

**Tekirdağ ve Çanakkale Bölgesi için Raylı Sistemlerin Rüzgâr Enerjisi ile Entegrasyonu**

İbrahim Can KOLOTOĞLU^{*1}, Serhat BOYNUKALIN², Mehmet Turan SÖYLEMEZ¹
Taha YÜKSEL³, Muhammet IŞIK¹

¹*İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği
Bölümü, İstanbul, Türkiye*

²*İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Fakültesi, İstanbul, Türkiye*

³*İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

*kolotoglu21@itu.edu.tr

(Alınış/Received: 15.06.2026, Kabul/Accepted: 02.07.2026, Yayınlanma/Published: 02.07.2026)

Öz: Marmara Bölgesi'nde artan ticaret hacmi ve İstanbul üzerindeki ulaşım yükü, alternatif lojistik koridorların geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çalışma, Tekirdağ ve Çanakkale illeri arasında önerilen raylı sistem hattının enerji ihtiyacının, bölgenin yüksek rüzgâr enerjisi potansiyeli ile entegrasyonunun tekno-ekonomik fizibilitesini analiz etmektedir. Çalışmada, bölgenin rüzgâr verileri ve literatür verileri kullanılarak Weibull dağılımı ile modellenmiştir. Bulgular, Bababurnu bölgesinde yıllık ortalama 7,2 m/s rüzgâr hızı ve 257 W/m² güç yoğunluğu olduğunu göstermiştir. Enerji analizi, hattın yıllık yaklaşık 247 GWh enerji ihtiyacının %79'unun rüzgâr enerjisi ve hibrit depolama sistemleri ile karşılanabileceğini öngörmektedir. Bu entegrasyon, yalnızca enerji maliyetlerini düşürmekle kalmayıp, ulaşım kaynaklı karbon emisyonlarının azaltılmasına da stratejik bir katkı sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Raylı sistemler, Rüzgâr enerjisi, Enerji depolama, Tekno-ekonomik fizibilite

Integration of Wind Energy with Rail Systems for the Tekirdağ and Çanakkale Region

Abstract: The growing trade volume in the Marmara Region and the transportation burden on Istanbul necessitate the development of alternative logistics corridors. This study analyzes the techno-economic feasibility of integrating the energy demand of the proposed rail line between the provinces of Tekirdağ and Çanakkale with the region's high wind energy potential. In the study, the region's wind data and literature data were used to model the resource with the Weibull distribution. The findings show an annual average wind speed of 7.2 m/s and a power density of 257 W/m² in the Bababurnu region. The energy analysis projects that approximately 79% of the line's annual energy demand of about 247 GWh can be met through wind energy and hybrid energy storage systems. This integration not only reduces energy costs but also offers a strategic contribution to lowering transport-related carbon emissions.

Keywords: Rail systems, Wind energy, Energy storage, Techno-economic feasibility

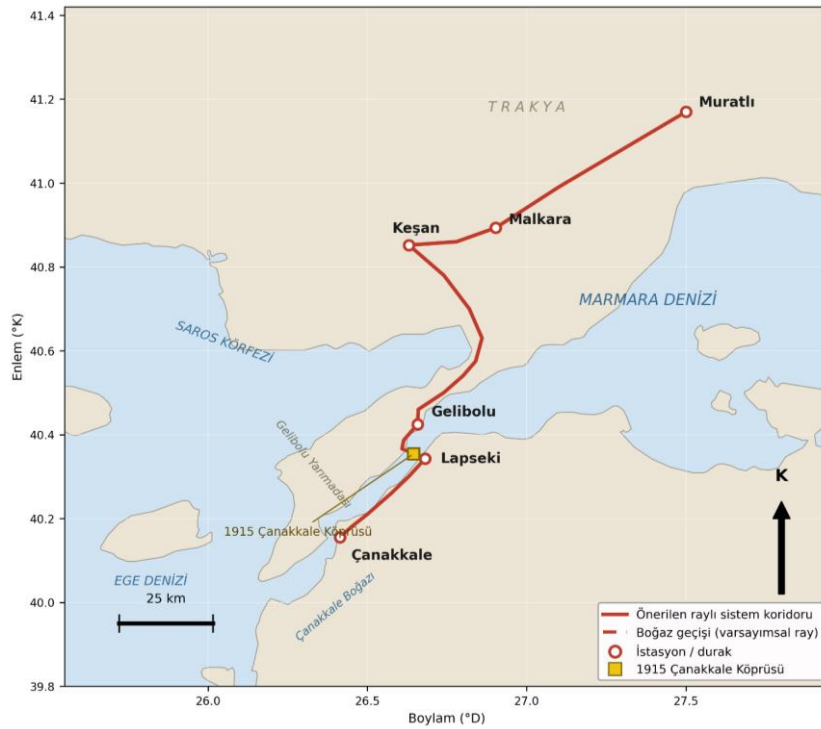
1. Giriş

21. yüzyılda değişen küresel ticaret dengeleri, demiryolu taşımacılığının önemini belirgin biçimde artırmıştır. Aynı kara kütlesi üzerindeki devletlerin tek seferde yüksek tonajlı yük taşıyabilmesi, demiryolunu giderek daha cazip bir seçenek hâline getirmiş; Asya ile Avrupa arasındaki ticaret hacminin hızla büyümesi, tarihsel İpek Yolu'nun çağdaş karşılığı olan Orta Koridor'un stratejik değerini öne çıkarmıştır [1]. Bu koridorun kritik geçiş noktasında yer alan Türkiye'de, İstanbul Boğazı ve Marmara'nın kuzey aksındaki aşırı yüklenme, alternatif lojistik güzergâhların geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır [2]. Bu çalışmanın amacı, Marmara Denizi'nin batısında Tekirdağ ile Çanakkale'yi bağlayacak yeni bir demiryolu koridorunun uygulanabilirliğini

Atıf için/Cite as: İ.C. Kolotoğlu, S. Boynukalin, M.T. Söylemez, T. Yüksel, M. Işık, "Tekirdağ ve Çanakkale bölgesi için raylı sistemlerin rüzgâr enerjisi ile entegrasyonu," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 24, no. 1970983, 2026, doi: 10.47072/demiryolu.1970983

değerlendirmek ve bu hattın elektrik enerjisi ihtiyacının, bölgenin yüksek rüzgâr enerjisi potansiyeli ile entegre edilerek karşılanabilirliğini analiz etmektir.

Marmara Bölgesi, Türkiye'nin sanayi ve dış ticaretinin merkezinde yer almakta; ancak büyük ölçüde karayoluna dayalı mevcut ulaşım altyapısı İstanbul metropolü üzerinde sürdürülemez bir yük oluşturmaktadır. AB'den gelen yük trenlerinin Asya'ya geçişinde bugün tek seçeneğin İstanbul üzerinden Marmaray olması, planlanan ek hatların artan tren trafiğini karşılamasını güçleştirmektedir [1]. Mevcut 1915 Çanakkale Köprüsü yalnızca karayolu trafiğine hizmet veren ve Kınalı–Tekirdağ–Çanakkale–Balıkesir Otoyolu'nun parçası olan bir asma köprüdür; bu nedenle bu çalışmada Çanakkale Boğazı geçişi, mevcut köprüye paralel ya da ona entegre, ayrı bir raylı sistem geçişi (yeni bir köprü/tünel veya köprüye sonradan eklenecek bir ray güzergâhı) varsayımı altında ele alınmıştır. Boğaz geçişinin yapısal tasarımı bu çalışmanın kapsamı dışındadır ve bir sınırlılık olarak kabul edilmektedir [2]. Önerilen koridor, Tekirdağ'dan başlayıp Malkara ve Keşan üzerinden Gelibolu'ya, oradan boğaz geçişiyle Lapseki–Çanakkale hattına ulaşan, yaklaşık 200 km uzunluğunda bir güzergâhtır. Güzergâhın kabaca topoğrafik kesiti Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Önerilen Tekirdağ–Çanakkale raylı sistem koridoru

Önerilen Tekirdağ–Çanakkale güzergâhı, Trakya platformunun güneybatısından Biga Yarımadası'na uzanan, jeomorfolojik açıdan çeşitlilik gösteren bir koridoru izler. Güzergâh; Malkara ve Hayrabolu çevresindeki tarım düzlükleri ile Keşan ovasının uygun geçiş koşullarından, Korudağ ve Ganos bloğunun engebeli kesimlerine kadar değişen zemin koşulları içerir [3], [4]. Bölgenin büyük ölçüde çökel kökenli ve kısa mesafelerde değişebilen zemin yapısı, uzun hatlı projelerde tek bir zemin varsayımı yerine güzergâh boyunca koşulların haritalanmasını gerektirir [7], [8]. Ayrıca güzergâhın güney ucu, Gelibolu Yarımadası Tarihî Millî Parkı gibi koruma–kullanma dengesinin gözetilmesi gereken kültürel açıdan hassas alanlarla komşudur [5], [6].

Bölgenin bir diğer belirleyici özelliği, Marmara ve çevresinin aktif tektonik bir kuşakta yer almasıdır. Tekirdağ yöresinde kara üzerinde izlenen Ganos Fayı, hem yer şekilleri hem de deprem

üretme potansiyeli açısından bölgenin tektonik olarak hareketli karakterini ortaya koyar [9], [10]; nitekim 1912 Mürefte (Ganos) deprem dizisi bu segmentin büyük depremler üretebildiğini göstermektedir [11]. Bu nedenle güzergâh ve enerji altyapısı tasarımında depremsellik temel bir kısıt olarak ele alınmalıdır.

