \quad (11)$$

$$\dot{I}HM = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - o_i)^2}{o_i} \right)^{0.5} \quad (12)$$

Çizelge 8. Regresyon analizinin istatistiksel sonuçları

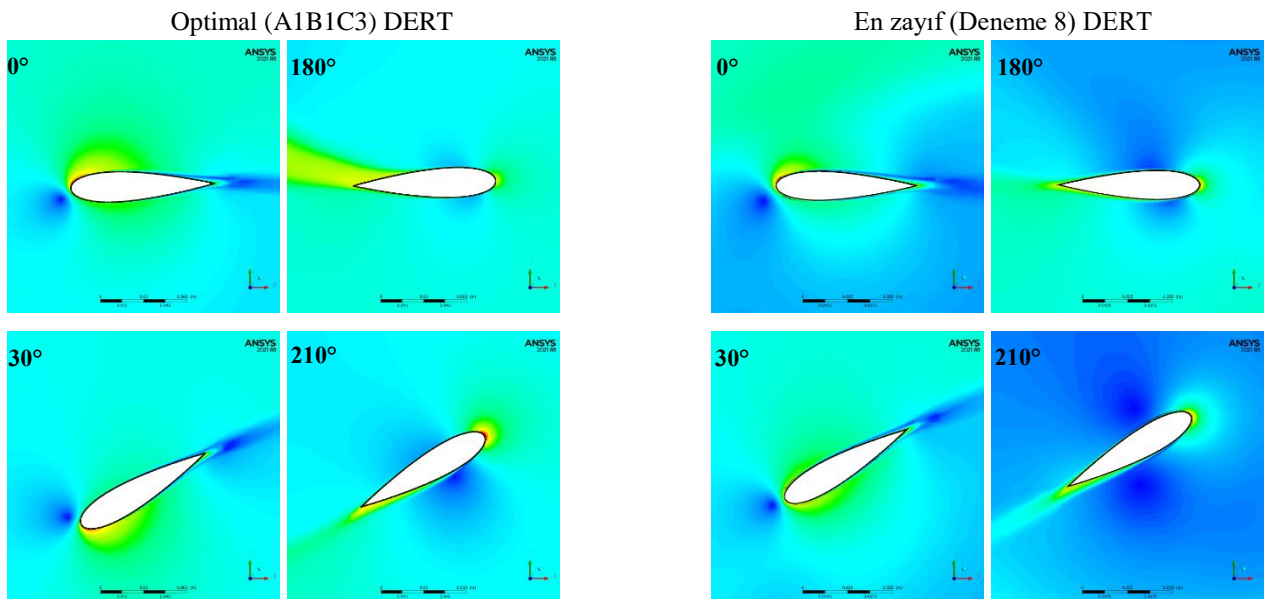
	RA	
	İHM	R^2
Eğitim	0.000296	0.995697
Test	0.001187	0.971835

