

**TANDEM YERLEŞTİRİLMİŞ RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE GÜÇ ÜRETİMİ  
OPTİMİZASYONU: TAGUCHİ DENEY TASARIMI YAKLAŐIMI**  
POWER GENERATION OPTIMIZATION IN TANDEM-ARRANGED WIND TURBINES:  
A TAGUCHI DESIGN APPROACH

**Oğuzhan CARUS**

Yüksek Lisans Öğrencisi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği  
Ana Bilim Dalı, Bilecik, Türkiye  
**ORCID NO:** 0009-0001-0431-8097

**Gülcan ÖZEL EROL**

Dr. Öğr. Üyesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,  
Bilecik, Türkiye  
**ORCID NO:** 0000-0003-2054-6767

**Musa ÖZKAN**

Doç. Dr., Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik,  
Türkiye  
**ORCID NO:** 0000-0002-1322-3276

**ÖZET**

Bu çalışma, bir rüzgar çiftliği formasyonunda elde edilen toplam gücün, türbinlerin yerleşimleri ve sapma açılarıyla etkileşimini incelemek için Taguchi tabanlı bir optimizasyon modeli önermektedir. Kurgulanan rüzgar çiftliğinde rüzgar hızı, Türkiye'nin Bandırma bölgesinde, 100 m yükseklikteki ortalama rüzgar verilerine dayanarak tek yönlü ve sabit olarak ele alınmıştır. Numerik analizler için açık kaynak kodlu ve aero-servo-elastik çözücü OpenFAST'in rüzgar çiftliği modülü Fast.FARM kullanılarak, tandem yerleşimli üç türbinden oluşan bir rüzgar çiftliği modeli oluşturulmuştur. Bu modelde, türbin yerleşim parametrelerinin toplam güç üretimine etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda, optimizasyon kapsamında yerleşim parametreleri, a) aşağı akış türbinlerinin birbirleri arasındaki mesafenin rotor çapı cinsinden 3D, 4D ve 5D olarak belirlenmesi ve b) her türbin için sapma açılarının  $-20^\circ$  ile  $20^\circ$  arasında,  $5^\circ$ 'lik artışlarla değiştirilmesi şeklinde ele alınmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Tasarlanan çiftlik düzeninde, yukarı akış yönündeki ilk türbininin konumu sabittir. Aşağı akış türbinlerinin konumuna dayalı olarak tanımlanan mesafe değişkeni 2 faktörde 3 seviyeye, sapma açısı değişimi ise tüm türbinlere uygulandığından 3 faktörde 9 seviyeye sahiptir. Tüm parametreler dikkate alınarak bu parametrelerin etkileşimini içeren ve 81 farklı senaryodan oluşan bir Deney Tasarımı (DOE) oluşturulmuştur. En küçük kareler yöntemi kullanılarak analiz sonuçlarına bir matematiksel model uyarlanmıştır. Bu modelin tahminine dayanarak en iyi dizilim konfigürasyonu analiz edildiğinde, türbinlerin toplamda

7.55 MW güç ürettiği ve bu değerin deney tasarımındaki diğer sonuçlardan daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** OpenFAST, Rüzgar Çiftliği, Taguchi Metodu, Yerleşim Optimizasyonu

## ABSTRACT

This study proposes a Taguchi-based optimization model to investigate the interaction between turbine layout and yaw angles on the total power performance of a wind farm. The designed wind farm assumes a unidirectional and constant wind speed, based on the average wind data at a height of 100 meters in the Bandırma region of Türkiye. For numerical analysis, a wind farm model with a tandem arrangement of three turbines was created using Fast.FARM which is a wind farm module in the open-source aero-servo-elastic solver OpenFAST. The impact of turbine placement parameters on total power generation was examined within this model. As a part of the optimization, placement parameters included a) the downstream turbines' spacing, defined as 3D, 4D, and 5D in terms of rotor diameter, and b) the yaw angles of each turbine, which varied between  $-20^\circ$  and  $20^\circ$  in increments of  $5^\circ$ . In the designed farm layout, the position of the upstream turbine was fixed. The spacing parameter, defined based on the downstream turbines' positions, was considered at three levels across two factors, while yaw angle variations were applied to all turbines, resulting in three factors at nine levels. Considering all parameters, a Design of Experiments (DOE) approach consisting of 81 different cases was conducted to examine their interaction. A mathematical model was then formulated based on the analysis results using the least squares method. According to the model's predictions, the optimal sequencing configuration resulted in a total power output of 7.55 MW, surpassing all other results obtained in the experimental design.

**Keywords:** OpenFAST, Wind Farm, Taguchi Method, Layout Optimization

## GİRİŞ

Rüzgar türbinleri, rüzgarın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmek için kullanılır. Genellikle atmosferik sınır tabaka içerisinde, daimi akış koşulları altında çalışan aerodinamik sistemlerdir. Bu bağlamda türbin geometrik yapısının ve karakteristik özelliklerinin aerodinamik etkileri göz önünde bulundurularak incelenmesi gerekmektedir (Stoevesandt vd., 2022). Herhangi bir cismin, bir akışkan ortam içerisindeki hareketi esnasında aerodinamik şekline bağlı olarak, akış yönünde bir art izi bölgesi oluşur (Akçadırcı, 2006). Bu durum, belirli bir lokasyonda sınırlandırılmış rüzgar türbini gruplarından oluşan rüzgar çiftlikleri üzerinde olumsuz bir etki yaratır. Aşağı akış (downstream) türbinleri, yukarı akış (upstream) türbinlerinin oluşturduğu art izine maruz kalır. Bu negatif etkinin başlıca nedenleri, serbest daimi akışa kıyasla art izi bölgesindeki rüzgar hızında düşüş gözlemlenmesi ve art izinde

