



ARAŞTIRMA MAKALESİ (Research Article)

**SANTRAL SINIR ŞEKLİNİN RÜZGÂR SANTRALİ KONUMLANDIRMA PROBLEMİNE
OLAN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Onur KOŞAR^{1,*}, M. Arif ÖZGÜR²

¹ Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, onur.kosar@dpu.edu.tr,
ORCID: 0000-0001-7335-7076

² Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, arif.ozgur@dpu.edu.tr,
ORCID: 0000-0001-5877-4293

Geliş Tarihi (Received Date):03.07.2018

Kabul Tarihi (Accepted Date):06.07.2018

ÖZ

Fosil kökenli yakıtların tükenebilir olması ve çevreye olan zararlı etkileri neticesinde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artış göstermektedir. Rüzgâr enerjisi teknolojisi, diğer yenilenebilir enerji teknolojilerine kıyasla daha düşük birim enerji maliyetleri sunması sebebi ile tüm dünyada hızla yaygınlaşmaktadır. Artan rüzgâr enerjisi talebi daha verimli santral düzenlerinin elde edilmesini tetiklemiştir. Birçok kısıtlama içeren bu karmaşık problemin çözümü üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Fakat santral sınır şeklinin optimizasyon sonuçlarına olan etkisine nadiren değinilmiştir. Bu sebeple, bu çalışmada uzun dönemli Kütahya rüzgar verisi temel alınarak oluşturulmuş bir rüzgar modeli için dört farklı sınır şeklinde (kare, dikdörtgen, daire ve düzensiz) optimizasyon hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Önemli tasarım parametrelerinin santral sınır şekline bağlı değişim oranları araştırılmıştır. En önemli tasarım parametreleri olan iz bölgesi verimi, enerji maliyeti, toplam maliyet ve yıllık enerji üretiminin santral sınır şeklinin değişimine olan hassasiyetlerinin %10'un altında olduğu gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: *Değişken türbin modeli, düzensiz sınır, rüzgâr enerjisi, rüzgâr santrali konumlandırma optimizasyonu*

**INVESTIGATION OF WIND FARM BORDER SHAPE EFFECT ON WIND FARM LAYOUT
PROBLEM**

ABSTRACT

Interest in renewable energy sources has been increasing due to the fossil-based sources being exhaustible and the harmful effects to the environment. Wind energy technology is spreading rapidly all over the world because it offers lower unit energy costs compared to other renewable energy technologies. Increasing wind energy has triggered the demand for more efficient wind farm layouts. A great number of research has been published for the solution of the complex optimization problem which has many limitations. However, the effect of the wind farm boundary shape on the results of optimization is rarely mentioned. For this reason, in this study, optimization calculations were carried

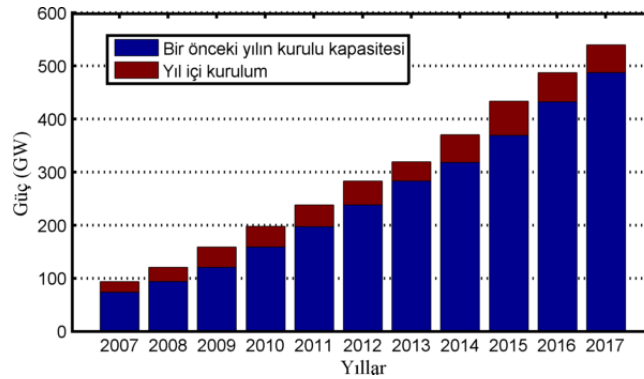
out for a wind model based on long-term Kütahya wind data and four different boundaries (square, rectangular, circle and irregular). The rate of change of important design parameters depending on the wind farm boundary shape has been investigated. It was observed that the most important design parameters such as the wake efficiency, energy cost, total cost and annual energy production are less than 10% against to the sensitivities to the change of the wind farm border shape.

Keywords: Variable turbine model, irregular boundary, wind energy, wind farm layout optimization

1. GİRİŞ

Küresel birincil enerji tüketimi, 2017 yılında, doğal gaz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının etkisiyle güçlü bir şekilde %2,2 oranında büyür iken kömürün enerji karışımındaki payı azalmaya devam etmiştir. 2014 ile 2016 arasındaki sifıra yakın artış değerlerinden farklı olarak, enerji tüketimi kaynaklı karbon salınımı %1,6 oranında artmıştır. Yenilenebilir güç santralleri %17'lik rekor büyüme ile on yıllık ortalamasının üzerinde bir artış göstermiştir. Rüzgâr enerjisi yatırımları bu büyümenin yarısından fazlasını sağlamıştır [1].

2016 yılında dünya genelinde 55 GW'lık rüzgâr güç santrali kurulumu gerçekleştirilmiştir. Bu değer, o zamanki küresel toplam kurulu güç değeri olan 487 GW değerinin %12'sine denktir. Bu eklemeler 2015'te görülen kurulum rekorunun (64 GW) %14 altındadır fakat bugüne kadarki en büyük ikinci orandır. 2016 yılı sonunda 90 ülkede ticari rüzgâr enerjisi yatırımları gözlemlenmiştir [2]. 2015 ve 2016 ile karşılaştırıldığında 2017 yılı nispeten daha zayıf bir yıl olarak kayıtlara geçmiştir. Buna rağmen 52 GW'lık yeni kurulum değeri ile en güçlü üçüncü yıl olmuştur. Çin daralmanın büyük bir kısmını oluştururken, Avrupa ve Hindistan da dâhil olmak üzere diğer birçok pazarda rekor kurulumlar gerçekleştirilmiştir [3]. Şekil 1 yıllara bağlı küresel rüzgâr enerjisi kurulu güç değişimini göstermektedir. Rüzgâr santrallerine olan ilginin artması ve rüzgâr santrali işletme şartları hakkında biriken bilgi birikimi neticesinde daha verimli santral düzenleri elde edilmesine odaklanan araştırmalar hız kazanmıştır.



Şekil 1. Küresel rüzgâr enerjisi kurulu güç değişimi [3].