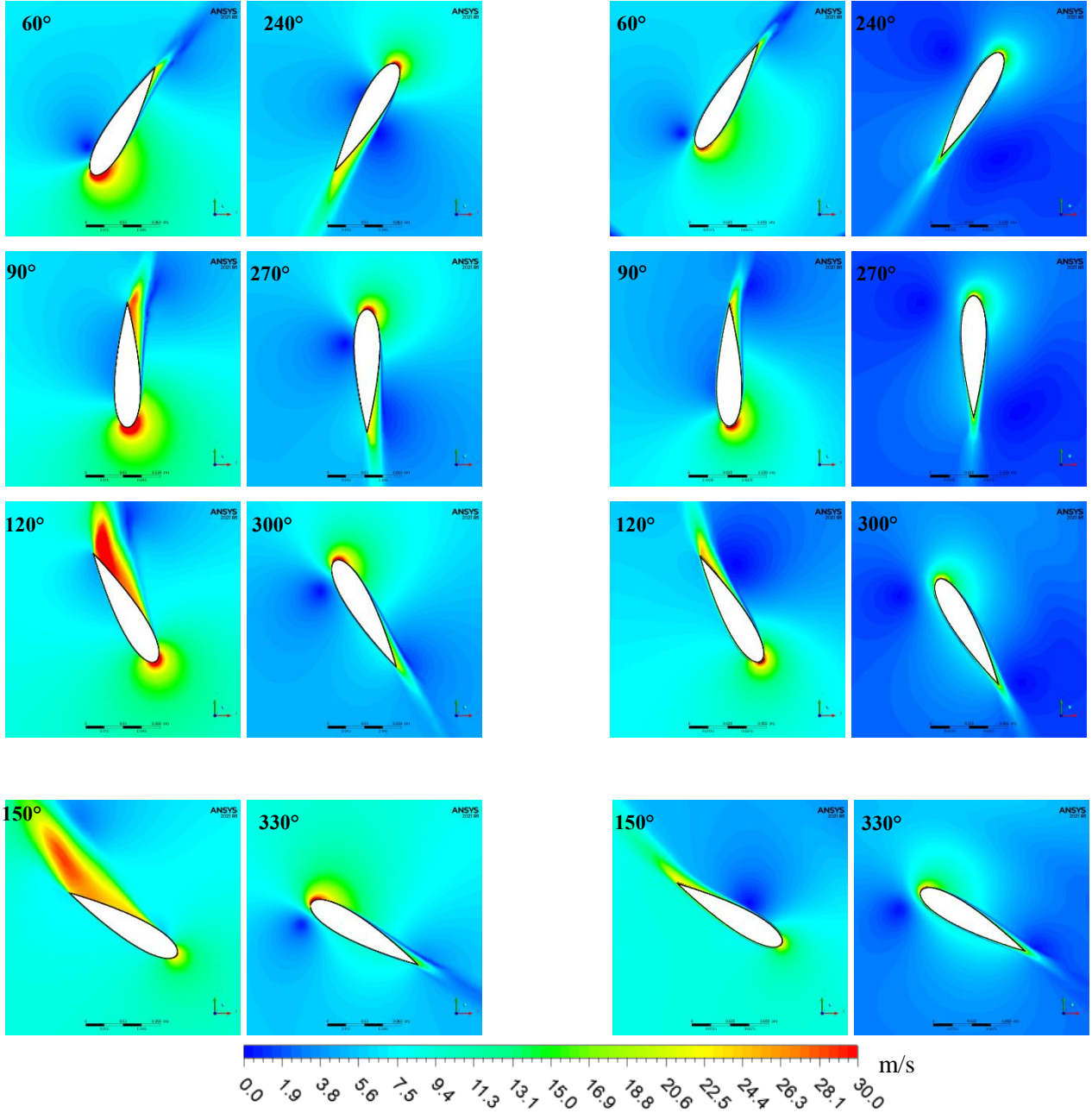
Genel olarak değerlendirildiğinde, literatürde çalışmalarda σ ’yı oluşturan N, v ve D parametrelerinin DERT’in C_p performansı üzerindeki etkisi ayrı ayrı incelemiştirlerdir. Bu çalışmada literatürden farklı olarak σ ’yı oluşturan parametrelerin tamamının C_p performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca σ ’yı oluşturan her bir parametrenin C_p performansını ne oranda etkilediği tespit edilmiştir. Ek olarak σ ’yı oluşturan tüm parametreler ve bu parametrelerin her bir seviyesini kapsayan sayısal analizler çok yüksek hesaplama süreleri oluşturmaktadır. Bu çalışmada, Taguchi metodu ile belirli bir algoritma tabanında geleneksel yöntemlere göre çok daha az sayısal deneme ile optimal model ve σ ’yı oluşturan parametrelerin performansa olan katkı değerleri belirlenmesi sağlanmıştır.