oluşan ek türbülans (wake added turbulence) yapısıdır. Art izindeki hız düşüşü, yukarı akış türbin akışkanının sahip olduğu kinetik enerjiyi çekmesinden kaynaklanır. Türbülanslı yapı ise, yukarı akış türbininin aerodinamik şekli itibariyle akış alanında sebep olduğu kararsız girdapların, kısa bir süre içinde bozularak türbülans şiddetini arttırmasıdır. Ayrıca, serbest akış ile art izi bölgesi arasındaki hız farkı, kayma tabakası oluşumuna neden olur. Kayma tabakası bir ara bölge oluşturur ve bu bölgede hız gradyanı büyüktür. Yüksek hızlı serbest akıştan düşük hızlı art izine kinetik enerji transferi gerçekleşir ve bu art izindeki rüzgarı hızlandırır. Hızlanan art izi karışımı tetikler. Bu süreç türbülansın artmasına ve art izinin genişlemesine yol açar (Sandese ve Benjamin, 2009; Neunaber vd., 2020). Rüzgardaki mevcut güç, rüzgar hızının küpü ile orantılı olduğundan hızdaki küçük bir artış/azalış, güç üretimini büyük ölçüde artırabilir/azaltabilir. Bu nedenle art izinin oluşumu, yayılması ve dağılması mekanizmalarındaki küçük iyileştirmeler, aşağı akıştaki türbinin güç üretimi üzerinde büyük bir etki yaratabilir. Bu sebeple türbin çiftliklerinde performansın arttırılması için optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulur. Türbinler arası mesafe ve türbin sapma açısı art izinin aşağı akış yönündeki türbinler ile olan etkileşimlerini belirleyerek rüzgar çiftliğinin genel performansını şekillendirir (Xiaolei vd., 2012).

Rüzgar türbinlerinde sapma açısı kontrolü ile yukarı akış türbininde oluşan art izi farklı doğrultulara yönlendirilebilir. Türbinlerin maksimum güç üretebilmeleri için rotor diskinin daimi akışa dik olması gerekir. Türbine bir sapma açısı verilmesi, türbinin maruz kalacağı rüzgar hızının türbine dik doğrultudaki bileşenini azaltacağı için güç üretimi azalacaktır. Buna karşın, yukarı akış türbininden kaynaklanan art izinin farklı doğrultularda yayılımı, aşağı akış türbininin maruz kaldığı olumsuz art izi etkilerini azaltarak, aşağı akış türbinleri için güç üretimini arttırabilir. Türbinler, aerodinamik olarak rüzgar yönüne dik yerleştirildikleri duruma göre tasarlandıkları için bu durumda rüzgara karşı oluşturdukları blokaj minimumdur. Sapma açısındaki değişim ile blokaj etkileri artar ve aerodinamik kuvvetlerdeki değişimler sebebiyle türbin üzerindeki yapısal yükler olumsuz etkilenir (Damiani vd., 2018). Bu sebeple sapma açılarındaki değişimin genellikle  $\pm 30^\circ$  ile sınırlı kalması istenir. Dolayısıyla, toplam güç üretimini arttırmak ve yapısal yükleri en aza indirmek için sapma açısının optimize edilmesi gerekir (Nash vd., 2021).

Bastankhaha vd. (2019) tarafından yapılan deneysel çalışmada, üç kanatlı küçük ölçekli türbinler kullanılarak rüzgar tüneline tandem sıralanmış beş farklı türbin için sapma açılarının  $0^\circ$  ile  $35^\circ$  arasında değiştirildiği senaryolar değerlendirilmiştir. Bu senaryolar kapsamında, sapma açısındaki artışın sonucunda %0.5 ila %17 arasında güç artışı sağladığı gözlemlenmiştir. Bir başka çalışmada Lei vd. (2020) sapma açısı optimizasyonunun etkinliğinin, türbinler arasındaki mesafeye bağlı olduğunu belirlemiş ve türbinler arası aksel mesafenin daha kısa olması durumunda sapma açısı ayarlamalarının daha fazla güç kazancı sağlayabileceğini saptamıştır. Zong vd. (2021) sapma açısının güç üretimi üzerindeki etkilerini, sabit sıra aralığı ile yerleştirilmiş türbinlerde incelemiş ve aktif sapma kontrolünün

güç artışını %15.7'ye kadar çıkarabileceğini, ayrıca yıllık enerji üretiminde %1.8'lik bir iyileşme sağlayabileceğini ortaya koymuştur.