1994 yılında Mosetti ve diğerleri [4], rüzgâr santralleri konumlandırma probleminin algoritma yardımı ile çözümlenmesi üzerine ilk çalışmayı yayınlamışlardır. Bu çalışmadan sonra yaklaşık 10 yıl kadar kayda değer bir çalışma yapılmamıştır. 2000'lerin başında yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin artması ve rüzgâr türbin teknolojisinin gelişmesi ile bu araştırma alanı birçok araştırmacının

ilgisini çekmiştir. Grady ve diğerleri [5], en yüksek üretim kapasitesi için rüzgâr türbinlerinin en uygun şekilde yerleştirilmesini sağlamak için bir tür genetik algoritma yaklaşımı uygulamışlardır. Emami ve Noghreh [6], rüzgâr santrali konumlandırma problemini, yeni bir kodlama ve genetik algoritma modelinin yeni bir amaç fonksiyonu ile çözmüşlerdir. Önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında, sonuçların belirgin bir şekilde iyileştirildiğini söylemişlerdir. Eroğlu ve Seçkiner [7], enerji çıkışı maksimize etmek için bir karınca kolonisi algoritması kullanmışlardır. Sonuçlarına göre, karınca kolonisi algoritması, enerji veriminin maksimum değerleri ve iz bölgesi kayıpları açısından, mevcut çalışmalara kıyasla iyi performans göstermiştir. Kusiak ve Song [8], rüzgâr enerjisi çıkarımını en üst düzeye çıkarmak için rüzgâr dağılımına dayalı rüzgâr türbini konumlandırma için bir model sunmuşlardır. Türbin konumlandırma tasarımı kısıtlı bir optimizasyon problemi olduğundan, çözüme kolaylığı sağlamak adına kısıtlamaları ikinci bir amaç fonksiyonuna dönüştürmüşlerdir. Pookpant ve Ongsakul [9], bir rüzgâr santralindeki rüzgâr türbinlerinin en iyi düzenine ulaşmak için, zamanla değişen hızlanma katsayıları ile iki terimli parçacık sürüşü optimizasyon modelini önermişlerdir. Bir rüzgâr santralindeki maksimum güç çıkışı minimum yatırım maliyeti ile yakalamayı amaçlamışlardır. Montoya ve diğerleri [10], farklı rüzgâr türbini modellerinin ve farklı zaman aralıklarına göre dağıtılan rüzgâr hızlarının kombinasyonunu içeren çok amaçlı evrimsel algoritmaların (MOEA) kullanımını araştırmışlardır. Gao ve diğerleri [11], rüzgâr türbini konumlandırma optimizasyonu için bir çoklu popülasyon genetik algoritması (MPGA) önermişlerdir. Algoritma modelleri minimum yatırım maliyetinde maksimum gücü elde etmeyi amaçlamıştır. Wang ve diğerleri [12], üç farklı ızgara koşulunu göz önünde bulundurarak, ızgara tabanlı yöntem ile sınırsız koordinat yönteminin bir karşılaştırmasını yapmışlardır. Pillai ve diğerleri [13], Danimarka'daki Middelgrunden rüzgâr çiftliği için bir rüzgâr santrali konumlandırma optimizasyonu uygulamışlardır. Middelgrunden rüzgâr santralindeki mevcut yerleşim planının maliyetini, enerji üretimini ve enerji düzeyini hesaplamak için geliştirilen değerlendirme aracının sonuçlarını, işletmecisi tarafından rapor edilen maliyet ve enerji üretimiyle karşılaştırmışlardır. Alana özel koşulları, kısıtlamaları ve gelecekteki projelerin tipik özelliklerini göz önünde bulundurarak, mevcut yerleşim planına kıyasla daha az enerji maliyetine sahip düzenlerin elde edilebileceğini söylemişlerdir. Bu çalışmalarda, araştırmacılar farklı algoritma modellerinin başarısını test etmişlerdir. Ayrıca karmaşık problem yapısı sebebi ile artan hesaplama sürelerini azaltacak yapılar önermişlerdir. Ayrıca yıllık enerji üretimi, iz bölgesi verimi, birim enerji maliyeti gibi önemli parametreleri içeren amaç fonksiyonları önermişlerdir. Fakat genellikle verilen sonuçların tek bir santral sınır şekli için elde edildiği görülmüştür. Bu sebeple sonuçların santral sınır şekline olan hassasiyetleri yeteri kadar bilinmemektedir. Bu amaçla, bu çalışmada oluşturulan rüzgâr santrali konumlandırma problemi, aynı yüz ölçümüne (4 km²) sahip dört farklı santral sınır şekli (kare, dikdörtgen, daire ve düzensiz) için aynı koşullar altında elitist genetik algoritma kullanılarak çözümlenmiştir. Önemli tasarım parametrelerinin değişimi irdelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Jensen İz Bölgesi Modeli

Jensen iz bölgesi modeli rüzgâr türbini iz bölgesi içinde bir kontrol hacme momentumun korunumu yasası uygulanması neticesinde türetilmiştir. Momentumun korunumu yasası türbin arkasında oluşan iz bölgesi yarıçapının aşağı-akım mesafesi ile doğrusal olarak genişlediğini belirtir. Jensen analitik modeli [14], iz bölgesi modelleri arasında en eski ve en basit modeldir ve kabul edilebilir hata oranları ile rüzgâr hızı bozukluklarını öngörebilir. Jensen tarafından önerilen bu model daha sonra [15,16] geliştirilmiştir. Jensen iz bölgesi modelinin şematik görünümü Şekil 2'de verilmektedir. Jensen iz bölgesi modelinde, iz bölgesinin doğrusal olarak genişlediği varsayılmıştır.

$$R_{w,ij} = R_i + \alpha y_{ij} \quad (1)$$

Burada α iz bölgesi genişleme katsayısını ifade eder ve bu çalışmada WASP yazılımının standart değeri olan 0,075 olarak alınmıştır. İ türbini varlığından ötürü oluşan iz bölgesinin j türbininde meydana getirdiği hız bozukluğu aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$DEF_{U,ij} = \frac{\left(\frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{\left(1 + \frac{\alpha y_{ij}}{R_i} \right)} \right) \left(\frac{A_{ij}}{A_j} \right)}{\left(\frac{A_{ij}}{A_j} \right)} \quad (2)$$

