



SIFIR ENERJİ KONSEPTLİ BİNALARDA ENERJİ OPTİMİZASYON

ENERGY OPTIMIZATION FOR NEARLY ZERO ENERGY BUILDINGS (NZEB) CONCEPT

Hacer GEDİZ TAŞKIN^{*1} Hamza Feza CARLAK²

¹ ALPHA HVAC INDUSTRIES DOO, Montenegro.

² Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye.

ABSTRACT

Airports have a critical importance in the international air transportation system, as they provide the connection of the region to other points and most importantly, because of the contribution they make to the development of the region in which they are located. Airports no longer consist solely of aviation-related functions (e.g. passenger, cargo and aircraft handling facilities); It has developed to include shopping and hotel complexes, conference facilities, industrial zones, logistics centres and public transportation centres. With this complex and mega structure, studies on reducing harmful emissions, clean and green energy concepts, reducing carbon footprint, meeting the requirements of green building certifications such as NZEB, LEED, BREEAM have become critical. In addition to these concepts, the Airport Carbon Accreditation (ACA) program, specific only to airport structures, can also be preferred for airports.

All these concepts and areas of influence aim to make a positive contribution to global climate change. The aim of this thesis is to reduce the current carbon footprint by turning to cleaner and greener energy in an airport operation with a significant volume of real-time energy consumption and production, and to obtain LEED and BREEAM certification, and NZEB architecture so that the consumed energy can be met from clean energy sources produced or planned to be produced within the scope of the project. It aims to carry out an optimization study based on the requirements. Consumption analyses, architectural structure, window and glass areas, energy use and CO₂ amount, heating, cooling, domestic water installation, air conditioning and ventilation and wastewater treatment systems, domestic water systems, electricity and energy centre systems will be examined, and designs will be made after the current situation analysis, and suggestions will be presented. A hybrid machine learning model predicting future energy consumption has been developed, and impact analyses of the proposed recommendations have been carried out.

Keywords: BREEAM, Energy Optimization, LEED, NZEB, Machine Learning.

ÖZET

Havalimanları, uluslararası hava taşımacılığı sisteminde, bulunduğu bölgenin başka noktalara bağlantısını sağlamak için ve en önemlisi bulunduğu bölgenin gelişimine sağladığı katkı sebebi ile kritik bir öneme sahiptir. Havalimanları artık sadece havacılıkla ilgili işlevlerden (örneğin yolcu, kargo ve uçak taşıma tesisleri) oluşmuyor; alışveriş ve otel komplekslerini, konferans tesislerini, sanayi bölgelerini, lojistik merkezlerini ve toplu taşıma merkezlerini de içerecek şekilde gelişmiştir. Bu kompleks ve mega yapısıyla zararlı emisyonların azaltılmasına yönelik çalışmalar, temiz ve yeşil enerji kavramları, karbon ayak izinin azaltılması, NZEB, LEED, BREEAM gibi yeşil bina sertifikasyonlarının gerekliliklerin sağlanması kritik öneme sahip hale gelmiştir. Bu kavramların yanı sıra sadece havalimanı yapılarına özel Havalimanı Karbon Akreditasyon (ACA) programı da havalimanları için tercih edilebilir.

Tüm bu kavramlar ve etki alanları küresel iklim değişikliğine olumlu katkı sağlamayı hedeflemektedir. Bu çalışmanın amacı, gerçek zamanlı enerji tüketimi ve üretimi olarak önemli bir hacme sahip bir havalimanı işletmesinde, daha temiz ve yeşil enerjiye yönelerek, mevcut karbon ayak izini azaltmak ve tüketilen enerjinin üretilen ya da proje kapsamında üretilmesi planlanan temiz enerji kaynaklarından karşılanabilmesi için LEED ve BREEAM sertifikasyon gereklilikleri ve NZEB mimarisi baz alınarak bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmesi hedeflemektedir. Tüketim analizleri, mimari yapı, pencere ve cam alanları, enerji kullanımı ve CO₂ miktarı, ısıtma ve soğutma, kullanma suyu tesisatı, iklimlendirme ve havalandırma ve atık su arıtma sistemleri, kullanma suyu sistemleri, elektrik ve enerji merkezi sistemleri incelenerek, mevcut durum analizleri sonrası tasarımlar yapılmış ve öneriler sunulmuştur. Geleceğe yönelik enerji tüketimi tahmini yapan hibrit makine öğrenimi modeli oluşturularak, sunulan önerilerin etki analizleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: BREEAM, Enerji Optimizasyonu, LEED, NZEB, Makine Öğrenimi.