Raylı sistemlerin yenilenebilir enerjiyle entegrasyonu son yıllarda hızla genişleyen bir alandır. Teknik çerçeveyi kuran çalışmalar, demiryolu elektrifikasyonunda üretim, depolama ve şebeke arabiriminin birlikte ele alınması [12] ve yenilenebilir kaynağın bir enerji yönetimi stratejisiyle anlam kazanması [13] gerektiğini vurgular; Deutsche Bahn'ın çekiş elektriğindeki yenilenebilir payını yıllar içinde istikrarlı biçimde artırması bu yaklaşımın saha karşılığını gösterir [14]. Depolama tarafında hibrit enerji depolama sistemleri ve rejeneratif frenleme geri kazanımı [15], [16], [17], enerji hasadı [18], akıllı istasyonlarda fotovoltaiik–depolama birlikteliği [19] ve hidrojenle karşılaştırmalar [20] gibi yönere genişlemiştir. Türkiye'deki uygulamalar ise büyük ölçüde fotovoltaiik (PV) ağırlıklıdır: ESTRAM tramvay hattı için güneş destekli mikro-şebeke [21] ve bir yüksek hızlı tren güzergâhında PV katkısının istatistiksel değerlendirilmesi [22] bu çalışmalara örnektir.

Bölgesel rüzgâr potansiyeli açısından, Bababurnu–Çanakkale için yapılan analizler kış aylarında güçlenen belirgin bir mevsimsellik ortaya koymakta [23]; REPA [24] ve Global Wind Atlas [25] açık erişimli kaynak verisi sağlamakta, Türkiye genelinde kurulu güç [26], saha seçimi [27] ve Weibull tabanlı karakteristik [28] çalışmalarıyla bu potansiyel belgelenmektedir. Tekno-ekonomik tarafta ise NREL [29] ve IRENA [30] güncel maliyet ve LCOE referansları sunarken, hibrit sistemler için optimizasyon ve tekno-ekonomik analizler [31], [32] ortaya konmuştur. Bununla birlikte bu kaynaklar, bölgenin rüzgâr potansiyelini somut bir ulaşım talebiyle hat ölçeğinde ilişkilendirmemektedir.

Literatür birlikte değerlendirildiğinde boşluk açıktır: entegrasyon çalışmaları çoğunlukla genel ya da istasyon ölçeğinde kalmakta, Türkiye örnekleri PV ağırlıklı olmakta ve bölgesel rüzgâr potansiyeli hat ölçekli bir talep ile tekno-ekonomik biçimde ilişkilendirilmemektedir. Bu çalışma söz konusu eksikleri tek bir koridorda (Tekirdağ–Çanakkale) birleştirerek kapatmayı amaçlar; koridora özgü ve yeniden üretilebilir bir enerji talep–arz eşleştirme modeli kurar, bunu Weibull tabanlı rüzgâr analizi ve senaryo bazlı bir karşılanabilirlik oranıyla ilişkilendirir ve koridor için ilk kez CAPEX, OPEX, LCOE, geri ödeme süresi ve CO₂ azaltımını içeren bir ön tekno-ekonomik fizibilite ortaya koyar. Hatta özgü analitik bir model ve nicel değerlendirme içermesi nedeniyle çalışma bir araştırma makalesi niteliğindedir; sonuçların atlas ve literatür verisine dayandığı, dolayısıyla saha doğrulaması gerektirdiği ise açıkça kabul edilmektedir. Bu çalışma tam bir mühendislik fizibilitesi değil, koridor ölçeğinde bir ön fizibilite ve senaryo analizidir. Amaç, kesin tasarım değerleri üretmek değil; rüzgâr–raylı sistem entegrasyonunun teknik ve ekonomik açıdan büyüklük mertebesini ortaya koymak ve ileri çalışmalara temel oluşturmaktır.

2. Metot

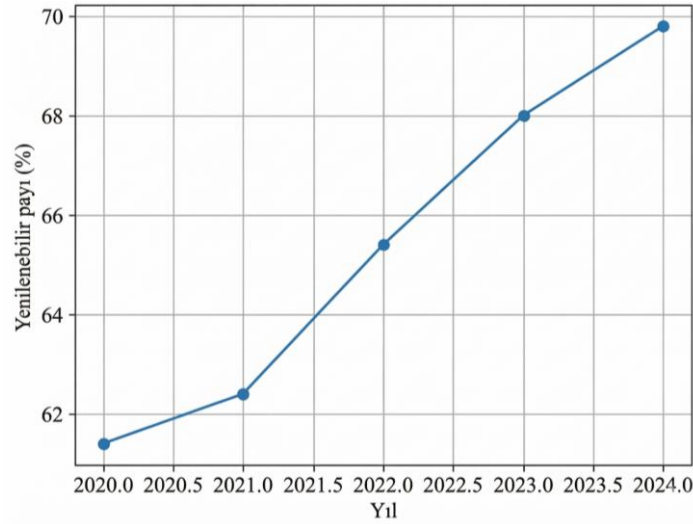
Bu çalışmada, Tekirdağ–Çanakkale arasında planlanan raylı sistemin rüzgâr enerjisi ile entegrasyon potansiyeli nicel analiz yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle rüzgâr verileri derlenmiş, istatistiksel olarak modellenmiş, ardından demiryolu güç profili ile eşleştirilmiştir.

2.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarının raylı sistemlerde kullanımı

Raylı sistemlerde yenilenebilir enerji kullanımı, çekiş elektriğinin yenilenebilir kaynaklarla karşılanması hedefi etrafında gelişmektedir. Bu hedef; kurumsal düzeyde tüketilen elektriğin yenilenebilir payını artırmaktan, istasyon ve hat ölçeğinde yerinde üretim (PV, batarya vb.) ve depolama bileşenleriyle desteklenmesine kadar farklı ölçeklerde uygulanan, birbirini tamamlayan

bir bütündür. Tüm bu uygulamaların ortak amacı, çekiş enerjisinin maliyetini ve karbon yoğunluğunu düşürmektir [12].

Bu uygulamanın somut bir örneği, Avrupa'nın en büyük demiryolu işletmecilerinden biri olan Deutsche Bahn'dır (DB). Bir raylı sistem işletmecisi olarak DB, çekiş ve işletme elektriğinde kullandığı yenilenebilir enerji payını yıldan yıla istikrarlı biçimde artırmaktadır. Şekil 2'de, DB'nin raporlamış olduğu değerler kullanılmış olup, 2020-2024 yılları arasında tükettiği elektrikteki yenilenebilir payının %61,4 oranından %69,8 oranına yükseldiği aynı şekilde görülmektedir [13].

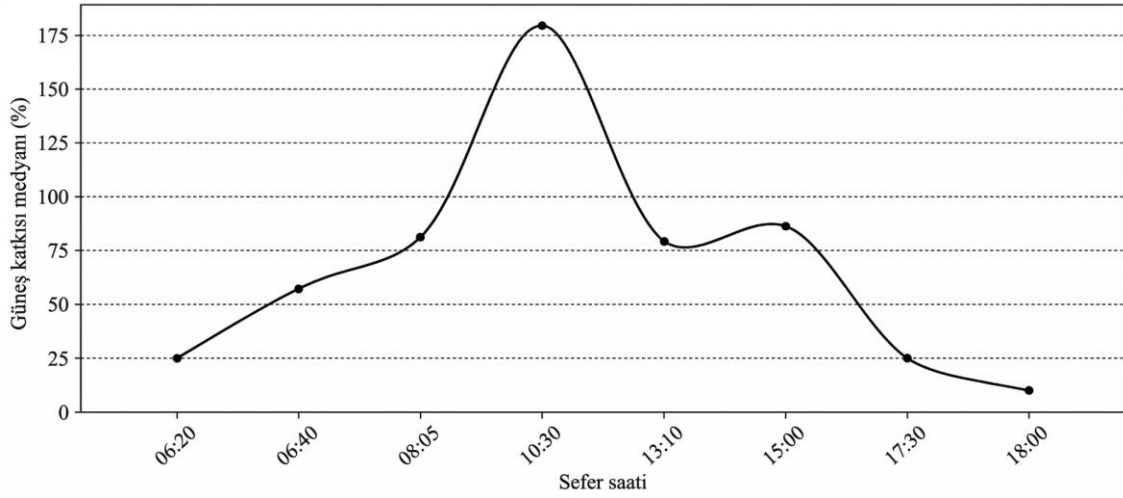


Şekil 2. Deutsche Bahn elektrik tüketimindeki yenilenebilir payı (2020-2024) [13]

Japonya ve Çin gibi örneklerde ise yenilenebilir enerji entegrasyonunu, istasyon çatılarına PV uygulamaları yapılarak görünür hale gelmektedir. Yenilenebilir üretim gün içinde değişkendir, raylı sistem yükü de sefer yoğunluğuna göre değişir [12]. Dolayısıyla enerji yönetimi ve gerektiğinde depolama, yenilenebilir entegrasyonunu yalnızca üretim olmaktan çıkarıp bunu işletilebilir bir sistem çözümüne dönüştürür. Sonuç itibarıyla, yenilenebilir enerjinin raylı sistemlerde kullanımı yalnızca bir teknoloji yatırımı değil, aynı zamanda planlama, yönetim, tedarik gibi aşamaları da içinde barındırmalıdır [14].