C_T rüzgâr hızına bağlı olarak değişen itki katsayısıdır. Dört adet Vestas türbininin itki katsayısı eğrileri kullanılarak rüzgâr hızına bağlı değişen bir itki katsayısı eğrisi uydurulmuştur (Şekil 2.b). Bir rüzgâr türbini üzerinde birden fazla türbinin iz bölgesi etkisi bulunabilir. Bunların bir bileşke değerini elde etmek için aşağıdaki formül kullanılır:

$$DEF_j = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_T-1} DEF_{U,ij}} \quad (3)$$

Son olarak j-türbin rotorunun önündeki hızı şöyle hesaplanır:

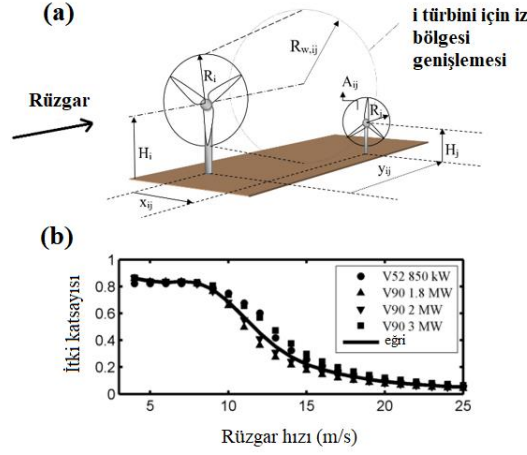
$$U_j = U_{\infty,j} (1 - DEF_j) \quad (4)$$

$U_{\infty,j}$ j türbinin göbek yüksekliği seviyesindeki serbest akış rüzgâr hızıdır ve aşağıdaki gibi referans ölçüm yüksekliği ve referans hız değeri temel alınarak hesaplanır:

$$U_{\infty,j} = U_{ref} \left(\frac{H_j}{H_{ref}} \right)^{0.143} \quad (5)$$

2.2. Santral Sınırı Modellemesi

Kare, dikdörtgen ve daire şekline sahip düzenli santral sınır şekillerinin tanımlanması oldukça kolay olduğu için literatürde yapılan çalışmalarda sıklıkla kullanılmışlardır. Fakat gerçekte karşılaşılan santral sınır şekilleri genellikle düzensizdirler. Düzensiz arazi yapısının harita ölçeğine uygun olarak tanımlanması ve bu sınır dışında kalan olası türbin konumlarının silinmesi gereklidir. Bu sebeple, bu çalışmada Gu ve Wang [17] tarafından önerilen metodoloji uygulanmıştır.



Şekil 2. (a) Jensen iz Bölgesi modelinin genel şeması (b) uydurulmuş itki katsayı eğrisi.

Seçilen düzensiz sınır, haritadaki diğer renklerden farklı bir renkle tanımlanmalıdır (Şekil 3.a). Burada Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Evliya Çelebi Kampüsü karşısında seçilen hayali sınır, seçilen bölgedeki yerleşim yerleri ve tarım alanları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Belirtilen renk ölçeği aralığında renkler içeren pikseller tespit edilir (Şekil 3.b). Bu piksellerin kenar noktalarını tanımlamak için Canny algoritması [18] olarak adlandırılan bir kenar algılama algoritması uygulanır (Şekil 3.c). Bu piksel köşelerinin birleştirilmesi neticesinde bir çokgen elde edilir. Kontur izleme ve kenar yumuşatma filtreleri, çokgen sınırdaki düzensizlikleri gidermek için uygulanır. Çokgen, piksel birimi ile Kartezyen koordinatlarına aktarılır (Şekil 3.d). Piksel biriminin uzunlukları harita ölçeği kullanılarak metreye dönüştürülür (Şekil 3.e). Poligon yaklaşımı algoritması [19], tespit edilen çokgenin ana karakteristiğini bozmadan uygulanabilir. Böylece, hayali düzensiz sınır, M-köşeli bir Q-çokgeni ile ifade edilir:

$$Q = [q_1, q_2, \dots, q_j, \dots, q_M, q_1] \quad (6)$$

Bir ışın kesişim yöntemi kullanılarak, belirlenen poligonun dışındaki olası türbin konumları silinir (Şekil 3.f). Işın kesişim yöntemi [20], belirlenen sınır poligonu ile olası konumlar arasındaki uzaysal ilişkiyi hesaplayabilmektedir. Tüm olası konumlar, bir konum vektörü Z ile tanımlanır:

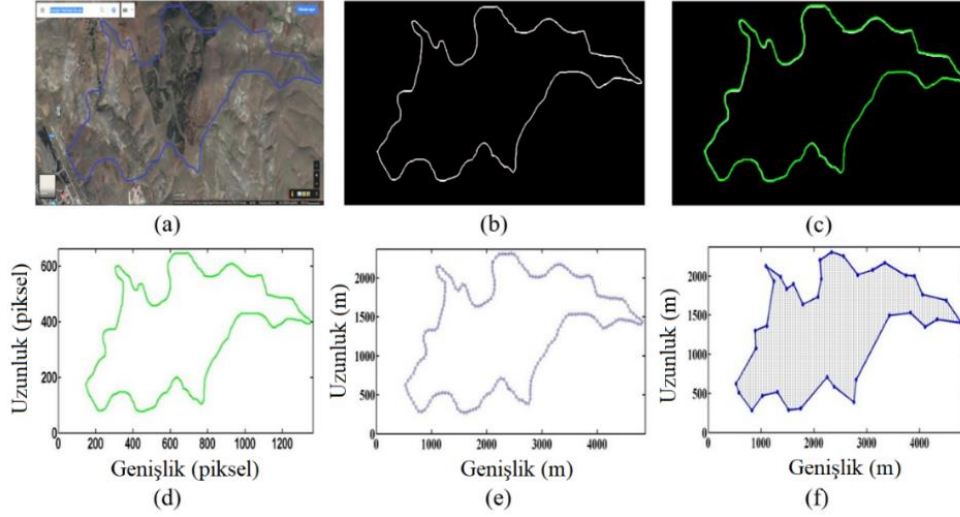
$$Z = [z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_{N_T}] = [(a_1, b_1), (a_2, b_2), \dots, (a_i, b_i), \dots, (a_{N_T}, b_{N_T})] \quad (7)$$