Şekil 7. σ optimizasyonu yapılmış DERT modellerinin C_p açısından RA ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

σ 'nın DERT performansı üzerinde etkisini fiziksel olarak anlamak ve aerodinamik açıdan da doğrulamak için anlık hız dağılım değerleri hesaplanmıştır. Şekil 8'da bir tam tur boyunca en düşük (Deneme 8) ile optimal DERT'in her bir kanadı için 30° azimut açısı aralığında hız dağılımları gösterilmiştir. Tüm azimut açılarında optimal modelin, deneme 8 modeline göre kanadın alt ve üst yüzeyindeki hız dağılım farklı belirgin şekilde daha yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle akışın kanat yüzeyine çarpma açısından kaynaklı en yüksek T'nin üretildiği $60-120^\circ$ azimut açılarında, optimal modelin kanat yüzeyinde kırmızı renk ile tanımlanmış olan yüksek hızlar gözlemlenirken, deneme 8 modelinde yüksek hız değerlerine oldukça sınırlı alanlarda ulaşıldığı tespit edilmiştir. Bu durum iki kanat arasındaki T ve buna bağlı olarak oluşan güç katsayısı farkını kanıtlar niteliktedir.





Şekil 8. Bir tam tur boyunca 30° azimut açısı aralığında tek bir türbin kanadının optimal ile deneme 8 DERT modellerinin anlık hız dağılımları

5. SONUÇ

Çeşitli σ konfigürasyonlarının DERT'in akış davranışı ve güç performansı üzerindeki etkileri, HAD ticari yazılımı olan ANSYS Fluent paket programı kullanılarak sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. N, v ve D parametrelerini içeren σ 'yı kullanarak, DERT'in performansının optimal olması için Taguchi optimizasyon yönteminden faydalanılmıştır. Geleneksel DERT'in maksimum C_p değerinin 2.62λ olmasının nedeniyle L_9 ortogonal dizisindeki tüm sayısal çalışmalar bu λ değerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadaki önemli bulgular şu şekilde çizilmiştir:

- Taguchi methodu, DERT'in güç performansı üzerinde dikkate değer bir değişiklik sağlamasından dolayı, σ optimizasyonunda oldukça etkili bir yöntem olduğu tespit edilmiştir.

- Optimum parametreler $N=2$, $v=60$ mm, $D=1.2$ m ile A1B1C3 modelinde gerçekleşmiştir. Optimum σ parametrelerine sahip DERT modeli, geleneksel DERT'e göre performansı %9.96 geliştirmiştir.
- ANOVA sonuçlarına göre, DERT'in güç performansı üzerinde en majör etki %62.11 ile D faktöründe, en az etki ise %1.73 ile v faktöründe gerçekleşmiştir.
- İstatiksel yöntem ile test ve eğitim verilerinin R^2 değerleri sırasıyla 0.995697 ve 0.971835 elde edilmiştir ki bu da analizin oldukça doğru olduğunu kanıtlamaktadır.

6. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

7. KAYNAKLAR

- Abu-El-Yazied T.G., Ali A.M., Al-Ajmi M.S, Hassan M.I., Effect of number of blades and blade chord length on the performance of Darrieus wind turbine. *Journal of Mechanical Engineering and Automation* 2(1), 16-25, 2015.
- Athreya S., Venkatesh Y.D., Application of taguchi method for optimization of process parameters in improving the surface roughness of lathe facing operation. *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)* 1(3), 9-13, 2012.
- Balduzzi F., Bianchini A., Maleci R., Ferrara G., Ferrari L., Critical issues in the CFD simulation of darrieus wind turbines. *Renewable Energy* 85, 419-435, 2016.
- Bedon G., Castelli M.R., Benini E., Evaluation of the effect of rotor solidity on the performance of a H-Darrieus turbine adopting a blade element-momentum algorithm. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering* 6(9), 1989-1194, 2012.
- Bhutta M.M.A, Hayat N., Farooq A.U., Ali Z., Jamil S.R., Hussain Z. Vertical Axis Wind Turbine – A Review of Various Configurations and Design Techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(4), 1926-1939, 2012.
- Castelli M.R., Betta S.D., Benini E., Effect of blade number on a straight-bladed Vertical-Axis Darrieus wind turbine. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 61, 305-11, 2012.
- Castelli M.R., Englaro A., Benini E., The Darrieus wind turbine: Proposal for a new performance prediction model based on CFD. *Energy* 36(8), 4919-4934, 2011.
- Chen W.H., Chen C.Y., Huang C.Y., Hwang C.J., Power output analysis and optimization of two straight-bladed vertical-axis wind turbines. *Applied Energy* 185, 223-232, 2017.
- Çakıroğlu, R., Tanürün, H.E., Acır, A., Üçgül, F., Olkun, S., Optimization of NACA 4412 augmented with a gurney flap by using grey relational analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 45(3), 167, 2023.
- Dar'oczy L., Janiga G., Petrasch K., Webner M., Th'evenin D. Comparative analysis of turbulence models for the aerodynamic simulation of H-Darrieus rotors. *Energy* 90(1), 680-690, 2015.

- Delafin P.L., Nishino T., Wang L., Kolios A., Effect of the number of blades and solidity on the performance of a vertical axis wind turbine, *The Science of Making Torque from Wind (TORQUE 2016)*, 753(2), October 4-7, 2016, pp. 1-8, Munich, Germany.
- Du L., Ingram G., Dominy R.G., A review of H-Darrieus wind turbine aerodynamic research. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 233(23-24), 7590-7616, 2019.
- Elkhoury M., Kiwata T., Aoun E., Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 139, 111–123, 2015.
- Evran, S., Yıldır S.Z. Numerical and Statistical Aerodynamic Performance Analysis of NACA0009 and NACA4415 Airfoils. *Journal of Polytechnic*, 1-1, (2023). (Early view)
- Hao W., Bashir M., Li C., Sun C., Flow control for high-solidity vertical axis wind turbine based on adaptive flap. *Energy Conversion and Management* 249, 114845, 2021.
- Hassanpour M., Azadani L.N., Aerodynamic optimization of the configuration of a pair of vertical axis wind turbines. *Energy Conversion and Management* 238, 114069, 2021.
- Howell R., Qin N., Edwards J., Durrani N., Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Renewable Energy* 35(2), 412-422, 2010.
- Hu Y., Rao S.S., Robust design of horizontal axis wind turbines using taguchi method. *Journal of Mechanical Design* 133(11), 111009, 2011.
- Jiang Z.C, Doi Y., Zhang S.Y., Numerical investigation on the flow and power of small-sized multi-bladed straight Darrieus wind turbine. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A* 8(9), 1414-1421, 2007.
- Jones W.P., Launder B.E. The calculation of low-Reynolds-number phenomena with a two-equation model of turbulence. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 16(6), 1119–1130, 1973.
- Joo S., Choi H., Lee J., Aerodynamic characteristics of two-bladed H-Darrieus at various solidities and rotating speeds. *Energy* 90, 439-451, 2015.
- Kaya A.F., Tanürün H.E., Acır A., Numerical investigation of radius dependent solidity effect on H-type vertical axis wind turbines. *Journal Of Polytechnic* 25(3), 1007-1019, 2022.
- Kaya, A.F., Investigation of a Rib Structure Effect on the Aerodynamic Performance of a Plain Flapped Symmetrical Airfoil. *Journal of Polytechnic* 1-1, 2023. (Early view)
- Lee Y.T., Lim H.C., Numerical study of the aerodynamic performance of a 500 W Darrieus-type vertical-axis wind turbine. *Renewable Energy* 83, 407-415, 2015.
- Li Q., Maeda T., Kamada Y., Murata J., Furukawa K., Yamamoto M., Effect of number of blades on aerodynamic forces on a straight-bladed vertical axis wind turbine, *Energy* 90(1), 784-795, 2015.
- Li S., Li Y., Numerical study on the performance effect of solidity on the straight-bladed vertical axis wind turbine. 2010 Asia-Pacific power and energy engineering conference (IEEE), March 28-31, 2010, pp. 1-4, Chengdu, China.
- Liang C., Xi D., Zhang S., Yang Q., Effects of Solidity on Aerodynamic Performance of H-Type Vertical Axis Wind Turbine. 2nd International Symposium on Resource Exploration and Environmental Science 170(4), 042061, April 28-29, Ordos, China, 2018.
- Liu, S., Ong M.C., Obhrai C., Gatin I., Vukcevic V., Influences of free surface jump conditions and different $k-\omega$ SST turbulence models on breaking wave modelling. *Ocean Engineering* 217, 107746, 2020.