Türkiye'de raylı sistemlerde yenilenebilir enerjiye ilişkin çalışmaların önemli bir kısmı, PV entegrasyonunu maliyet azaltmaya yönelik ele almaktadır. ESTRAM (Eskişehir) tramvay hattı için geliştirilen güneş destekli mikro-şebeke çalışması, PV'nin şebeke tarifelerinin (normal/puant/gece) oluşturduğu maliyet baskısını düşürme potansiyelini, enerji yönetimi mantığıyla tartışır. Bu tür çalışmaların katkısı, yenilenebilir kaynağı yalnızca kurulu güç olarak değil, işletme stratejisi olarak konumlandırmalarıdır [15].

Türkiye'de bir yüksek hızlı tren güzergâhı için PV katkısının istatistiksel olarak değerlendirildiği emsal çalışmada sefer saatlerine göre PV'nin çekiş tüketimine katkısı yüzdesel olarak raporlanmakta, değerlerin gün içinde nasıl değiştiği Şekil 3'te ortaya konmaktadır. Örneğin 13:10 ve 15:00 seferlerinde medyan katkı yaklaşık %79-%85 bandındayken, akşam saatlerine yaklaşıldığında (17:30 ve 18:00 seferleri) medyan katkının tek haneli yüzdelere indiği görülüyor. Aynı tabloda bazı seferlerde katkının %100'ü aşabilmesi ise, belirli zaman dilimlerinde PV üretiminin model varsayımları altında çekiş tüketimini aşabildiğini ve fazla üretim sorununu gündeme getirdiğini düşündürüyor. Bu, PV'nin her an her koşulda çekişi karşılayabileceği anlamına gelmez; ama doğru zaman aralıklarında şebekeden çekilen enerjiyi ciddi biçimde azaltabilecek bir potansiyele işaret eder [16].



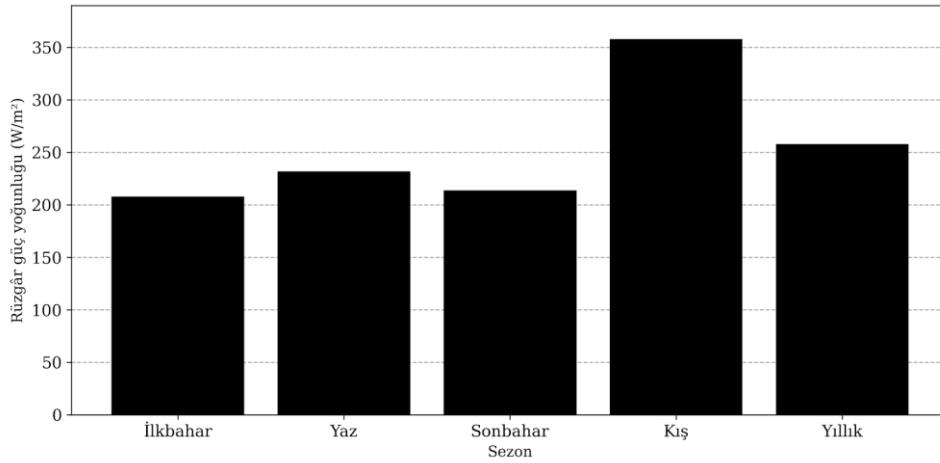
Şekil 3. YHT hattında güneş enerjisinin çekiş tüketimine katkısı (medyan değerler verilmiştir.) [16]

Bu örnekler, yenilenebilir entegrasyonunun yalnızca kurulu güçle değil, enerji yönetimi ve depolama ile anlam kazandığını göstermektedir. Türkiye'deki çalışmaların PV ağırlıklı olması ve bölgesel rüzgâr potansiyelinin hat ölçeğinde değerlendirilmemiş olması, bu çalışmanın neden rüzgâr odaklı bir yaklaşımı benimsediğini ortaya koymaktadır. İzleyen bölümde, çalışma alanının rüzgâr potansiyeli ele alınmaktadır.

2.2. Tekirdağ ve Çanakkale bölgesinde rüzgâr enerjisi potansiyeli

Tekirdağ–Çanakkale kuşağında rüzgâr, yalnızca yüksek potansiyel iddiasıyla değil, özellikle mevsimsel davranışı nedeniyle raylı sistemlerin yenilenebilir stratejisinde anlamlı bir yer tutacaktır. Güneş üretimi yazın artarken kışın düşer; rüzgâr ise birçok kıyı ve boğaz etkili bölgede kış aylarında güçlenebilir [12]. Bu tamamlayıcılık, PV ağırlıklı çözümlerin zayıf kaldığı dönemlerde yenilenebilir katkıyı dengede tutma açısından önemlidir. Raylı sistemlerde hibrit çözümlerin vurgulanması da zaten bu nedenle yaygındır [14].

Bababurnu (Çanakkale) için yapılan istatistiksel rüzgâr analizi bu mevsimsel farkı sayısal olarak göstermektedir. Çalışmanın sezonlara göre güç yoğunluğu değerleri Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'e bakıldığında, kış mevsimindeki güç yoğunluğunun 374 W/m^2 ile belirgin biçimde yükseldiği; ilkbahar–yaz–sonbahar değerlerinin ise birbirine daha yakın bir bantta seyrettiği görülür ($209\text{--}232\text{--}214 \text{ W/m}^2$). Yıllık ortalama değer de 257 W/m^2 olarak raporlanmıştır. Bu tablo, rüzgârın bu bölgede özellikle kış koşullarında daha etkili olabildiğini; dolayısıyla PV'nin zayıfladığı dönemde yenilenebilir üretimi destekleme potansiyeli taşıdığını göstermektedir [17].



Şekil 4. Bababurnu bölgesinde sezonlara göre rüzgâr güç yoğunluğu [17]

Rüzgâr üretimi çoğu zaman trene doğrudan bağlanmaktan ziyade, şebekedeki yenilenebilir payı artırarak tüketilen elektriğin karbon yoğunluğunu aşağı çeker [12].

2.3. Rüzgâr enerjisi ve dünyada kurulu güç gelişimi

Rüzgâr enerjisi, ülkelerin son zamanlarda enerji kaynaklarını çeşitlendirmelerini istemeleriyle yaygınlaşmaya başlamış çevreye duyarlı bir yenilenebilir kaynaktır. Doğadan herhangi bir yakıtı ihtiyaç duyulmadan elde edilebilen bu enerji, rüzgâr türbinleri ile üretilmektedir [18].

Tablo 1. Ülkelerin rüzgâr enerjisi kurulu güç kapasiteleri (MW) [19]

Ülke/Bölge	2024 (MW)	2022 (MW)
Çin (ÇHC)	561492	395230
ABD	154609	144053
Almanya	72683	66242
Hindistan	48163	41600
Brezilya	34000	23661
Birleşik Krallık	32360	28683
Türkiye	12864	11405
Polonya	10233	7950
Toplam (Tüm Dünya)	1173581	930811

İlgili tablodan Tablo 1’de, Çin’in (ÇHC) kurulu güç kapasitesini 2022 yılından 2024 yılına kadar artırdığı görülmektedir. Dünya geneline bakıldığında tek başına Çin’in, neredeyse toplam kurulu gücün yarısına sahip olduğu aynı şekilde görülmektedir. Tablodaki ülkeler dikkatlice incelendiği vakit, istisnasız tüm ülkelerin yıldan yıla kurulu güç kapasitelerini artırdığı fark edilmektedir. Bu durumun sebepleri arasında en önemlisi, ülkelerin enerji konusunda tam bağımsız olmak istemeleridir [19].

2.4. Rüzgâr potansiyelinin istatistiksel modellenmesi

Rüzgâr hızı, zaman ve mekâna bağlı olarak sürekli değişkenlik gösteren stokastik bir parametredir. Bir bölgedeki rüzgâr enerjisi potansiyelinin doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi ve uygun türbin seçiminin yapılabilmesi için, ham rüzgâr verilerinin istatistiksel yöntemlerle modellenmesi gerekmektedir. Rüzgâr hızı frekans dağılımını belirlemek için kullanılan yöntem,

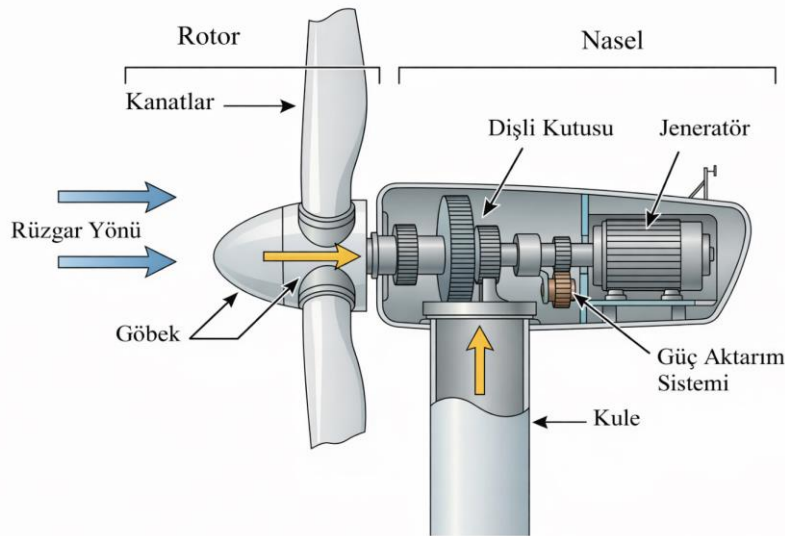
iki parametrelili Weibull dağılımıdır. Weibull dağılımı, rüzgârın belirli bir zaman diliminde hangi hızlarda ve ne sıklıkla estiğini gösteren Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (PDF) ile ifade edilir. Bu fonksiyon aşağıdaki gibidir [20].