İlk olarak, olası bir z_i konumundan çizilen bir yarım çizgi ve j kenarı arasında bir kesişimin varlığı denetlenir. Bu yarım çizgi l_j ile gösterilir ve dikey, yatay veya eğik olarak çizilebilir. Yarım çizgi dikey olarak tanımlanmışsa, çizgi denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$x = a_i, \quad y \in [b_i, +\infty) \quad (8)$$

$$\varphi_j(x) = \frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j} (x - x_j) + y_j, \quad \begin{array}{l} \text{eger } x_j < x_{j+1} \quad x \in (x_j, x_{j+1}) \\ \text{eger } x_j > x_{j+1} \quad x \in (x_{j+1}, x_j) \end{array}$$

(9)



Şekil 3. Düzensiz santral sınırı işlem basamakları (a) Seçili bölgenin haritası (b) harita üzerinde belirtilen rengin tespit edilmesi (c) işaretli sınırın tespit edilen kenarları (d) kontur izleme (e) pikselden metreye geçiş (f) optimum poligon yaklaşımı ve olası türbin yerlerinin tespiti.

$x_j < x_{j+1}$ varsayımı altında, l_i ve j kenarı arasındaki kesişme sayısı şu denklem ile belirlenir:

$$\xi_j = \begin{cases} 1, & b_i < \varphi_j(a_i) \text{ ve } a_i \in (x_j, x_{j+1}) \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (10)$$

Eğer bir kesişme tespit edilirse, ξ_j 1 olarak, edilmez ise 0 olarak atanır. Böylece, olası türbin konumu z_i 'den çizilen yarım çizgi ve sınır poligonu Q arasındaki tüm kesişme noktalarının sayısı tanımlanır:

$$C(z_i, Q) = \sum_{j=1}^M \xi_j \quad (11)$$

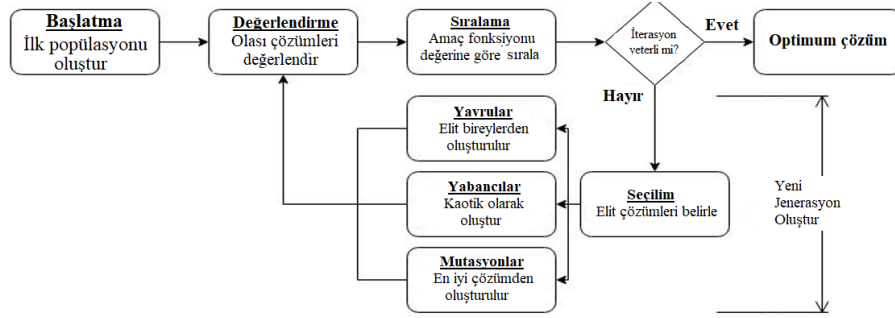
Düzensiz sınır poligonu Q içindeki olası türbin konumu z_i 'nin fizibilitesi θ_i ile gösterilir ve şu şekilde tanımlanır:

$$\theta_i = \text{mod}(C(z_i, Q), 2) \quad (12)$$

θ_i 'nin 1 olarak hesaplanması, olası türbin konumunun (z_i) seçilen düzensiz santral alanının içinde olduğu anlamına gelir. Hesaplamalar her olası türbin konumu için gerçekleştirilir ve istenmeyen konumlar olası konum alanından silinir.

2.3. Elitist Genetik Algoritma

Bu çalışmada kullanılan elitist genetik algoritma Liu ve Wang'ın [21] ilgili çalışmalarında santral konumlandırma problemlerinin çözümü için önerdikleri algoritma temel alınarak MATLAB yazılımında hazırlanmıştır [22]. Algoritmanın akış şeması şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Elitist Genetik Algoritma Akış Şeması.

Başlangıçta, gerekli rüzgâr türbini atamaları rasgele atanır. Her jenerasyondaki bir birey, olası bir çözümü temsil etmektedir. Bütün bireylerin toplamı bir jenerasyona eşittir. İlk jenerasyon oluşturulduktan sonra, her bir olası çözüm, iz bölgesi etkileri açısından değerlendirmeye alınır ve verilen konumlandırma için yıllık enerji üretimi ve toplam türbin maliyeti belirlenir. Olası çözümler yine güç kapasitelerinin kalitesine göre sıralanırlar. Yapılan sıralama işleminin ardından, tasarımcı tarafından belirlenen sayıda kaliteli olası çözüm elitler olarak adlandırılır ve doğrudan bir sonraki jenerasyona aktarılırlar. Yine tasarımcı tarafından belirlenen sayıda yavru bireyler elit olarak seçilen bireylerden tekrardan türetilirler. Bu türetme işleminde, ilk olarak elit olarak seçilen bireylerin en kötü performanslı rüzgâr türbinleri bulunur ve silinir. Daha sonra, her bir yavru çözüm için, eksilen türbinlerin yerine rüzgâr türbinleri atanır. İz bölgesinin tahrip edici etkilerinden kaçınmak adına rüzgâr türbinleri arasına belirli bir miktar mesafe bırakılmalıdır. Bu çalışmada bu değer beş rotor çapı olarak atanmıştır. Olası çözüm havuzunda tekilliği gidermek ve çözüm çeşitliliğinin sağlanması adına yabancıların eklenmesi işlemi uygulanır. Tasarımcı tarafından belirlenen sayı kadar olası çözüm, o anki jenerasyondan silinir ve rastgele yabancı birey eklemesi gerçekleştirilir. Mutasyon basamağında yeni bir birey oluştururken, o anki jenerasyonun en iyi bireyinden rastgele seçilen rüzgâr türbinleri silinir ve yerlerine rastgele yeni türbin atanır.