Türbinler arasındaki mesafenin belirlenmesinde, enerji üretimi ile arazi kullanımı dengesi etkilidir. Kısa mesafeler güç kaybına, uzun mesafeler ise yerleşim alanının verimsiz kullanımına yol açar. Akış yönündeki mesafe değişimleri, yanlamasına (spanwise) değişimlere kıyasla güç üretimini daha fazla etkiler (Stevens vd., 2016). Belirli rüzgar yönlerinde hizalanmış türbinlerin oluşturduğu kara temelli rüzgar çiftliği dizilimlerinde, aşağı akış yönündeki türbin mesafesi rotor çapı cinsinden 3D-5D aralığında olduğunda art izi etkisini yitirirken (Yang vd., 2012), yan rüzgar (crosswind) mesafesi daha kısa tutulabilmektedir (Sun vd., 2019). Hoxha vd. (2022) yerleşim optimizasyonu kapsamında, Priştine yakınlarındaki dağlık bir alan olan Koznica'da 3.4 MW gücündeki türbinler için uzunluk olarak 2D, 3D ve 5D uzunluk mesafelerini temel alarak çalışmalar gerçekleştirmiş ve optimum güç üretiminin sağlanması için en az 3D mesafenin gerekli olduğunu vurgulamıştır. Choi vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada, 2 MW'lık türbinleri içeren bir rüzgar çiftliğinde, türbinler arası mesafe 3D olduğunda aşağı akış türbininin güç çıkışı yukarı akış türbininin yalnızca %35'i kadar olduğu saptanmıştır. Ayrıca mesafenin 5D'ye çıkarılmasıyla güç çıkış oranının %60'a ulaştığı, bunun sonucunda önemli bir iyileşme sağlandığı ve art izi etkilerinde azalma gözlemlendiği belirlenmiştir. Bartl vd. (2012) 3D ve 5D'lik iki farklı mesafeyi incelemiş ve 5D'lik mesafede güç çıkışında nispeten daha fazla iyileşme sağlandığı, ayrıca art izi bölgesinde türbülans yoğunluğunun azaldığını tespit etmiştir. Ali vd. (2018), farklı türbin aralıklarının güç üretimi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla bir rüzgar tüneli deneyi gerçekleştirmiştir. Deney sonuçlarına göre, türbin mesafesi akış yönünde 6D'den 3D'ye düşürüldüğünde güç üretiminde %33, 3D'den 1.5D'ye düşürüldüğünde ise %22 oranında azalma gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, Bandırma bölgesi için 100 m yükseklikteki ortalama rüzgar hızı referans alındı. Bu rüzgar değeri simülasyon içerisinde sabit rüzgar hızı olarak tanımlanarak tandem sıralanmış üç türbin arasındaki mesafe değişimi ve sapma açılarındaki değişimin toplam güç çıktısı üzerindeki etkisi incelendi. Sistemin çoklu konfigürasyonları için bir deney tasarımı uygulandı. Taguchi deney tasarımı ile önerilen 81 farklı senaryo sonuçları OpenFAST açık kaynaklı rüzgar türbini simülasyon aracı ile elde edildi. Bu sonuçlara en küçük kareler yöntemi ile matematiksel bir model tanımlanarak, optimum güç çıktısı sağlayacak parametreler önerildi ve değerlendirildi.

## YÖNTEM

### Sayısal Model

Bu çalışmada incelenen rüzgar türbinlerinin aerodinamik analizleri, NREL (National Renewable Energy Laboratory) tarafından geliştirilen ve FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence) yazılımının geliştirilmiş bir sürümü olan OpenFAST açık kaynak kodlu simülasyon aracı ile yürütülmüştür. Bu simülasyon aracında analizler, birbirine bağlı

olan alt modüller ile gerçekleştirilmektedir. FAST'ın modüler arayüzü ve bağlayıcı sistemi ise tüm modellerin birbirine bağlanması için kullanılmaktadır. AeroDyn, aerodinamik analiz yazılımıdır ve rüzgar türbinleri için detaylı aerodinamik hesaplamalar yapmak amacıyla kullanılan bir modüldür (Jonkman vd., 2015). Bu modül, art izi çözümü için kanat elemanı momentum teorisi (BEMT) ve genelleştirilmiş dinamik art izi teorisi kullanabilmektedir. ServoDyn, kontrol ve aktüatör (servo) modelleme modülüdür. Rüzgar türbinlerinin kontrol sistemlerini, jeneratörlerini ve aktüatörlerini simüle etmek için kullanılır. ElastoDyn, kanatları düz ve izotropik kirişler olarak modelleyip Euler-Bernoulli kiriş teorisini temel alırken doğrudan diferansiyel denklemler çözmek yerine modal analiz yaklaşımını kullanmaktadır (Jonkman vd., 2005). FAST.Farm, rüzgar çiftliklerindeki türbinlerin güç performanslarını ve oluşan yapısal yükleri öngörmek amacıyla geliştirilmiş bir mühendislik aracıdır. Bireysel türbinlerin aero-servo-hidro-elastik dinamiklerinin çözümünde OpenFAST kullanırken, atmosferik sınır tabakadaki rüzgar alanı ile rüzgarın tüm çiftliğe yayılımını ve türbinlerle etkileşimini dikkate alır. Ayrıca art izi etkilerini, adveksiyonunu, saptırılmasını, dolambaçlı hareketini (wake meandering) ve art izi birleşimlerini de işleme katmaktadır. FAST.Farm dinamik art izi dolambaçlı hareketi (Dynamic Wake Meandering -DWM) ilkelerine göre tasarlanmıştır (Jonkman ve Shaler, 2021). OpenFAST, türbini aktüatör disk olarak ele alarak kanat elemanı momentum teorisini (BEMT) kullanır ve yerel aerodinamik kuvvetleri hesaplar. BEMT modeli üç boyutlu etkileri içermese de uç, kök ve eğrilik düzeltmelerini içerir. FAST.Farm, bu aerodinamik verileri temel alarak art izi etkileşimlerini analiz eder ve ardışık sıralanmış türbinlerde yalnızca yukarı akış türbininin art izi etkisini dikkate alır. Ayrıca, art izi genişlemesi, sapması ve dolambacını üç boyutlu çözüm yerine basitleştirilmiş modellerle temsil ederek hesaplamaları gerçekleştirir.