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k} \quad (1)$$

Denklemden yer alan parametreler, rüzgâr rejiminin karakteristiğini belirler. Şekil parametresi (k), dağılımın genişliğini tanımlar, k değerinin artması dağılımın daha dar olmasına sebebiyet verir. Ölçek parametresi (c), rüzgâr hızının büyüklüğü ile doğrudan ilişkili olmakla beraber, c değeri arttıkça dağılım yüksek rüzgâr hızlarına doğru kayar ve rüzgâr potansiyelinin arttığını gösterir. Weibull dağılımının kullanılması, sadece ortalama rüzgâr hızını bilmekten çok daha detaylı bir enerji analizi yapılmasına olanak tanır ve rüzgâr türbini güç eğrisi ile eşleştirilerek yıllık enerji üretiminin hassas bir şekilde hesaplanmasını sağlar [20]. Bu çalışmada Weibull şekil (k) ve ölçek (c) parametreleri maksimum olabilirlik yöntemiyle tahmin edilmiş; dağılımın uyum iyiliği belirleme katsayısı (R^2) ve Kolmogorov–Smirnov testi ile doğrulanmıştır.

2.5. Rüzgâr türbinleri ve çalışma prensibi

Modern rüzgâr türbinleri, aerodinamik, mekanik ve elektriksel sistemlerin karmaşık bir entegrasyonudur. ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nın (NREL) teknik raporlarına göre, şebeke ölçekli bir rüzgâr türbini Şekil 5'teki gibi temel olarak üç ana modülden oluşur: Enerjiyi yakalayan rotor, dönüşümü sağlayan nasel (makine dairesi) ve yapıyı destekleyen kule [21].



Şekil 5. Rüzgâr türbini bileşenleri [31]

Rüzgâr türbinlerinin temel çalışma prensibi, hava akımındaki kinetik enerjinin önce mekanik enerjiye, ardından da elektrik enerjisine dönüştürülmesi sürecine dayanmaktadır. Bu süreç, basit gibi görünmekle birlikte, aerodinamik kuvvetlerin ve elektromanyetik prensiplerin hassas bir dengesini gerektirir. Rüzgârın kanatlara çarpmasıyla başlayan bu dönüşüm, şebekeye elektrik aktarımı ile son bulur [23].

Kanatlar uçak kanadına benzer bir aerodinamik forma sahiptir; rüzgâr kanadın üzerinden akarken kavisli üst yüzeyde alt yüzeye göre daha hızlı hareket eder ve Bernoulli ilkesi gereği oluşan basınç farkı bir kaldırma kuvveti yaratır. Bu kuvvet rotoru döndürür; tasarımdaki amaç, kaldırma

kuvvetini en üst düzeye çıkarırken sürüklenme kuvvetini en aza indirmektir [24]. Rotorun dönmesiyle elde edilen mekanik enerji göbek (hub) üzerinden ana mile iletilir; dişli kutusu bu hareketi jeneratör hızına yükseltir [21]. Dişlisiz türbinlerde ise çok kutuplu senkron jeneratörler kullanılarak dişli kutusu aradan çıkarılır; bu yaklaşım mekanik kayıpları ve bakım maliyetini azalttığı için yaygınlaşmaktadır [22], [25]. Jeneratörde elektromanyetik indüksiyonla üretilen elektrik, kule tabanındaki transformatörlerle şebekeye uyumlu hale getirilir [18]. Hat için türbin seçiminde, Bababurnu kuşağının rüzgâr hızı ve k değeri dikkate alınarak orta–yüksek kapasite faktörü sağlayabilecek modern kara tipi türbinler esas alınmıştır.

2.6. Rüzgâr enerjisinin raylı sisteme entegrasyonu ve depolama

Rüzgâr enerjisi kaynaklı üretim profili ile demiryolu cer sisteminin talep karakteristiği arasındaki zamansal uyumsuzluk, enerji depolama sistemlerinin (ESS) altyapıya entegrasyonunu teknik bir zorunluluk hâline getirir. Türbinlerin meteorolojik koşullara bağlı stokastik üretimi ile trenlerin anlık hızlanma/frenleme manevralarından kaynaklanan dinamik yük profili, şebeke kararlılığını tehdit eden güç dengesizliklerine yol açabilir. Sisteme dahil edilen depolama üniteleri, arz ve talep arasında bir tampon oluşturarak hem rüzgârın kesintili doğasını dengeler hem de cer hattındaki güç kalitesini düzenler [12]. Demiryolu uygulamalarında depolama gereksinimi, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek enerji yoğunluğu olmak üzere iki eksenle şekillenir. Tek bir teknolojinin bu iki zıt gereksinimi aynı anda verimli karşılaması elektrokimyasal limitler nedeniyle güçtür; bu nedenle farklı karakteristikteki birimlerin bir arada kullanıldığı Hibrit Enerji Depolama Sistemleri (HESS) yaklaşımı benimsenir [26]. Bu mimaride yüksek enerji yoğunluklu Li-ion bataryalar enerji kaydırma işlevini üstlenirken; yüksek güç yoğunluklu süperkapasitörler anlık güç dalgalanmalarını sönmölemek ve rejeneratif frenleme enerjisini geri kazanmak için kullanılır [12]. Fiziksel entegrasyonda ise hat boyu depolama topolojisi öne çıkar: türbinler ve depolama üniteleri trafo merkezlerinde ortak bir DC link üzerinden bağlanır. Bu merkezi yerleşim hem rüzgârsız dönemlerde gerilim regülasyonunu sağlar hem de trenlerin kalkış anındaki ani güç talebini karşılayarak şebeke stresini ve enerji maliyetini düşürür [27], [28]. Bu kapsamda, rejeneratif frenleme enerjisinin komşu besleme bölgelerinde değerlendirilmesi [36], yüksek hızlı demiryolunda geri kazanılan enerjinin depolama sistemiyle yeniden kullanımı [37] ve 3 kV DC elektrifikasyon sisteminde tepe gücünü azaltmaya yönelik hibrit enerji depolama uygulamaları [38] da literatürde incelenmiştir.

Bu çalışmada HESS, yüksek enerji yoğunluklu bir batarya bankası (yaklaşık 50 MWh / 25 MW, çevrim verimi %90) ile yüksek güç yoğunluklu bir süperkapasitör bankasından (yaklaşık 0,2 MWh / 40 MW, verim %95) oluşacak biçimde boyutlandırılmıştır. Ortalama cer gücü yaklaşık 28 MW olup, batarya saatlik üretim–talep dengesizliğini gidermek, süperkapasitör ise kalkış–hızlanmadaki saniyeler mertebesindeki tepe güçleri ve rejeneratif frenleme geri kazanımını karşılamak için kullanılır.

2.7. Cer enerji talebi, rüzgâr-talep eşleştirme ve tekno-ekonomik model

Hattın yıllık brüt cer enerji talebi ($E_{brüt}$); güzergâh uzunluğu (L), günlük sefer sayıları (yük N_f , yolcu N_p) ve tren tipine göre özgül enerji tüketimleri (SEC_f , SEC_p) kullanılarak Denklem 2. ile hesaplanır:

$$E_{brüt} = L \cdot (N_f \cdot SEC_f + N_p \cdot SEC_p) \cdot 365 \quad (2)$$

Hat uzunluğu Tekirdağ–Malkara–Keşan–Gelibolu–1915 Çanakkale Köprüsü güzergâhı için yaklaşık 200 km, günlük sefer çift yönde 50 yük ve 50 yolcu olarak alınmış; rejeneratif frenleme geri kazanımı baz değeri ise %20 (15–30 aralığı) kabul edilmiştir [27], [28], [33].

$$E_{\text{rüzgâr}} = P_w \cdot CF \cdot 8760 \quad (3)$$

Yıllık rüzgâr üretimi, sabit bir kapasite faktörü varsayımı yerine türbin güç eğrisi ile Weibull dağılımı birleştirilerek hesaplanmıştır. Atlas verisi 50 m'de verildiğinden rüzgâr hızı önce üs (power-law) yasasıyla göbek yüksekliğine taşınır. Denklem 4. aşağıdaki gibidir:

$$v(z) = v_{ref}(z/z_{ref})^\alpha \quad (4)$$

Burada $z_{ref} = 50$ m, z göbek yüksekliği ve $\alpha = 0,14$ pürüzlülük üssüdür. Türbinin ortalama gücü, güç eğrisi $P(v)$ ile Weibull yoğunluğu $f(v)$ 'nin çarpımının integralinden Denklem 5, santralin yıllık net üretimi Denklem 6. ile kayıplar dâhil edilerek bulunur:

$$P_{ort} = \int_0^\infty P(v) f(v) dv \quad (5)$$

$$E_{rüz} = N \cdot 8760 \cdot P_{ort} \cdot (1 - L) \quad (6)$$

Burada N türbin sayısı, 8760 yıldaki saat sayısı ve L dizilim (wake), kullanılabilirlik ve elektriksel kayıpları kapsayan toplam kayıp katsayısıdır. Kapasite faktörü bu hesabın bir çıktısıdır; P_{ort} 'un anma gücüne oranı brüt, kayıplar düşüldükten sonraki değeri ise net kapasite faktörünü verir. Üretimin tamamı zamansal uyumsuzluk nedeniyle doğrudan cer talebine aktarılamadığından, hibrit depolama (HESS) ile kaydırılabilen kullanılabilir pay bir eşleştirme faktörü (η_m) ile temsil edilmiştir. Buna göre yenilenebilir depolama karşılanabilirlik oranı (η_{kar}) Denklem 7. ile tanımlanır:

$$\eta_{kar} = \frac{\eta_m \cdot E_{\text{rüzgâr}} + E_{\text{rejen}}}{E_{\text{brüt}}} \quad (7)$$