Bu çalışmada iki farklı amaç fonksiyonu için hesaplamalar yapılmıştır. Birincisi toplam türbin maliyetini en aza indirirken yıllık enerji üretimini maksimize etmeyi amaçlar. İkinci amaç fonksiyonu ise türbin yatırım maliyetine ek olarak kullanılan arazi miktarını da minimize etmeyi amaçlar. Buradaki amaç arazi üzerinde dağılık dağılımın engellenmesi gereken durumlarda kullanımını test etmektir. Amaç fonksiyonları şu şekilde ifade edilebilir:

$$(Amaç)_1 = \text{Min} \left(\frac{TTM}{YEÜ} \right) \quad (13)$$

$$(Amaç)_2 = \text{Min} \left(\frac{TTM \times AKO}{YEÜ} \right) \quad (14)$$

Burada TTM toplam türbin maliyetini, YEÜ yıllık enerji üretimini, AKO arazi kullanım oranını ifade etmektedir ve şu şekilde ifade edilir:

$$AKO = \frac{\text{Olası konum havuzundan silinen konum sayısı}}{\text{Toplam olası konum sayısı}} \quad (15)$$

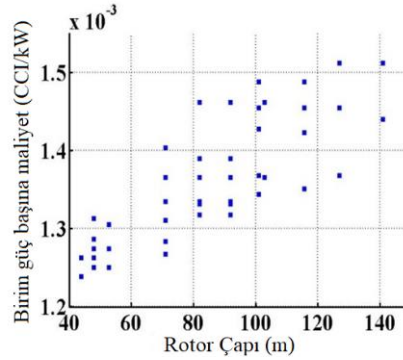
2.4. Rüzgâr Türbinlerinin Modellenmesi

Birçok türbin üreticisi ticari türbinlerinin güç eğrilerini rüzgâr hızına bağlı olarak paylaşmaktadır. Enercon tarafından paylaşılan 11 adet rüzgâr türbininin güç eğrisi verileri MATLAB yazılımına aktarılmış ve bu veriler beşinci dereceden polinom denklemleri olarak ifade edilmiştir:

$$P = \begin{cases} 0, & U < U_{cut-in} \\ c_1U^5 + c_2U^4 + c_3U^3 + c_4U^2 + c_5U + c_6, & U_{cut-in} \leq U < U_{nominal} \\ P_{nominal}, & U \geq U_{nominal} \end{cases} \quad (16)$$

Türbinlerin ilk yatırım değerlerinin tahmini için Abdulrahman ve Wood [23] tarafından önerilen basit maliyet modeli kullanılmıştır. Türbin maliyetleri, türbinin nominal gücüne ve göbek yüksekliklerine göre hesaplanmıştır. Referans türbin olarak 50 m göbek yüksekliğine sahip Enercon E-48 türbini seçilmiştir ve bu türbinin maliyeti birim maliyet olarak (1 CCI) olarak belirlenmiştir. Kule maliyetinin, türbin toplam maliyetinin %12'sine eşit olduğu ve kule maliyetinin, referans göbek yüksekliğinden olan mesafeye göre değiştiği varsayılmıştır. Her türbin için maliyet, CCI cinsinden denklem 17 ile elde edilmiştir. Şekil 5 türbinlerin birim güç başına maliyetlerini sunmaktadır.

$$TM_i = P_{nominal,i} \left(1 + \frac{C_{kule}}{H_{referans}} \cdot (H_i - H_{referans}) \right) \quad (17)$$

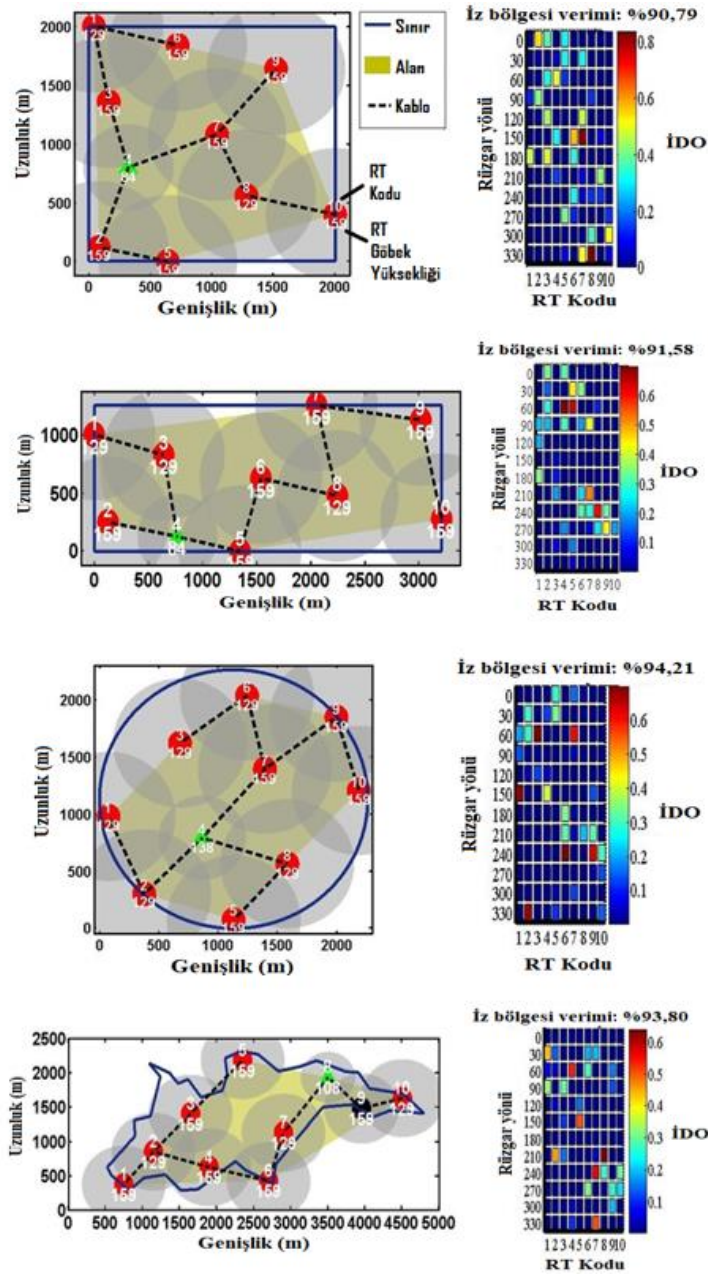


Şekil 5. 11 adet türbinin farklı göbek yüksekliğine bağlı birim güç için maliyetleri.