## DENEY TASARIMI

Genichi Taguchi tarafından önerilen Taguchi metodu, çok faktörlü durumlar için kullanılan ve istatistiksel bir teknik olan Deney Tasarım (DOE) yönteminin uygulamalara yönelik bir formudur (Roy, 2001). Taguchi yöntemi, az sayıda deneyle birden fazla değişkenin etkisini analiz etmek için ortogonal dizilerden faydalanır ve bu sayede geleneksel deney tasarım yöntemlerine göre daha verimli bir çözüm sunar (Türkmen vd., 2008). Taguchi yöntemi, süreç parametrelerinin etkisini analiz etmek amacıyla, hem ortalamayı hem de değişkenliği göz önünde bulunduran sinyal-gürültü (S/N) oranı adı verilen istatistiksel bir performans metriği kullanır. Bu oran, ortalamanın (sinyal) standart sapmaya (gürültü) bölünmesiyle elde edilir ve optimize edilecek sistemin kalite kriterlerine göre belirlenir. Yaygın olarak kullanılan S/N oranları arasında N tipi (nominal the better), L tipi (larger the better) ve S tipi (smaller the better) yöntemleri bulunur (Ghosh vd., 2017; Kumsal, 1994). Bu üç tip yöntem şu şekilde formüle edilir:

$$L \text{ tipi: } \eta_L = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right)$$

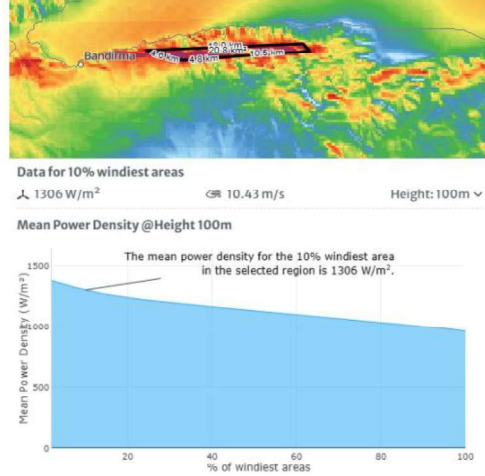
$$S \text{ tipi: } \eta_S = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right)$$

$$N \text{ tipi: } \eta_N = -10 \log \left( \frac{\bar{y}_i}{s^2} \right)$$

Burada  $\eta_L, \eta_S$  ve  $\eta_N$  performans istatistikleridir,  $n$  deneysel kombinasyon için yapılan tekrar sayısı ve  $Y_i$  ise deneyin performans değeridir. Nominal performans istatistiğinde kullanılan  $\bar{y}_i$  ve  $s^2$  terimleri sırasıyla ölçümlerin ortalamasını ve varyansını ifade etmektedir. Bu çalışmada, tandem yerleştirilmiş rüzgar türbinlerinden elde edilen toplam gücün en yüksek olması hedeflendiği için larger the better (L tipi) yani en büyük en iyi kriteri kullanılmıştır.

### Rüzgar Çiftliği Bölge Seçimi

Türkiye’de kuvvetli rüzgar alan ve yıllık ortalaması yüksek olan Bandırma bölgesinden seçilen konuma ait (Bknz Şekil 1) ortalama rüzgar hızı baz alınarak çalışma gerçekleştirilmiştir. TÜREB 2022 Enerji İstatistik Raporuna göre (TUREB, 2022) Bandırma ilinde 4 adet Rüzgar Enerji Santrali (RES) bulunmaktadır ve bunların 3 tanesi bu çalışmada seçilen bölgede yer almaktadır. Seçilen bölgede 100 m’deki ortalama rüzgar hızı değeri 10.4 m/s’ye ulaşmakla birlikte bölgede aktif olarak çalışan RES gücü yıllık 267.7 MW değerine ulaşmaktadır.

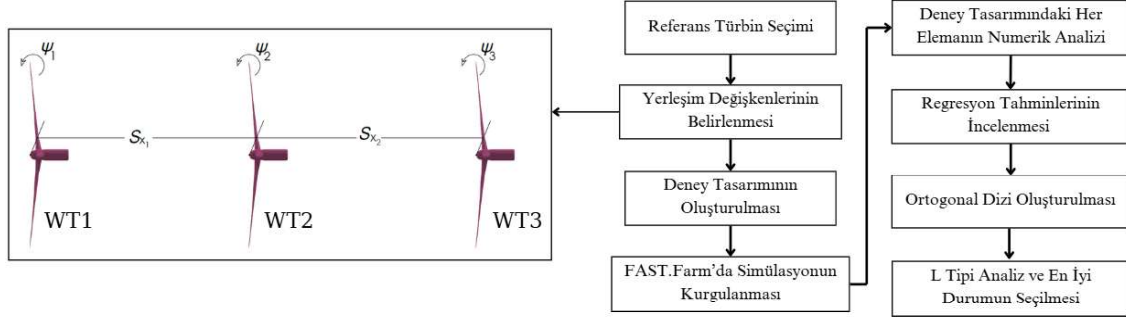


Şekil 19. Bandırma bölgesinde 100m yükseklikteki ortalama rüzgar değeri (Global Wind Atlas, 2024)

### OPTİMİZASYON METODOLOJİSİ

Rüzgar çiftliği analizine dair optimizasyon aşamaları Şekil 2’de gösterilmektedir. Referans türbini olarak NREL 5MW seçilmiştir. Bu model nominal rüzgar hızı 11.4 m/s olan ve çalışma koşullarını 3-25 m/s rüzgar hızları arasında gerçekleştiren, anma gücü 5 MW olan, 3 kanatlı kara-deniz temelli olarak tasarlanmış bir referans modeldir. Modele ait temel özellikler Tablo-1’de listelenmiştir. Bu çalışmada akış yönünde türbinler arası mesafe değerleri  $S_{x_1}$  ve