Ön tekno-ekonomik değerlendirmede yatırım maliyeti (CAPEX), işletme-bakım maliyeti (OPEX), eşitlenmiş enerji maliyeti (LCOE) ve basit geri ödeme süresi hesaplanmıştır. Karşılaştırmada kullanılan elektrik birim fiyatı (0,085 USD/kWh $\approx$ 2,9 TL/kWh), EPDK sanayi abone grubu tarifesine (2026) dayandırılmıştır. CAPEX; rüzgâr santrali (birim maliyet IRENA [22] ve NREL [21] referanslarından), hibrit depolama ve şebeke entegrasyonu/altyapı (BOP) kalemlerinden oluşur. LCOE Denklem 8. ile verilmiş olup, sermaye geri kazanım faktörü (CRF) kullanılarak hesaplanmıştır. CRF, Denklem 9. ile hesaplanmaktadır:

$$LCOE = \frac{CRF \cdot CAPEX + OPEX}{E_{\text{yıllık}}} \quad (8)$$

$$CRF = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (9)$$

Burada r iskonto oranı (%8) ve n ekonomik ömürdür (25 yıl). Basit geri ödeme süresi, CAPEX'in yıllık net tasarrufa (kaçınılan şebeke maliyeti – OPEX) oranı olarak alınmıştır. Tam NPV/IRR analizi gerçek proje verisi gerektirdiğinden sonuçlar bir ön fizibilite göstergesi olarak sunulmakta, sınırlılıkları Bölüm 4'te belirtilmektedir. Yenilenebilir üretimin şebeke elektriğini ikame etmesiyle kaçınılan CO₂ emisyonu; yıllık üretim ile şebeke ortalama emisyon faktörünün (EF) çarpımı olarak Denklem 10. ile hesaplanmıştır.

$$\Delta CO_2 = E_{\text{rüzgâr}} \cdot EF \quad (10)$$

Bu hesapta rüzgâr enerjisinin kendi yaşam döngüsü (üretim, kurulum, bakım) kaynaklı emisyonları ihmal edilmiştir. Rüzgâr enerjisinin karbon emisyonu sıfır değildir; ancak yaklaşık 11–12 gCO₂/kWh mertebesindeki yaşam döngüsü emisyonu, şebeke ortalama emisyon faktörünün (≈ 480 gCO₂/kWh) yanında ihmal edilebilir düzeydedir [32]. Dolayısıyla hesaplanan kaçınılan emisyon bir üst sınır tahmini olarak yorumlanmalıdır.

3. Bulgular

Bu bölümde, tanımlanan modelin uygulanmasıyla elde edilen nicel sonuçlar adım adım sunulmaktadır. Aşağıda sunulan tüm nicel değerler, Bölüm 2'deki açık varsayımlar ile açık erişimli atlas/literatür verileri temelinde elde edilen model tabanlı tahminlerdir; gerçek saha ölçümlerine dayanmamaktadır.

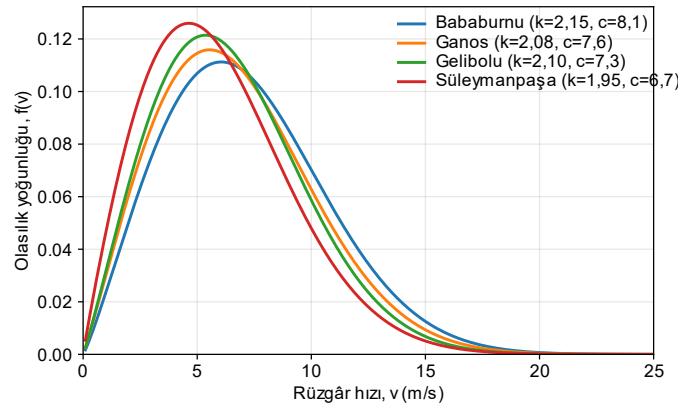
3.1. Bölgesel rüzgâr kaynağı ve güzergâh örtüşmesi

REPA (Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası) verilerine göre, Çanakkale ili genelinde 50 metre yükseklikte 6,8 – 7,5 m/s rüzgâr hızına sahip 863 km² alan bulunmaktadır. Rüzgâr verisi 50 m referans yüksekliğinde REPA'dan, tamamlayıcı olarak da 10–200 m yükseklik aralığında ve yaklaşık 250 m yatay çözünürlükte uzun dönem ortalama veri sağlayan Global Wind Atlas'tan alınmıştır. Bölgedeki hâkim rüzgâr yönü Kuzey-Kuzeydoğu (Poyraz) olup, Tekirdağ-Malkara hattında yan rüzgâr (crosswind), Gelibolu yarımadasında ise karşı/arka rüzgâr (headwind/tailwind) etkisi baskındır [29],[30].

Bölgeye özgü yapılan analizler sonucunda elde edilen sayısal bulgular aşağıda sunulmuştur. Bu veriler, önceki bölümlerde anlatılan teorik altyapının (Weibull dağılımı vb.) saha uygulamasıdır. Hat boyunca belirlenen kritik lokasyonlar için Weibull analizi sonuçları Tablo 2'de ve Şekil 6'da gösterilmiştir.

Tablo 2. İstasyon Bazlı Rüzgâr Karakteristikleri [17], [30]

İstasyon	Ortalama Hız [m/s]	Weibull (k)	Weibull (c) [m/s]	Potansiyel
Bababurnu	7,2	2,15	8,1	Yüksek
Ganos	6,8	2,08	7,6	İyi
Gelibolu	6,5	2,10	7,3	Orta
Süleymanpaşa (Tekirdağ)	5,9	1,95	6,7	Düşük



Şekil 6. Dört istasyon için Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonları (PDF)

3.2. Demiryolu cer enerji talebi

Denklem 2. ve Tablo 3'teki parametreler uygulandığında, hattın brüt yıllık cer enerji talebi hesaplaması bulunabilmektedir.

Tablo 3. Demiryolu cer enerji talebi için parametreler ve değerler

Parametre	Sembol	Değer
Güzergâh uzunluğu	L	200 km
Yük treni sefer sayısı (çift yön için)	N_f	50 tren/gün
Yük treni özgül cer tüketimi	SEC_f	50 kWh/tren-km
Yolcu treni sefer sayısı (çift yön için)	N_p	50 tren/gün
Yolcu treni özgül cer tüketimi	SEC_p	17,5 kWh/tren-km
İşletme günü	-	365 gün/yıl
Rejeneratif frenleme geri kazanımı	-	%20

Tablo 3 içerisindeki bilgiler, Tekirdağ-Malkara-Keşan-Gelibolu-Çanakkale Köprüsü güzergâhı içindir. Yük treni sefer sayısı, Orta Koridor yük taşımacılığı senaryosu kapsamında çift yönde günde 50 tren varsayılmış [1]; yolcu tarafında ise bölgesel yolcu hizmeti için yine çift yönde 50 sefer öngörülmüştür. Özgül cer tüketimleri, ~1500–2000 brüt tonluk elektrikli ağır yük treni (SEC_f) ile elektrikli bölgesel yolcu treni (EMU, SEC_p) için tipik literatür aralıklarından seçilmiştir [33]. İşletme günü tam yıl (365 gün) alınmış; rejeneratif frenleme geri kazanımı ise literatürde bildirilen %15–30 aralığı [27], [28] esas alınarak baz senaryoda %20 kabul edilmiştir. Denklem 2. çözüldüğü zaman aşağıdaki sonuca yani Denklem 11. eşitliğine ulaşılmaktadır.

$$E_{brüt} = 200 \cdot (50 \cdot 50 + 50 \cdot 17,5) \cdot 365 \approx 246,4 \text{ GWh/yıl} \quad (11)$$

Denklem 2. baz alındığında, günlük cer enerjisi yaklaşık 675 MWh'tir. Rejeneratif frenleme ile %20 baz geri kazanım varsayımı altında yıllık $\approx 49,3$ GWh (aralık: %15–30 için 37–74 GWh) geri kazanılabilir. Hatta ilişkin önerilen operasyonel ve enerji parametreleri Tablo 4'te özetlenmiştir. Günlük 50 yük ve 50 yolcu seferi, koridorun liman bağlantılı yük ve bölgesel yolcu potansiyeline dayalı orta (baz) düzey bir tasarım senaryosudur. Talebin bu varsayıma duyarlılığını göstermek üzere düşük, orta ve yüksek üç trafik senaryosu için brüt cer talebi Tablo 5'te verilmiştir. Özgül tüketim değerleri tipik elektrikli ağır yük treni ve EMU literatür aralıklarından seçilmiş olup $\pm\%20$ değişimde brüt talep orantılı değişmektedir.