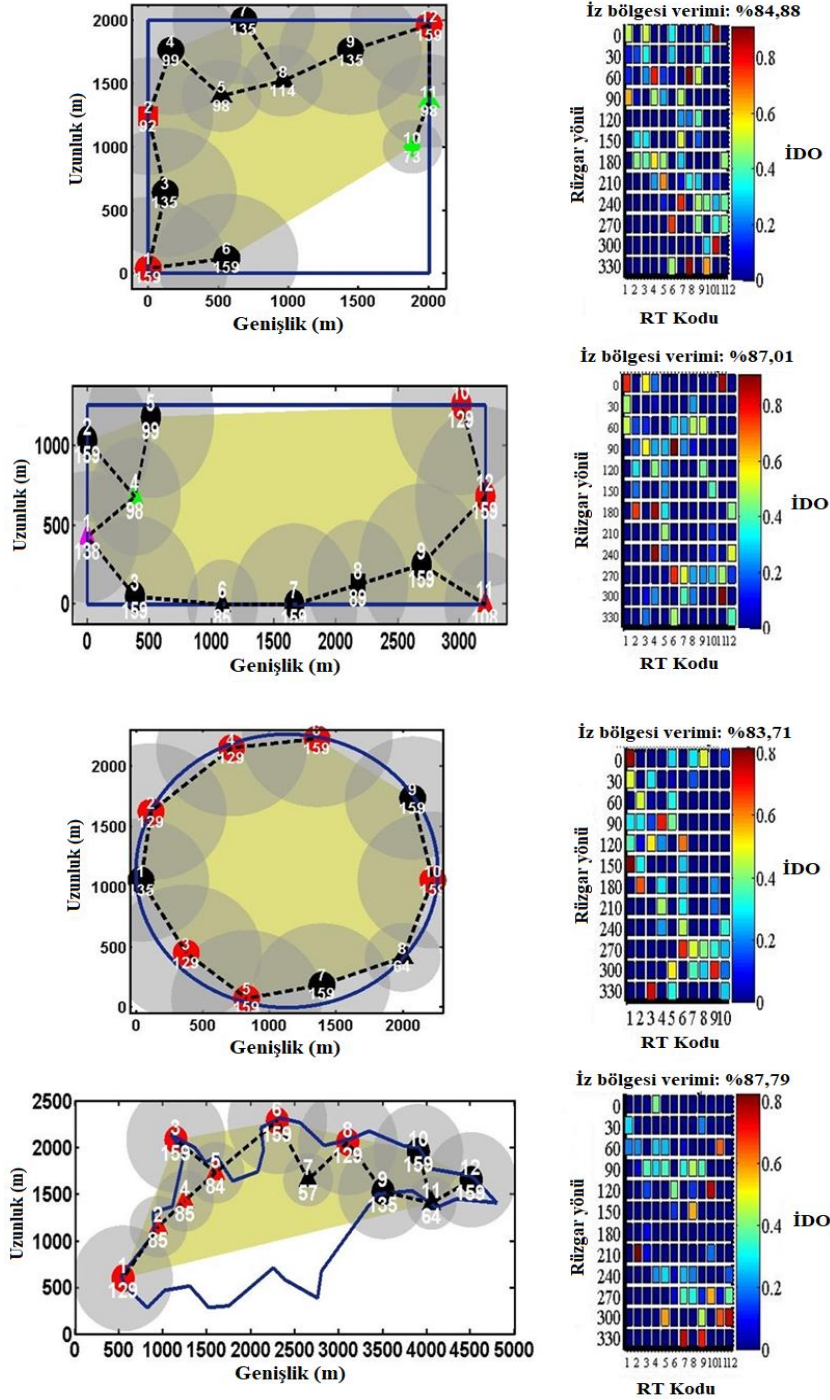
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 6 ve Şekil 7 sırası ile Amaç-1 ve Amaç-2 için elde edilen en iyi santral düzenlerini sunar. Burada santral güç kapasitesi 40 MW olarak belirlenmiştir. Algoritma bu değere ulaşana kadar veya olası konum bitene kadar türbin eklemeye devam eder. Sarı alan türbin varlıkları sebebi ile işgal edilmiş nihai santral alanını görmek adına eklenmiştir. Yarı saydam siyah daireler türbinler arası minimum mesafe şartı sebebi ile yasaklanan alanları temsil eder. Türbin sembolünün rengi ve büyüklüğü türbin modeline göre değişmektedir. Burada ayrıca her bir türbinin 12 ayrı yönden iz

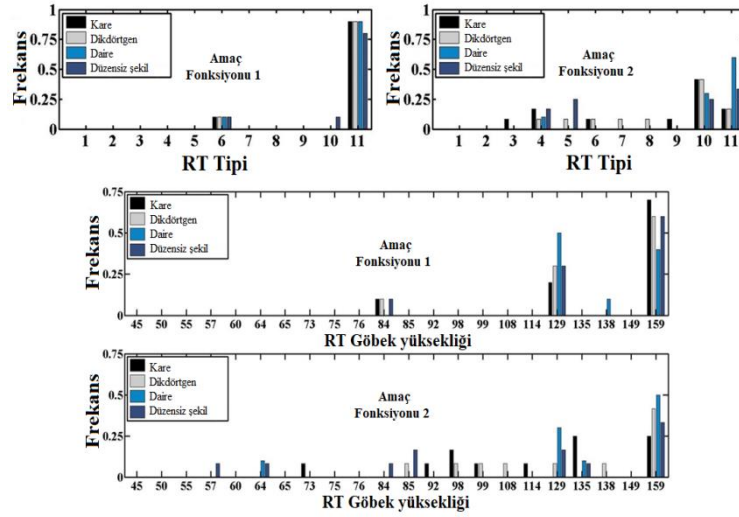
bölgesi kaynaklı hız deformasyon haritası verilmiştir. Bu parametre ne kadar yüksek ise bir türbin o kadar iz bölgesi etkisi altındadır. İz bölgesi kaynaklı deformasyon oranı şu şekilde ifade edilir:



Şekil 6. Amaç-1 için elde edilen optimum düzenler ve iz bölgesi verim haritaları.



Şekil 7. Amaç-2 için elde edilen optimum düzenler ve iz bölgesi verim haritaları.