$S_{x_2}$  için rotor çapı cinsinden 3D, 4D ve 5D mesafeleri konfigürasyonlarda dikkate alınacaktır. Türbinler için tanımlanan sapma açısı değerleri, yukarı akış yönündeki türbin indisi 1 olacak şekilde sırasıyla  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  ve  $\psi_3$ 'dir. Bu sapma açıları, pozitif yön saat yönü tersi olacak şekilde,  $-20^\circ$ 'den  $20^\circ$ 'ye  $5^\circ$ lik adım aralıklarıyla değiştirilerek simülasyonlar gerçekleştirilecektir. Modele ait faktörler ve sahip olduğu seviyeler Tablo-2'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Optimizasyon aşamaları

**Tablo 1.** NREL 5MW referans türbinine ait temel özellikler (Jonkman vd., 2009)

	Maks. Anma gücü	5 MW
Genel Tanım	Rotor konfigürasyonu	3 kanat
	Rotor çapı	126 m
	Göbek (Hub) yüksekliği	90 m
	Başlama, anma, durma rüzgar hızları	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
	Başlama, anma rotor hızları	6.9 rpm, 12.1 rpm
	Uzunluk	61.5 m
Kanat (LM 61.5 P)	Kanat Profilleri	Cylinder1-Cylinder2- DU40_A17- DU35_A17- DU30_A17- DU25_A17- DU21_A17- NACA64_A17

**Tablo 2.** Deneysel tasarımda yer alan faktörler ve seviyeleri

Faktörler	Sembol	Seviye								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. ve 2. Türbin Mesafesi	$S_{x_1}$	3D	4D	5D						
2. ve 3. Türbin Mesafesi	$S_{x_2}$	3D	4D	5D						
1. Türbin Sapma Açısı	$\psi_1$	$-20^\circ$	$-15^\circ$	$-10^\circ$	$-5^\circ$	$0^\circ$	$5^\circ$	$10^\circ$	$15^\circ$	$20^\circ$
2. Türbin Sapma Açısı	$\psi_2$	$-20^\circ$	$-15^\circ$	$-10^\circ$	$-5^\circ$	$0^\circ$	$5^\circ$	$10^\circ$	$15^\circ$	$20^\circ$
3. Türbin Sapma Açısı	$\psi_3$	$-20^\circ$	$-15^\circ$	$-10^\circ$	$-5^\circ$	$0^\circ$	$5^\circ$	$10^\circ$	$15^\circ$	$20^\circ$

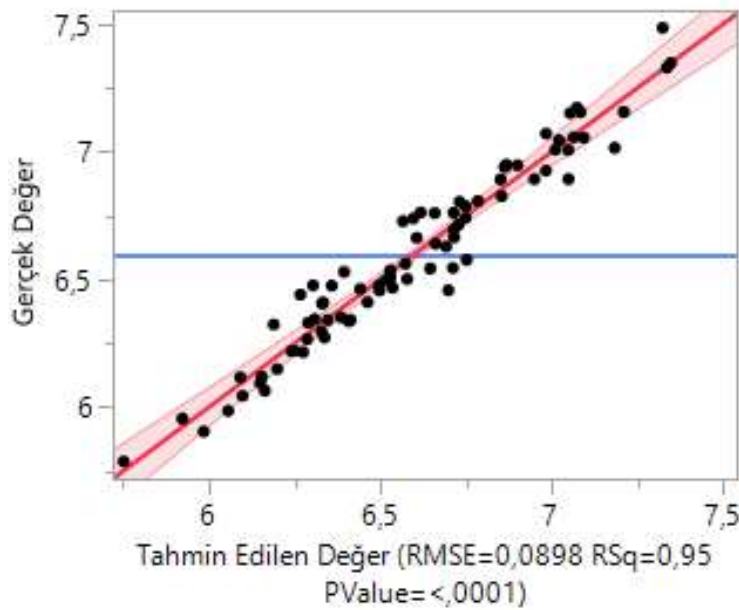
## BULGULAR VE TARTIŞMA

Tüm değişkenler düşünüldüğünde tam faktöriyel deney tasarımı ele alınamayacağı için bu değişken etkileşimleri incelenecek şekilde 81 farklı durumdan oluşan Deney Tasarımı (DOE) oluşturulmuştur. Deney tasarımında oluşan durum için analiz, IEC 61400 standardında bir türbinin kısa vadeli simülasyonu için belirlenen 600 saniye simülasyon süresi ele alınarak analizler yürütülmüştür. NREL 5 MW rüzgar türbini tekil olarak analizi gerçekleştirildiğinde 10.4 m/s'lik rüzgar hızında 3.78 MW'lık enerji üretmektedir.

Deney sonuçlarında bağımsız değişkenler (mesafe ve sapma açısı) ile bağımlı değişken (toplam güç çıktısı) arasındaki ilişkiyi tahmin etmek için en küçük kareler yöntemine dayalı lineer regresyon modeli oluşturulmuştur. Bu model belirli koşullar için elde edilen verilerden genel bir matematiksel model çıkararak farklı senaryolar için tahmin yapma olanağı sunar. Şekil 3'de deneye ait gerçek ve tahmin edilen değerlerin kıyası görülmektedir. Model %95'lik bir  $R^2$  değerine sahiptir. Bu durum modelin bağımlı değişkendeki değişimin %95'ini açıkladığı (determination coefficient) anlamına gelmektedir. RMSE (Root Mean Square Error) değeri, hataların ortalama karekökünü ifade eder ve şekle bakıldığında değer 0'a yakınsaması nedeniyle modelin tahmin değerlerinin gerçek değere oldukça yakın olduğu söylenebilir.