Tablo 4. Hat için önerilen operasyonel ve enerji parametreleri

Parametre	Değer
Önerilen maksimum hız	120–140 km/h
Yıllık enerji tasarrufu potansiyeli	20–30 GWh
Rüzgâr optimizasyonu katkısı	%3–%10 ek tasarruf
Rejeneratif frenleme katkısı	%15–30 geri kazanım
Kritik rüzgâr hızı (mevsimsel ort.)	Kış: 7,8 m/s Yaz: 5,5 m/s

Tablo 5. Trafik senaryolarına göre brüt yıllık cer enerji talebi

Senaryo	Sefer (yük ve yolcu, çift yönlü)	Brüt cer talebi (GWh/yıl)	Karşılanabilirlik
Düşük	30 + 30	147,8	≈%100 (arz fazlası)
Orta	50 + 50	246,4	≈%79,2
Yüksek	70 + 70	345,0	≈%62

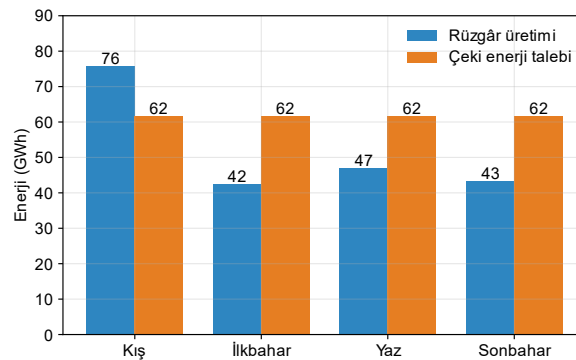
Tablo 4'teki yıllık enerji tasarrufu potansiyeli (20–30 GWh), rejeneratif geri kazanımın olmadığı geleneksel işletmeye kıyasla iki mekanizmanın birlikte katkısını temsil eder: işletme optimizasyonu (hız profili/zamanlama) ve rejeneratif frenleme; bu büyüklük, brüt talebin %20'si baz alınan rejeneratif geri kazanım (≈49,3 GWh; %15–30 için ≈37–74 GWh) ile tutarlıdır. Tablodaki '%3–%10 ek tasarruf' ise rüzgâr üretiminin çekiş yüküyle eşleştirilmesinin (üretim–tüketim örtüşmesi, tepe çekiş azaltımı) sağladığı ilave kazancı ifade eder.

3.3. Rüzgâr üretimi ve mevsimsel denge

Bababurnu için, Tablo 2'deki verilere dayanarak, 50 m'deki 7,2 m/s ortalama rüzgâr hızı, üs yasasıyla 80 m göbek yüksekliğine taşındığında yaklaşık 7,69 m/s'ye yükselir. Temsili 5 MW sınıfı bir türbinin güç eğrisi, bölgenin Weibull dağılımı ($k = 2,15$) ile birleştirildiğinde brüt kapasite faktörü yaklaşık %39 olarak hesaplanır. Dizilim (wake), kullanılabilirlik ve elektriksel kayıpların toplamı (≈%12) düşüldüğünde net kapasite faktörü yaklaşık %34'e denk gelir. Buna göre 70 MW kurulu güç için yıllık net rüzgâr üretimi yaklaşık 208,5 GWh'tir. Böylece kapasite faktörü bir girdi varsayımı değil, güç eğrisi ile bölge rüzgâr rejiminin birlikte değerlendirilmesinin sonucudur. Güç eğrisi yöntemiyle elde edilen net kapasite faktörü (≈0,34), Denklem 3'teki kapasite faktörü temelli basit tahminle tutarlıdır. Bababurnu mevsimsel güç yoğunluğu profili kullanılarak üretimin mevsimlere dağılımı ile cer talebinin karşılaştırması Tablo 6 ve Şekil 7'de verilmiştir [17]. Rüzgâr üretimi kış aylarında belirgin biçimde artmakta (yıllık üretimin yaklaşık %36'sı) ve bu dönem PV üretiminin zayıfladığı döneme denk gelerek tamamlayıcı bir profil oluşturmaktadır.

Tablo 6. Mevsimsel rüzgâr üretimi ve cer talebi dengesi

Mevsim	Güç yoğunluğu [17] (W/m ²)	Rüzgâr üretimi (GWh)	Cer talebi (GWh)	Üretim/Talep
Kış	374	75,8	61,6	1,23
İlkbahar	209	42,3	61,6	0,69
Yaz	232	47,0	61,6	0,76
Sonbahar	214	43,4	61,6	0,70
Yıllık	257 (ort.)	208,5	246,4	0,85

**Şekil 7.** Mevsimsel rüzgâr üretimi ile cer enerji talebinin karşılaştırılması

3.4. Karşılabilirlik ve senaryo analizi

Baz senaryoda, kullanılabilir rüzgâr 145,9 GWh ve rejeneratif geri kazanım 49,3 GWh olmaktadır. Eşleştirme faktörü η_m keyfi seçilmemiş; bir yıllık saatlik rüzgâr üretimi ve cer talebi serileri üst üste konularak, üretimin doğrudan ya da batarya üzerinden zaman kaydırmalı olarak talebe ulaşan oranı olarak hesaplanmıştır (baz senaryoda $\eta_m \approx 0,70$). Toplam talebin karşılanmasında bileşen katkıları Tablo 8'de verilmiştir. Yenilenebilir ve depolama karşılanabilirlik oranı Denklem 7. içerisinde verilmiştir. Bu denkleme Tablo 7 içerisindeki değerler yerleştirilerek üç senaryo incelenmiştir. 70 MW kurulu gücün yaklaşık 14 adet 5 MW sınıfı türbin ile sağlanabileceği ve REPA'nın işaret ettiği 863 km²'lik uygun alanda fiziksel olarak yerleştirilebilir olduğu görülmektedir.

Tablo 7. Senaryo analizi (karşılabilirlik oranı)

Senaryo	CF	η_m	Rüzgâr üretimi (GWh)	Karşılabilirlik oranı (%)
En kötü	0,30	0,55	184,0	61,1
Baz	0,34	0,70	208,5	79,2
En iyi	0,38	0,80	233,0	95,7

Tablo 8. Cer talebinin karşılanmasında bileşen katkıları (baz senaryo)

Bileşen	Enerji (GWh/yıl)	Talebin payı
Kullanılabilir rüzgâr (doğrudan + depolama)	145,9	%59
Rejeneratif frenleme geri kazanımı	49,3	%20
Toplam yenilenebilir + depolama	195,2	%79
Şebekeden çekilen	51,2	%21
Toplam cer talebi	246,4	%100

3.5. Türbin seçim önerisi

Bababurnu kuşağının orta–yüksek rüzgâr hızı (göbek (hub) yüksekliğinde ~8 m/s) ve $k \approx 2,1$ değeri dikkate alındığında; IEC Sınıf II/III aralığında, 4–6 MW güç sınıfında ve ~140–160 m rotor çaplı modern kara tipi türbinler uygundur. 70 MW'lık hedef kurulu güç, bu sınıfta 14 adet 5 MW türbin ile karşılanmaktadır, yaklaşık 4–5 km²'lik bir yerleşim alanına denk gelir. Kapasite faktörü ($\approx 0,34$) Bölüm 3.3'teki güç eğrisi hesabının çıktısıdır, bir girdi varsayımı değildir. Nihai türbin seçimi; saha bazlı türbülans, erişim ve mikro-konumlandırma çalışmalarını gerektirir.

3.6. Tekno-ekonomik bulgular

Denklem 8. ile hesaplanan ön tekno-ekonomik göstergeler Tablo 9'da sunulmuştur. Toplam yatırım maliyeti yaklaşık 115 milyon ABD doları; yıllık işletme-bakım maliyeti yaklaşık 2,6 milyon ABD doları; kaçınılan yıllık şebeke maliyeti yaklaşık 16,6 milyon ABD dolarıdır.

Tablo 9. Tekno-ekonomik analiz ve ön fizibilite göstergeleri

Kalem	Hesap yöntemi	Değer
Rüzgâr santrali CAPEX	1,3 M\$/MW · 70 MW	91,0 M\$
HESS – Li-ion	250 \$/kWh · 50 MWh	12,5 M\$

HESS – süperkapasitör	10.000 \$/kWh · 0,2 MWh	2,0 M\$
Şebeke entegrasyonu / BOP	Rüzgâr CAPEX'in %10'u	9,1 M\$
Toplam yatırım (CAPEX)	-	≈115 M\$
Yıllık işletme-bakım (OPEX)	Rüzgâr %2,5 + HESS %2	≈2,6 M\$/yıl
Kaçınılan yıllık şebeke maliyeti	195 GWh · 0,085 \$/kWh	≈16,6 M\$/yıl
Net yıllık fayda	-	≈14,0 M\$/yıl
Basit geri ödeme süresi	Brüt / net	≈6,9 / 8,2 yıl
LCOE (iskontolu; %8, 25 yıl)	-	≈6,4 €/kWh
LCOE (basit, iskontosuz)	-	≈3,4 €/kWh

3.7. CO₂ emisyon azaltımı

Yıllık 208,5 GWh rüzgâr üretiminin, ikame ettiği şebeke elektriğinin ortalama emisyon faktörü (0,48 kgCO₂/kWh [32]) ile çarpımı, Denklem 10. uyarınca yılda yaklaşık 100.100 ton kaçınılan CO₂ emisyonuna karşılık gelmektedir. Buradaki değer, rüzgâr üretiminin şebekedeki fosil kaynaklı üretimin yerini almasıyla elde edilen net azaltımı ifade eder; rüzgâr enerjisinin kendi yaşam döngüsü emisyonları düşük olmakla birlikte sıfır olmadığından, bu rakam üst sınır niteliğindedir. Yalnızca cer talebini ikame eden, yenilenebilir üretim ve depolamanın birlikte sağladığı pay (195 GWh) esas alındığında ise kaçınılan emisyon yaklaşık 93.700 ton/yıldır. Bu mertebedeki bir azaltım, projenin Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Emisyon hedefiyle uyumlu, anlamlı bir karbon azaltım katkısı sunabileceğine işaret etmektedir.