Şekil 8. Rüzgâr türbini tipi ve göbek yüksekliğinin seçim frekansları.

$$\text{İDO}=1 - \eta_{\text{iz bölgesi}} \quad (18)$$

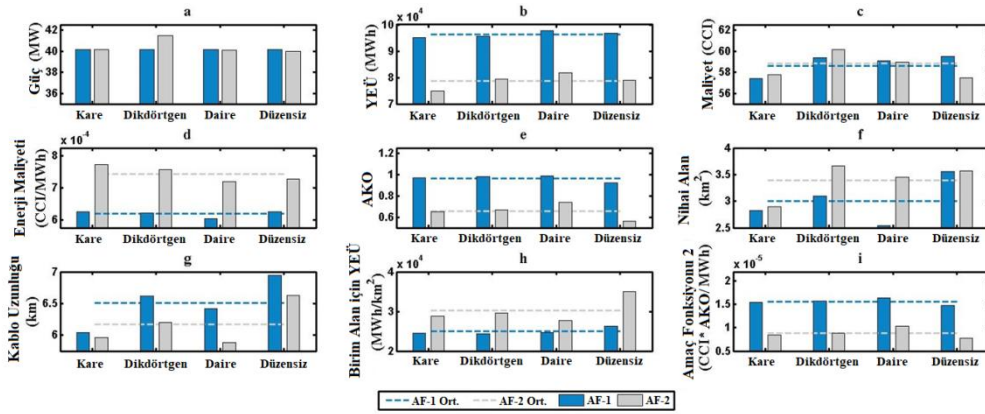
Amaç-1 için elde edilen bütün santral düzenlerinin iz bölgesi verimi %90'ın üzerindedir. Bununla beraber hâkim rüzgâr yönlerinde daha başarılı iz bölgesi verimleri elde edilen daire ve düzensiz şekilli tasarımlar daha yüksek iz bölgesi verimine sahiptir. Amaç-2 için elde edilen tasarımlara bakıldığında, arazi kullanım oranının amaç fonksiyonu içerisine eklenmesi neticesinde daha yoğun tasarımların elde edildiği gözlenmiştir. Fakat türbinler arasındaki mesafenin düşmesi sebebi ile iz bölgesi etkilerinin yükseldiği görülmektedir. İz bölgesi verimi, santral sınır şekline bağlı olarak %83,71 ile %87,79 arasında değişmektedir.

Şekil 8 üretilen en iyi santral düzenlerinin rüzgâr türbin tipi ve göbek yüksekliği seçim frekanslarını sunar. Buradan görüleceği üzere Enercon E-141(11 numaralı türbin) rüzgâr türbini modelinin dominant türbin olduğu görülmektedir. Alan kısıtlamasının olmadığı koşulda Enercon E-141 dışında sadece iki adet türbin modeli seçilmiştir. Amaç-2 için üretilen sonuçlarda türbin modeli çeşitliliğin daha fazla olduğu görülmektedir. Aynı durum göbek yüksekliği çeşitliliği açısından da benzerdir. Enercon E-141 modelinin 159 metre yüksekliği seçeneğinin en dominant göbek yüksekliği seçeneği olduğu açıktır. Kullanılan rüzgâr verisinin düşük rüzgâr hızı ile karakterize edildiği düşünülürse tasarımların mantıklı olduğu söylenebilir.

Her koşulda, istenen güç kapasitesi olan 40 MW'a ulaşılmış ve/veya aşılmıştır (Şekil 9.a). Amaç-1 için üretilen santral düzenleri daha yüksek yıllık enerji üretimi değerlerine ulaşmıştır (YEÜ ortalaması, AF-1 = 96.308 MWh, AF-2 = 78.759 MWh) (Şekil 9.b). Rüzgâr santrali tasarımlarının ortalama maliyeti hemen hemen eşittir (Maliyet ortalaması, AF-1 = 58,83 CCI, AF-2 = 58,57 CCI) (Şekil 9.c). Dolayısı ile santral tasarımlarının birim enerji maliyetleri (COE) amaç-1 için daha düşüktür (COE ortalaması, AF-1 = $6,19 \times 10^{-4}$, AF-2 = $7,43 \times 10^{-4}$) (Şekil 9.d). Amaç-1 için üretilen santral düzenlerinin ortalama arazi kullanım oranı %92'dir. Amaç-2 kullanılması ile bu değer %65'e düşmüştür (Şekil 9.e). Nihai santral alanı, türbinlerin konumlarına göre oluşturulan hayali bir dışbükey poligonu temsil

eder. Minimum kablo uzunlukları, Kruskal algoritması [24] olarak adlandırılan yaygın olarak kullanılan en kısa yol algoritması ile hesaplanmıştır. Minimum kablo uzunlukları, santral saha şekline bakılmaksızın amaç-1 için türetilen düzenlerde daha büyüktür (Şekil 9.g). Amaç-2 için türetilen santral düzenleri diğerlerine kıyasla daha yüksek birim alan başına yıllık enerji üretim değerine sahiptir (Şekil 9.h).

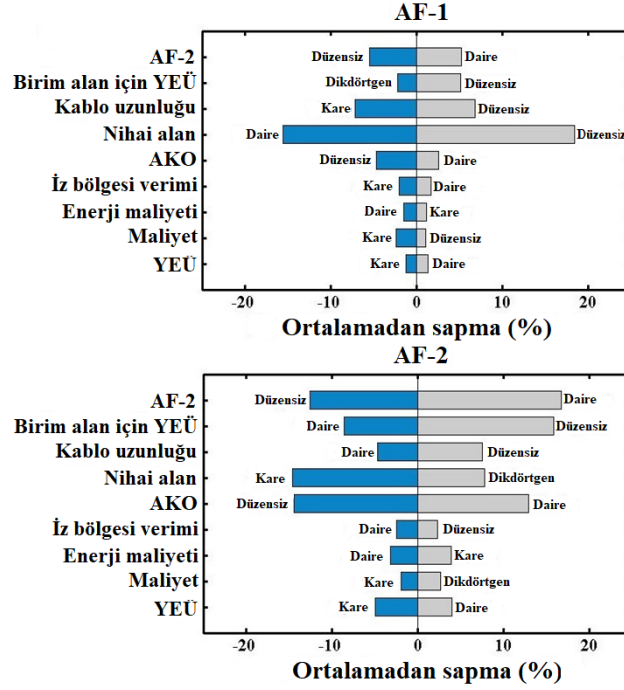
Şekil 10, alan şeklinin değişmesine bağlı olarak değişen tasarım parametrelerinin ortalama değerlerden maksimum sapmalarını göstermektedir. Mavi ve gri renkler sırasıyla negatif ve pozitif maksimum sapmaları temsil etmektedir. Görüldüğü üzere en önemli tasarım parametreleri olan iz bölgesi verimi, enerji maliyeti, toplam maliyet ve yıllık enerji üretiminin alan şekli değişimine hassasiyetleri %10'un altındadır.