**Tablo 3.** Deney tasarımında yer alan ve total gücün en yüksek olduğu 3 sonuç

Case	$S_{X_1}$	$S_{X_2}$	$\psi_1$	$\psi_2$	$\psi_3$	WT1 (MW)	WT2 (MW)	WT3 (MW)	TOTAL (MW)
43	5D	5D	20°	20°	-10°	3.165	1.81	2.51	7.485
56	5D	5D	-5°	15°	10°	3.782	1.578	1.969	7.329
65	5D	5D	20°	-10°	-5°	3.165	2.237	1.945	7.347

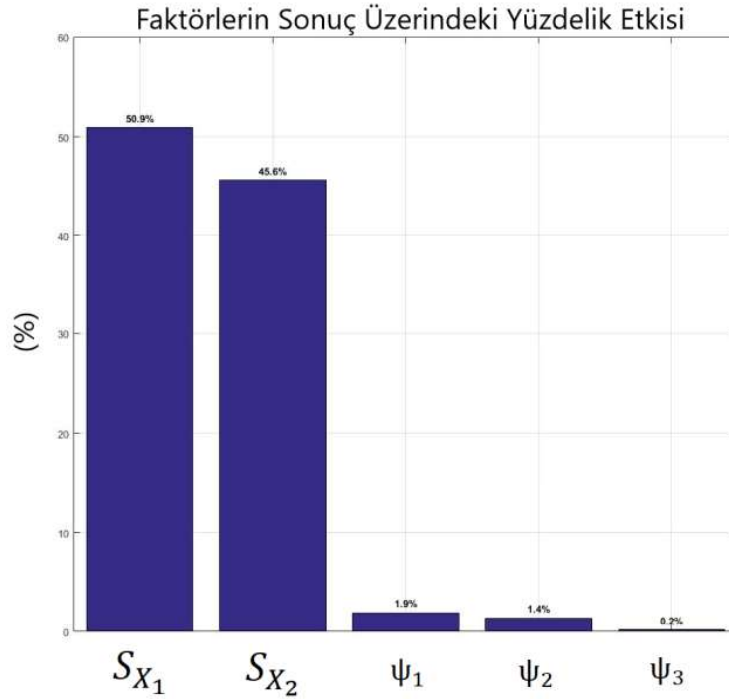


**Şekil 3.** Modele ait tahmin performansı

Modeldeki faktörlerin etkilerini incelemek ve konfigürasyondaki değişkenlerin davranışını anlamak için *Sum of Squares* (SS) yöntemi kullanılabilir. Bu yöntem modelde yer alan faktörler için sayısal bir değer sunarak model üzerindeki yüzdellik etkisinin hesaplanmasına yardımcı olur. Üç seviyeli bir değişken için SS'in hesaplanması şu şekilde ifade edilir (Funkenbusch, 2004):

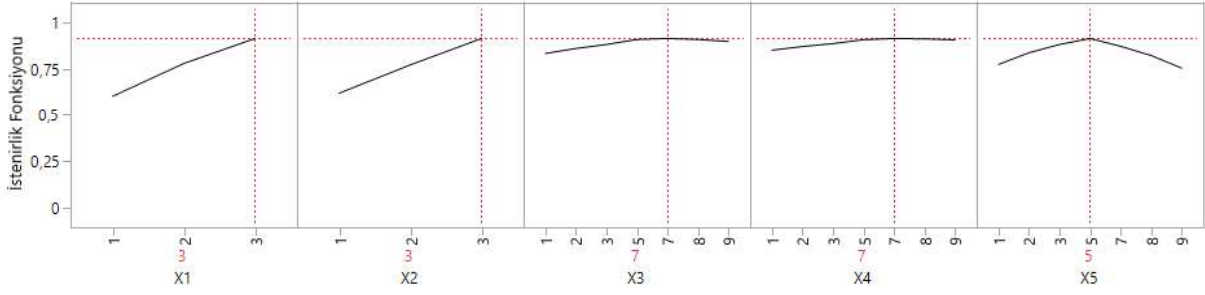
$$SS = n_{-1}(m_{-1} - m^*)^2 + n_0(m_0 - m^*)^2 + n_{+1}(m_{+1} - m^*)^2$$

Burada  $n_{-1}$ ,  $n_0$  ve  $n_{+1}$  her seviyede bulunan gözlem sayılarını ifade eder. Bu seviyelerdeki ortalama yanıt değerleri ise  $m_{-1}$ ,  $m_0$  ve  $m_{+1}$  ile ifade edilmektedir. Tüm gözlemlerin genel ortalaması ise  $m^*$  olarak ifade edilir. Şekil 4'te ise SS sonucunda modele ait faktörlerin, sonuca etkileri yüzdellik olarak verilmektedir. Bu şekilden yola çıkarak şunlar söylenebilir;  $S_{X_1}$  ve  $S_{X_2}$  güç üretimindeki etkisi sırasıyla %50.9 ve %45.6'lık değere sahipken dizilimde yer alan üçüncü türbinin sapma açısındaki değişim  $\psi_3$ , modelde yalnızca %0,2'lik bir etkiye sahiptir. Bu değer oldukça küçük olmakla birlikte deney tasarımının iyileştirilmesi adına modelden çıkarılabilir.