4. Tartışma

Bu çalışmanın bulguları, koridor ölçeğinde ve atlas ile literatür temelli bir modelin bölgesel bir rüzgâr kaynağını somut bir demiryolu talebiyle ilişkilendirebileceğini göstermektedir. Öngörülen brüt cer talebi (yaklaşık 247 GWh/yıl) ile Bababurnu kaynağı (yıllık ortalama 257 W/m², kış tepe değeri 374 W/m²) arasında olumlu bir zamansal tamamlayıcılık ortaya çıkmaktadır: rüzgâr üretimi, fotovoltaiik (PV) çözümlerin zayıfladığı kış aylarında tepe yaparken görece düz seyreden demiryolu talebiyle örtüşmektedir. PV ağırlıklı Türkiye çalışmaları [15], [16] ile genel/istasyon ölçekli entegrasyon derlemeleri [12], [14], [34] ile karşılaştırıldığında bu çalışma; açık ve yeniden üretilebilir varsayımlarla hat ölçeğinde uçtan uca bir talep–arz eşleştirmesi ve senaryo tabanlı karşılanabilirlik oranı (%61–%96) sunarak literatüre özgün bir katkı sağlamaktadır.

Karşılanabilirlik oranının yalnızca kurulu güçle değil, depolama ve işletme stratejisiyle de belirlendiği görülmektedir. Yüksek enerji yoğunluklu bataryalar ile yüksek güç yoğunluklu süperkapasitörleri birleştiren hibrit enerji depolama sistemi (HESS) mimarisi, demiryolu uygulamaları için literatürde önerilen yaklaşımlarla [26], [28], [38] uyumludur. Benzer biçimde, rejeneratif frenleme enerjisinin geri kazanımı ve komşu besleme bölgelerinde yeniden değerlendirilmesi [27], [36], [37] ile akıllı istasyonlarda yenilenebilir üretim, depolama ve PV birimlerinin birlikte yönetimi [35], bu çalışmada benimsenen %20 baz rejeneratif geri kazanım ve hat boyu (wayside) depolama varsayımlarını desteklemektedir. Bu karşılaştırma, önerilen entegrasyonun teknik bileşenlerinin mevcut literatürle tutarlı ve koridor ölçeğinde bütünleşik biçimde uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Ön tekno-ekonomik göstergeler, IRENA [22] ve NREL [21] tarafından raporlanan karasal rüzgâr maliyet aralıklarıyla ve hibrit yenilenebilir sistemlere ilişkin tekno-ekonomik çalışmalarla [40], [41] uyumludur; bu da kavramın ön fizibilite düzeyinde ekonomik olarak makul olduğunu desteklemektedir. Demiryolu modernizasyonunda elektrifikasyon ile hidrojen yakıt hücresi seçenekleri arasındaki ödünleşimi inceleyen çalışmalar [39] ışığında, rüzgâr destekli elektrifikasyon bu koridor için maliyet-etkin bir yol olarak öne çıkmaktadır. Seçilen hibrit çözüm, yalnızca rüzgâr verimliliğini değil bölgenin depremselliğini de gözettiğinden sürdürülebilir bir nitelik taşımakta; projeyi salt bir ulaşım yatırımından çok, Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Emisyon hedefiyle uyumlu stratejik bir enerji yönetimi projesine dönüştürmektedir.

Bu çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Analizler, gerçek saha (in-situ) ölçümleri yerine atlas (REPA, Global Wind Atlas) ve literatür verilerine dayanmaktadır. Türbinlerin hat boyunca mikro-konumlandırması yapılmamış; cer enerjisi talebi, hat henüz inşa edilmediğinden tipik özgül tüketim değerleriyle modellenmiştir. Ekonomik değerlendirme ise tam bir net bugünkü değer (NPV) ve iç verim oranı (IRR) analizi yerine ön fizibilite göstergeleriyle sınırlıdır. Bu sınırlılıklar, mutlak değerlerin kesinliğini etkilemekle birlikte, çalışmanın büyüklük mertebesindeki sonuçlarını ve ortaya konan mevsimsel tamamlayıcılığı değiştirmemektedir.

5. Sonuç

Bu çalışmanın sonuçları saha ölçümlerine değil, açık erişimli atlas verilerine ve literatürden alınan varsayımlara dayanmaktadır. Rüzgâr kaynağı REPA ve Global Wind Atlas verilerinden türetilmiş olup yerinde direk ölçümüyle doğrulanmamıştır. Cer enerjisi talebi, özgül tüketim değerlerine dayalı bir üst düzey modelle hesaplanmıştır ve gerçek hareket simülasyonu içermemektedir. Elde edilen %79'luk karşılanabilirlik oranı yalnızca baz senaryo varsayımları (günde 50+50 tren, 70 MW kurulu güç, 0,34 kapasite faktörü) altında geçerlidir ve duyarlılık analizlerinde gösterildiği gibi varsayımlara göre değişmektedir. Hattın brüt yıllık cer enerji talebi yaklaşık 247 GWh olarak öngörülmüştür. Baz senaryoda bu talebin %79'u rüzgâr enerjisi ve rejeneratif frenleme/hibrit depolama ile karşılanabilmekte, oran senaryolar arasında %61–%96 aralığında değişmektedir. Ön tekno-ekonomik değerlendirme yaklaşık 115 milyon ABD doları yatırım, ~7–8 yıl geri ödeme ve yılda ~100.000 ton kaçınılan CO₂'ye işaret etmektedir. Gelecek çalışmalarda (a) CBS tabanlı türbin mikro-konumlandırması, (b) gerçek tren enerji ölçümleriyle talep modelinin doğrulanması, (c) saatlik üretim–talep zaman serileriyle depolama boyutlandırmasının optimize edilmesi ve (d) gerçek proje verileriyle tam NPV/IRR analizi önerilmektedir. Bu adımlar, mevcut ön fizibilite bulgularını saha temelli ve finansmana uygun bir fizibiliteye taşıyacaktır. Ayrıca rüzgâr fazlasının yeşil hidrojene dönüştürülerek değerlendirilmesi, gelecekteki entegrasyon senaryoları için umut verici bir yön olarak öne çıkmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Raylı Sistemler Kontrol ve Otomasyon Laboratuvarı bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Katkıları ve destekleri için teşekkürler.

Kaynakça

- [1] T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, *2053 ulaşım ve lojistik ana planı*. Ankara, Türkiye: T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2022.
- [2] Güney Marmara Kalkınma Ajansı (GMKA), *TR22 Güney Marmara bölgesi 2024-2028 bölge planı*. Balıkesir, Türkiye: GMKA, 2023.
- [3] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Tekirdağ İl Müdürlüğü, "Karatepe mevki 1/1000 ölçekli uygulama imar planı açıklama raporu," Teknik Rapor, Tekirdağ, 2020.
- [4] V. Şahin ve Z. İnce, "Keşan'da nüfus ve yerleşme," *Keşan araştırmaları: Keşan'ın kurtuluşunun 100. yılı anısına*, F. Çalık Orhun ve B. İşçimen, Ed. Edirne, Türkiye: Trakya Üniversitesi Yayınları, 2021, ss. 267-284.