- Parra T., Uzarraga C., Gallegos A., Castro F., Influence of solidity on vertical Axis wind turbines. *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers* 3(3),215-207, 2015.
- Qasemi K., Azadani L.N., Optimization of the power output of a vertical axis wind turbine augmented with a flat plate deflector. *Energy* 202:117745, 2020.
- Roh S.C., Kang S.H., Effects of a blade profile, the Reynolds number, and the solidity on the performance of a straight bladed vertical axis wind turbine. *Journal of Mechanical Science and Technology* 27(11), 3299-3307, 2013.
- Sengupta, A.R., Biswas, A., Gupta, R., Studies of some high solidity symmetrical and unsymmetrical blade H-Darrieus rotors with respect to starting characteristics, dynamic performances and flow physics in low wind streams. *Renewable Energy* 93:536-547, 2016.
- Şahin İ., Acir, A., Numerical and experimental investigations of lift and drag performances of NACA 0015 wind turbine airfoil. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 3: 22-25, (2015).
- Tangler J.L., The evolution of rotor and blade design. Presented at the American Wind Energy Association WindPower 2000 April 30-May 4, 2000, California.
- Tanürün H.E, Acır A., Modifiye edilmiş NACA-0015 kanat yapısında tüberkül etkisinin sayısal analizi, *Politeknik Dergisi* 22(1), 185-195, 2019.
- Tanürün H.E., Acır A., Investigation of the hydrogen production potential of the H-Darrieus turbines combined with various wind-lens. *International Journal of Hydrogen Energy* 47(55), 23118-23138, 2022.
- Tanürün H.E., Ata İ., Canlı M.E., Acır A., Farklı Açıklık Oranlarındaki NACA-0018 Rüzgâr Türbini Kanat Modeli Performansının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi, *Politeknik Dergisi* 23(2), 371-381, 2020.
- Tanürün, H.E., Akın A.G., Acır A., Rüzgâr Türbinlerinde Kiriş Yapısının Performansa Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi, *Politeknik Dergisi* 24(3), 1219-1226, 2021.
- Wang L., Tan A.C.C., Cholette M., Gu Y., Comparison of the effectiveness of analytical wake models for wind farm with constant and variable hub heights. *Energy Conversion and Management* 124:189-202, 2016.
- Wang Z., Ozbay A., Tian W., Hu H., An Experimental study on the aerodynamic performances and wake characteristics of an innovative dual-rotor wind turbine. *Energy* 147, 94-109, 2018.
- Wang Z., Tian W., Hu H., A comparative study on the aeromechanic performances of upwind and downwind horizontal-axis wind turbines. *Energy Conversion and Management* 163, 100–110, 2018.
- Wang Z., Wang Y., Zhuanga M., Improvement of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines with leading-edge serrations and helical blades using CFD and Taguchi method. *Energy Conversion and Management* 177, 107-121, 2018.
- Wilcox D.C., Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)* 26(11), 1299–1310, 1998.
- Zuo W., Wang X., Kang S., Numerical simulations on the wake effect of H-type vertical axis wind turbines. *Energy* 106, 691–700, 2016.