Şekil 4. Deney tasarımındaki faktörlerin güç çıktısı üzerindeki yüzdellik etkileri

Regresyon sonucunda ise faktörlerin sahip olduğu seviyelerin toplam güç tahmini Şekil 5'te tahmin profilleri olarak gösterilmektedir. Sonuçlar, regresyon modelinde maksimizasyon hedeflenerek tahmin edilmiş ve sonucunda bir model önerisi oluşturmuştur. İstenirlik fonksiyonunda her faktör için değer 1 olması en iyi konfigürasyonu modellemektedir ve şekil üzerinde önerilen konfigürasyon modeli 1 değerine yakınsamaktadır. Bu konfigürasyon sonucu değerlendirilirse toplam güç çıktısı 7.51 MW olarak bulunmuştur fakat bu konfigürasyonun ideal koşulu temsil etmediği açıktır.

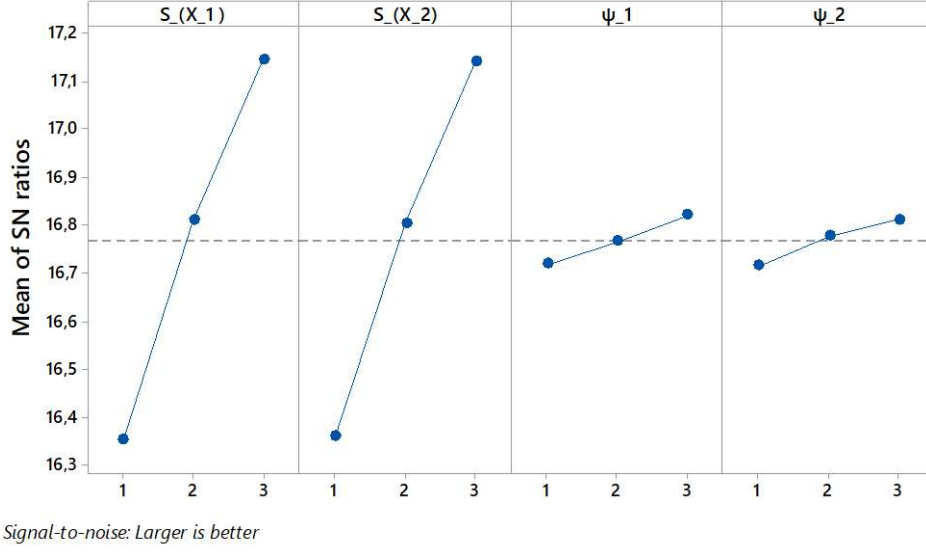


Şekil 5. Regresyon tahmin profili

Şekil 5'ten yola çıkarak faktör sayısı ve sapma açısı seviyesi, bir ortogonal dizi oluşturmak için sayıca indirgenebilir. Türbinler arası mesafe faktör ve seviyeleri sabit tutularak oluşturulan tasarım Tablo 4'te verilmiştir. Üçüncü türbinin sapma açısı değeri  $0^\circ$ 'de sabit bırakılmıştır. İlk iki türbin için ise olasılık değeri en yüksek üç değer olan  $0^\circ$ ,  $10^\circ$  ve  $15^\circ$  alınmıştır. Bu bağlamda en iyi sonucun bulunması için  $L_9 (3^4)$  ortogonal dizisi önerilmektedir. Ortogonal dizi için L tipi analiz çözümüne ait SN grafiği Şekil 6'da verilmiştir.  $S_{X_1}$  ve  $S_{X_2}$  faktörlerinin büyük eğime sahip olması sonuç üzerindeki etkisinin yüksek olduğunu ve  $\psi_1$  ve  $\psi_2$  faktörlerinin etkisinin mesafeye kıyasla düşük olduğu bilgisine ulaşılmaktadır. Bu bilgilerden yola çıkarak sistem için optimal konfigürasyon durumu bütün faktörlerin üçüncü seviyelerinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde 7.55 MW'lık toplam güç çıktısına ulaşılmıştır.

Tablo 4.  $L_9$  Ortogonal dizisi

Faktörler	Sembol	Seviye		
		1	2	3
1. ve 2. Türbin Mesafesi	$S_{X_1}$	3D	4D	5D
2. ve 3. Türbin Mesafesi	$S_{X_2}$	3D	4D	5D
1. Türbin Sapma Açısı	$\psi_1$	$0^\circ$	$10^\circ$	$15^\circ$
2. Türbin Sapma Açısı	$\psi_2$	$0^\circ$	$10^\circ$	$15^\circ$



Şekil 6. L9 Ortogonal diziyeye ait SN oranları

## SONUÇ

Bu çalışma, Bandırma bölgesi rüzgar hız değerini baz alarak tandem yerleşimli 3 türbinden oluşan rüzgar çiftliği modeli önermiştir. Çiftlik güç üretimini etkileyen mesafe parametreleri ve türbin sapma açı değerleri model faktörleri olarak ele alınarak optimal tasarım için bir çalışma sunulmuştur. Çiftlik modeli için başlangıçta 81 farklı senaryodan oluşan Deneysel Tasarımı oluşturulup her senaryo için toplam güç çıktısı değerlendirilerek, faktörlerin model üzerindeki etkisi regresyon tahmin sonuçlarıyla incelenmiştir. Türbin mesafelerindeki değişimin model üzerinde büyük bir etki oluşturduğu, sapma açıların ise etki değerlerinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. Deneysel Tasarımın iyileştirilmesi adına ilk iki türbinde en yüksek sonucu veren  $0^\circ$ ,  $10^\circ$  ve  $15^\circ$  lik sapma açıları değerlendirilmiş ve üçüncü türbin sapma açısı  $0^\circ$  de sabit bırakılmıştır. Oluşturulan bu deneysel tasarımı doğrultusunda en iyi durumun bulunması için L9 ortogonal dizisi önerilmiştir. Ortogonal dizideki senaryo çıktıları ele alınarak L tipi Taguchi yöntemi kullanılmış ve optimal değer bulunması için SN grafiği elde edilmiştir. Çiftlik modelinde en yüksek güç çıktısı, türbinler arası mesafenin 5D ve ilk iki türbinin sapma açısının  $15^\circ$  olduğu durumda 7.55 MW olarak elde edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Akçadircı, E. (2006). Dairesel silindir etrafındaki akım parametrelerinin deneysel olarak incelenmesi Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye
- Ali, N., Hamilton, N., DeLucia, D., & Bayoán Cal, R. (2018). Assessing spacing impact on coherent features in a wind turbine array boundary layer. *Wind Energy Science*, 3, 43–56.
- Bartl, J., Pierella, F., & Sætrana, L. (2012). Wake measurements behind an array of two model wind turbines. *Energy Procedia*, 24, 305-312.