Şekil 9. Sonuçların belirleyici parametreler açısından karşılaştırılması.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Kütahya rüzgâr verisi temel alınarak, iki farklı amaç fonksiyonu ve dört farklı santral sınır şekli için rüzgâr santrali konumlandırma optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon kodu Enercon firmasının 11 adet ticari türbin modelinin farklı yükseklik seçenekleri arasından seçim yapmıştır. Optimizasyon parametreleri literatürdeki ilgili çalışmaların parametreleri göz önüne alınarak seçilmiştir. Kütahya için seçilen bölgenin nispeten düz yapısı sebebi ile iz bölgesi hesaplarının gerçek ile uyumlu olacağı söylenebilir. Önemli tasarım parametrelerinin santral sınır şekline bağlı değişimi incelenmiştir. Sonuçlara göre, verilen problem şartları altında, en önemli tasarım parametreleri olan iz bölgesi verimi, enerji maliyeti, toplam maliyet ve yıllık enerji üretiminin santral sınır şeklinin değişimine olan hassasiyetlerinin %10'un altında olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar seçilen optimizasyon tasarım parametrelerine bağlıdır. Rüzgâr modeli için Enercon E-141 modelinin 159 metre yükseklik seçeneğinin en uygun model olduğu görülmektedir.



Şekil 10. Alan şekline bağlı olarak değişen parametrelerin hassasiyet analizi.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Dumlupınar Üniversitesi tarafından DPÜ-BAP-2017-20 numaralı proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] British Petroleum Company (BP), (2018), BP statistical review of world energy. British Petroleum Company.
- [2] REN21. (2017), Renewables 2017 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat).
- [3] REN21. (2018), Renewables 2018 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat).
- [4] Mosetti, G. P. C. D. B., Poloni, C., Diviacco, B. (1994), Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 51(1), 105-116.
- [5] Grady, S. A., Hussaini, M. Y., Abdullah, M. M. (2005), Placement of wind turbines using genetic algorithms. Renewable energy, 30(2), 259-270.

- [6] Emami, A., Noghereh, P. (2010), New approach on optimization in placement of wind turbines within wind farm by genetic algorithms. *Renewable Energy*, 35(7), 1559-1564.
- [7] Eroğlu, Y., Seçkiner, S. U. (2012), Design of wind farm layout using ant colony algorithm. *Renewable Energy*, 44, 53-62.
- [8] Kusiak, A., Song, Z. (2010), Design of wind farm layout for maximum wind energy capture. *Renewable energy*, 35(3), 685-694.
- [9] Pookpant, S., Ongsakul, W. (2013), Optimal placement of wind turbines within wind farm using binary particle swarm optimization with time-varying acceleration coefficients. *Renewable Energy*, 55, 266-276.
- [10] Montoya, F. G., Manzano-Agugliaro, F., López-Márquez, S., Hernández-Escobedo, Q., Gil, C. (2014), Wind turbine selection for wind farm layout using multi-objective evolutionary algorithms. *Expert Systems with Applications*, 41(15), 6585-6595.
- [11] Gao, X., Yang, H., Lin, L., Koo, P. (2015), Wind turbine layout optimization using multi-population genetic algorithm and a case study in Hong Kong offshore. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 139, 89-99.
- [12] Wang, L., Tan, A. C., Gu, Y. (2015), Comparative study on optimizing the wind farm layout using different design methods and cost models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 146, 1-10.
- [13] Pillai, A. C., Chick, J., Khorasanchi, M., Barbouchi, S., Johanning, L. (2017), Application of an offshore wind farm layout optimization methodology at Middelgrunden wind farm. *Ocean Engineering*, 139, 287-297.
- [14] Jensen, N. O. (1983), A note on wind generator interaction. Risø-M-2411 Risø Natl Lab Roskilde.
- [15] Katic, I., Højstrup, J., Jensen, N. O. (1986), A simple model for cluster efficiency. In *European wind energy association conference and exhibition*, 407-410.
- [16] Frandsen, S., Barthelmie, R., Pryor, S., Rathmann, O., Larsen, S., Højstrup, J., Thøgersen, M. (2006), Analytical modelling of wind speed deficit in large offshore wind farms. *Wind energy*, 9(1-2), 39-53.
- [17] Gu, H., Wang, J. (2013), Irregular-shape wind farm micro-siting optimization. *Energy*, 57, 535-544.
- [18] Canny, J. (1987), A computational approach to edge detection. In *Readings in Computer Vision* 184-203.
- [19] Kolesnikov, A. (2012), ISE-bounded polygonal approximation of digital curves. *Pattern Recognition Letters*, 33(10), 1329-1337.

- [20] Huang, C. W., Shih, T. Y. (1997), On the complexity of point-in-polygon algorithms. *Computers & Geosciences*, 23(1), 109-118.
- [21] Liu F, Wang Z. (2014), Offshore Wind Farm Layout Optimization Using Adapted Genetic Algorithm: A different perspective.
- [22] Koşar O. (2018), Rüzgâr Güç Santralleri Konumlandırmasının Sayısal Olarak İncelenmesi Ve Optimizasyonu. Doktora Tezi. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [23] Abdulrahman, M., Wood, D. (2017), Investigating the Power-COE trade-off for wind farm layout optimization considering commercial turbine selection and hub height variation. *Renewable energy*, 102, 267-278.
- [24] Kruskal, J. B. (1956), On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. *Proceedings of the American Mathematical society*, 7(1), 48-50.