- [5] S. Özözen-Kahraman ve İ. Kahraman, "Coğrafi bilgi sistemleri ile Gelibolu yarımadası tarihi milli parkı'nda arazi kullanım analizi," *Akademik Bilişim 2008 Bildirileri*, 2008.
- [6] O. Yaşar, "Gelibolu yarımadası tarihi milli parkı'nda mevcut problemler ve çözüm önerileri," *Türk Coğrafya Dergisi*, 2014.
- [7] M. Siyako ve O. Huvaz, "Eocene stratigraphic evolution of the Thrace basin, Turkey," *Sedimentary Geology*, cilt 198, sayı 1-2, ss. 75-91, 2007, doi: 10.1016/j.sedgeo.2006.11.008
- [8] İ. Şengüler, *Ergene (Trakya) havzasının jeolojisi ve kömür potansiyeli*. Ankara, Türkiye: MTA, 2007.
- [9] M. E. Aksoy, M. Meghraoui, M. Vallée, ve Z. Çakır, "Rupture characteristics of the A.D. 1912 Mürefte (Ganos) earthquake segment of the North Anatolian fault (Western Turkey)," *Geology*, cilt 38, sayı 11, ss. 991-994, 2010, doi: 10.1130/G31447.1
- [10] AFAD, *Türkiye deprem tehlike haritası*. Ankara, Türkiye: AFAD, 2018.
- [11] T. H. Hançer, "Şarköy - Mürefte (1912) depreminin Osmanlı basınına yansımaları," *Anadolu ve Balkan Araştırmaları Dergisi*, cilt 7, sayı 14, ss. 241-262, 2024. doi: 10.32953/abad.1425116
- [12] S. V. Mitrofanov, N. G. Kiryanova, ve A. M. Gorlova, "Stationary hybrid renewable energy systems for railway electrification: A review," *Energies*, cilt 14, sayı 18, s. 5946, 2021, doi: 10.3390/en14185946
- [13] Deutsche Bahn AG, *Integrated report 2024*. Berlin, Germany: Deutsche Bahn AG, 2024.
- [14] M. Davoodi, H. Jafari Kaleybar, M. Brenna, ve D. Zaninelli, "Energy management systems for smart electric railway networks: A methodological review," *Sustainability*, cilt 15, sayı 16, s. 12204, 2023, doi: 10.3390/su151612204
- [15] M. Sertsöz, M. Fidan, ve M. Başaran, "Tramvayın güneş enerjisi destekli bir mikro şebekeye entegrasyonu," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, sayı 50, ss. 79-84, 2023. doi: 10.31590/ejosat.1235995
- [16] M. Fidan ve M. Sertsöz, *Determination of solar energy usage rate, reliability, and efficiency for different trips of high-speed train*, Demiryolu Mühendisliği, sayı 16, ss. 116-127, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1128853.
- [17] A. İlhan, M. Bilgili, ve B. Şahin, "Statistical analysis of wind energy density in the Bababurnu-Çanakkale region of Turkey," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 33, sayı 1, ss. 17-26, 2018. doi: 10.21605/cukurovaummfd.420385
- [18] İ. Alagöz, *Rüzgar elektrik santralleri kontrol algoritmaları*. Ankara, Türkiye: Akademisyen Kitabevi, 2021. doi: 10.37609/akya.723
- [19] World Wind Energy Association, "WWEA yıllık raporu 2024," 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://wwindea.org/Annual_Report2024 [Erişim Tarihi: Şubat 2026]
- [20] J. F. Manwell, J. G. McGowan, ve A. L. Rogers, *Wind energy explained: Theory, design and application*. Chichester, Birleşik Krallık: Wiley, 2010. doi: 10.1002/9781119994367
- [21] Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL), "Cost of wind energy review," ABD Enerji Bakanlığı, Golden, CO, Rap. NREL/TP-5000-84601, 2024. doi: 10.2172/2479271
- [22] Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA), *Renewable power generation costs in 2023*. Abu Dabi, BAE: IRENA, 2024.
- [23] E. Hau, *Wind turbines: Fundamentals, technologies, application, economics*. Berlin, Almanya: Springer, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-27151-9
- [24] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe ve E. Bossanyi, *Wind energy handbook*, 2. baskı. Wiley, 2011, doi: 10.1002/9781119992714.
- [25] H. Polinder, F. F. A. van der Pijl, G. J. de Vilder, ve P. J. Tavner, "Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines," *IEEE Trans. Energy Convers.*, cilt 21, sayı 3, ss. 725-733, 2006, doi: 10.1109/TEC.2006.875476
- [26] X. Liu ve K. Li, "Energy storage devices in electrified railway systems: A review," *Transportation Safety and Environment*, cilt 2, sayı 3, ss. 183-201, 2020, doi: 10.1093/tse/tdaa016.
- [27] M. Khodaparastan, A. A. Mohamed ve W. Brandauer, "Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, cilt 20, sayı 8, ss. 2831-2847, 2019, doi: 10.1109/TITS.2018.2886809.
- [28] N. Ghaviha, J. Campillo, A. Bohlin, ve E. Dahlquist, "Review of application of energy storage devices in railway transportation," *Energy Procedia*, cilt 105, ss. 4561-4568, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.980
- [29] MGM, "Rüzgâr enerji potansiyel atlası (REPA), Çanakkale ve Tekirdağ rüzgâr verileri," 2007. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.mgm.gov.tr> [Erişim Tarihi: Şubat 2026]
- [30] Global Wind Atlas 3.0, "Türkiye Rüzgar Kaynakları Haritası," Technical University of Denmark (DTU). [Çevrimiçi]. Available: <https://globalwindatlas.info> [Erişim Tarihi: Şubat 2026].

- [31] U.S. Department of Energy, "How do wind turbines work?," Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work>. [Erişim Tarihi: Şubat 2026].
- [32] TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim A.Ş.), *Türkiye elektrik üretim-iletim istatistikleri*. Ankara, Türkiye: TEİAŞ, 2023.
- [33] International Energy Agency (IEA), *The future of rail: Opportunities for energy and the environment*. Paris, Fransa: IEA, 2019.
- [34] J. Zuo, L. Dong, F. Yang, Z. Guo, T. Wang ve L. Zuo, "Energy harvesting solutions for railway transportation: A comprehensive review," *Renewable Energy*, cilt 202, ss. 56–87, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2022.11.008.
- [35] S. Akbari, S. Saeed Fazel ve H. Hashemi-Dezaki, "Energy management of networked smart railway stations considering regenerative braking, energy storage system, and photovoltaic units," *Energy Engineering*, cilt 120, sayı 1, ss. 69–86, 2023, doi: 10.32604/ee.2022.024121.
- [36] L. Wu ve M. Wu, "Utilisation of regenerative braking energy in adjacent power sections of railway systems," *IET Electric Power Applications*, cilt 18, sayı 2, ss. 174–184, 2023, doi: 10.1049/elp2.12378.
- [37] J. Chen, H. Hu, Y. Ge, K. Wang, W. Huang ve Z. He, "An energy storage system for recycling regenerative braking energy in high-speed railway," *IEEE Transactions on Power Delivery*, cilt 36, sayı 1, ss. 320–330, 2021, doi: 10.1109/tpwr.2020.2980018.
- [38] A. Szeląg, W. Jefimowski, T. Maciołek, A. Nikitenko, M. Wiczorek ve M. Lewandowski, "Hybrid energy storage system for regenerative braking utilization and peak power decrease in 3 kV DC railway electrification system," *Electronics*, cilt 14, sayı 9, s. 1752, 2025, doi: 10.3390/electronics14091752.
- [39] Y. Zhang, Z. Tian, K. Jiang, S. Hillmansen ve C. Roberts, "Local and global sensitivity analysis for railway upgrading between hydrogen fuel cell and electrification," *High-speed Railway*, cilt 2, sayı 4, ss. 219–229, 2024, doi: 10.1016/j.hspr.2024.11.002.
- [40] A. Faisal ve N. Anwer, "Optimization and techno-economic analysis of hybrid renewable energy systems for the electrification of remote areas," *Wind Engineering*, cilt 48, sayı 3, ss. 365–383, 2023, doi: 10.1177/0309524x231210266.
- [41] Y. Kikuchi ve T. Ishihara, "Availability and LCOE analysis considering failure rate and downtime for onshore wind turbines in Japan," *Energies*, cilt 14, sayı 12, s. 3528, 2021, doi: 10.3390/en14123528.

Özgeçmiş



İbrahim Can KOLOTOĞLU

İTÜ Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimini sürdürmektedir. Yenilenebilir enerji ve raylı sistemlerin sinyalizasyonu konularında çalışmalarını sürdürmektedir. Serbest yazarlık yapmaktadır.

E-Posta: kolotoglu21@itu.edu.tr



Mehmet Turan SÖYLEMEZ

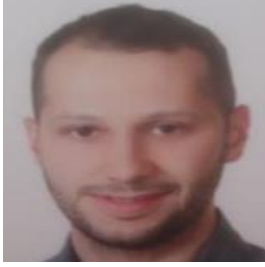
2000 yılından beri İTÜ öğretim üyesi olup 2024 yılından itibaren İTÜ Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölüm başkanlığı görevini üstlenmektedir. 2013 ve 2025 yılları arasında Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı başkanlığı görevini yürütmüştür.

E-Posta: soylemezm@itu.edu.tr

**Serhat BOYNUKALIN**

2015 yılından itibaren İTÜ Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı'nda görev yapmaktadır. 2024 yılında doktorasını tamamlamıştır. Raylı Sistemlerin Mühendisliği alanında ders vermektedir.

E-Posta: boynukalin@itu.edu.tr

**Taha YÜKSEL**

İTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde görev yapmaktadır. Demiryolu, kentiçi raylı sistemler alanlarında çalışmalar yürütmektedir. İnşaat Mühendisliği Bölümü kapsamında Demiryolu Mühendisliği dersini vermektedir.

E-Posta: yukselt@itu.edu.tr

**Muhammet IŞIK**

İTÜ Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği mezunu olup endüstriyel otomasyon ve emniyet kritik sistem mimarisi alanlarında çalışmalar yürüten bir teknik çözüm mühendisidir.

E-Posta: isikmuhamm@gmail.com

Beyanlar:

Bu çalışmanın hazırlanması sürecinde, yapay zekâ tabanlı araçlardan yalnızca yazım dili, dilbilgisi ve anlatımın iyileştirilmesi amacıyla yararlanılmıştır. Yapay zekâ araçları, literatür taraması, çalışmanın bilimsel içeriğinin oluşturulması, veri analizi, sonuçların elde edilmesi veya yorumlanması süreçlerinde kullanılmamıştır. Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: İbrahim Can KOLOTOĞLU: Kaynaklar, Doğrulama, Metodoloji, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Mehmet Turan SÖYLEMEZ: Kontrol, Doğrulama, Gözden geçirme. Serhat BOYNUKALIN: Gözden geçirme, Metodoloji, Düzenleme. Taha YÜKSEL: Gözden geçirme. Muhammet IŞIK: Kaynaklar, Metodoloji.