- Choi, N. J., Nam, S. H., Jeong, J. H., & Kim, K. C. (2013). Numerical study on the horizontal axis turbines arrangement in a wind farm: Effect of separation distance on the turbine aerodynamic power output. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 117, 11-17.
- Damiani, R., Dana, S., Annoni, J., Fleming, P., Roadman, J., van Dam, J., & Dykes, K. (2018). Assessment of wind turbine component loads under yaw-offset conditions. *Wind Energy Science*, 3(1), 173-189.
- Dou, B., Qu, T., Lei, L., & Zeng, P. (2020). Optimization of wind turbine yaw angles in a wind farm using a three-dimensional yawed wake model. *Energy*, 209, 118415.
- Freddi, A., & Salmon, M. (2018). Introduction to the Taguchi Method. *Design Principles and Methodologies*, 159–180.
- Funkenbusch, P. D. (2004). *Practical guide to designed experiments: a unified modular approach*. CRC Press.
- Ghosh, N., Pal, P. K., & Nandi, G. (2017). GMAW dissimilar welding of AISI 409 ferritic stainless steel to AISI 316L austenitic stainless steel by using AISI 308 filler wire. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(4), 1334-1341.
- Global Wind Atlas, Wind resource map: Balıkesir, Turkey [Erişim tarihi: Ocak 2025, <https://globalwindatlas.info/en/area/Turkey/Balikesir>]
- Hoxha, B., Shesho, I. K., & Filkoski, R. V. (2022). Analysis of Wind Turbine Distances Using a Novel Techno-Spatial Approach in Complex Wind Farm Terrains. *Sustainability*, 14(20), 13688.
- Jonkman, J. M., & Buhl, M. L. Jr. (2005). FAST user's guide (NREL/TP-500-38230). National Renewable Energy Laboratory.
- Jonkman, J. (2009). "Definition of a 5-mw nrel reference wind turbine for offshore system development," Tech. Rep. NREL/TP-500-38060. National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- Jonkman, J. M., Hayman, G. J., Jonkman, B. J., Damiani, R. R., & Murray, R. E. (2015). *AeroDyn v15 user's guide and theory Manual*. NREL: Golden, CO, USA.
- Jonkman, J., & Shaler, K. (2021). FAST.Farm user's guide and theory manual (Technical Report No. NREL/TP-5000-78485). National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., & Scott, G. (2009). Definition of a 5-MW NREL reference wind turbine for offshore system development (Tech. Rep. NREL/TP-500-38060). National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- Kumsal, H. (1994). Taguchi Metodu İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü. Türkiye Majid Bastankhah, & Porté-Agel, F. (2019). Wind farm power optimization via yaw angle control: A wind tunnel study. *J. Renewable Sustainable Energy*, 11(2), 023301.
- Nash, R., Nouri, R., & Vassel-Be-Hagh, A. (2021). Wind turbine wake control strategies: A review and concept proposal. *Energy Conversion and Management*, 245, 114581.

- Neunaber, I., Hölling, M., Stevens, R. J. A. M., Schepers, G., & Peinke, J. (2020). Distinct Turbulent Regions in the Wake of a Wind Turbine and Their Inflow-Dependent Locations: The Creation of a Wake Map. *Energies*, 13(20), 5392.
- Roy, R. K. (2001). *Design of experiments using the Taguchi approach*. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Sanderse, B. (2009). *Aerodynamics of wind turbine wakes Literature review*.
- Stevens, R. J. A. M., Gayme, D. F., & Meneveau, C. (2016). Effects of turbine spacing on the power output of extended wind-farms. *Wind Energy*, 19, 359–370.
- Stoevesandt, B., Schepers, G., Sun, Y., & Fuglsang, P. (2022). The Issue of Aerodynamics in Wind Energy. In Stoevesandt, B., Schepers, G., Fuglsang, P., & Sun, Y. (Eds.), *Handbook of Wind Energy Aerodynamics*. Springer, Cham.
- Sun, H., Yang, H., & Gao, X. (2019). Investigation into spacing restriction and layout optimization of wind farm with multiple types of wind turbines. *Energy*, 168, 637-650.
- TUREB, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, Türkiye rüzgar enerjisi istatistik raporu, Temmuz 2022.
- Türkmen, İ., Gül, R., & Çelik, C. (2008). A Taguchi approach for investigation of some physical properties of concrete produced from mineral admixtures. *Building and Environment*, 43(6), 1127–1137.
- Xiaolei Yang, Kang, S., & Sotiropoulos, F. (2012). Computational study and modeling of turbine spacing effects in infinite aligned wind farms. *Physics of Fluids*, 24(11), 115107.
- Zong, H., & Porté-Agel, F. (2021). Experimental investigation and analytical modelling of active yaw control for wind farm power optimization. *Renewable Energy*, 170, 1228–1244.