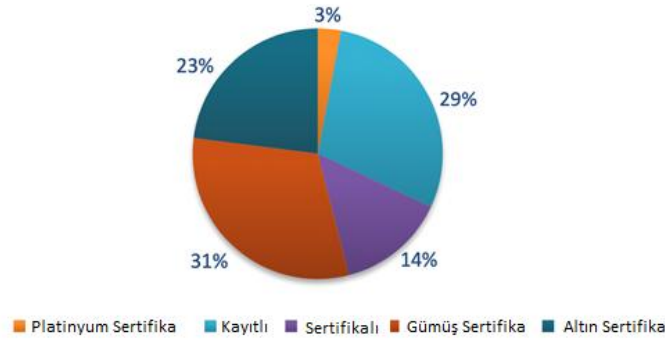
*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: hacergediz@gmail.com

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
09.01.20254	19.01.2025	28.01.2025	01.06.2025

1. GİRİŞ

Havalimanları, günümüzde büyük karbon ayak izi oluşturan tesisler arasında önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle, havalimanlarının çevresel etkilerini azaltmak ve sürdürülebilir bir yapıya dönüştürmek, modern dünyanın önceliklerinden biridir. Bu amaçla, havalimanları LEED, BREEAM, ACA gibi çeşitli sürdürülebilirlik sertifikasyonlarına yönelmektedir.

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), çevre dostu binaların tasarımı, inşası ve işletilmesi için uluslararası bir sertifikasyon sistemi olarak öne çıkar. Havalimanları da LEED sertifikasını elde ederek enerji verimliliği, su tasarrufu, atık yönetimi gibi alanlarda belirli standartları karşılamakta ve çevresel etkilerini azaltmaktadır (Şekil 1) [1].



Şekil 1. LEED Sertifikasına Sahip Dünyanın Havalimanı Komplekslerinin Şeması [1]

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) ise İngiltere merkezli bir sürdürülebilirlik derecelendirme sistemi olup bina çevresindeki olumlu etkileri değerlendirir. Havalimanları, BREEAM sertifikasyonunu elde ederek yeşil alanların korunması, çevre dostu ulaşım alternatiflerinin teşvik edilmesi gibi unsurlara odaklanarak çevresel performanslarını artırabilir [2].

NZEB gerekliliği, AB ülkelerinde 1 Ocak 2030'dan itibaren tüm yeni binalara, 1 Ocak 2027'den itibaren ise kamu yetkilileri tarafından kullanılan veya sahip olunan tüm yeni binalara uygulanacaktır. Teklifin odak noktası operasyonel sera gazı emisyonlarının azaltılması olsa da ZEB tanımı ayrıca yaşam döngüsü Küresel Isınma Potansiyelinin (GWP) hesaplanmasını ve bunun binanın enerji performans sertifikası aracılığıyla açıklanmasını içermektedir. Bu gereklilik, AB ülkelerinde 1 Ocak 2027 tarihinden itibaren kullanılabilir taban alanı 2000 metrekareden büyük olan tüm yeni binalar için ve 1 Ocak 2030 tarihinden itibaren tüm yeni binalar için geçerli olacaktır [3].

Türkiye'de NZEB kavramı çok yaygın olmamakla birlikte, direktifler ile zorunlu hale getirilmemiştir. Ancak, sürdürülebilirlik hedefleri olan havalimanı gibi büyük ticari işletmelerde gerekliliklerin sağlanması büyük önem arz etmektedir.

Havaalanı Karbon Akreditasyonu (ACA), havalimanları için kurumsal olarak onaylanmış tek küresel karbon yönetimi sertifikasyon programıdır. Havalimanlarının karbon emisyonlarını yönetme ve azaltma çabalarını 7 sertifika seviyesi aracılığıyla bağımsız olarak değerlendirir ve tanıır: 'Seviye 1- Haritalama', 'Seviye 2- Azaltma', 'Seviye 3- Optimizasyon', 'Seviye 3+- Nötrlük', 'Seviye 4- Dönüşüm', 'Seviye 4+- Geçiş' ve 'Seviye 5' [4].

NZEB, LEED, BREEAM kavramlarına ek olarak havalimanlarının karbon ayak izi azaltılmasına yönelik tek küresel sertifikasyon programı olan, havalimanı karbon akreditasyonu (ACA) programının gereklilikleri, seviyeleri ve ana kriterlerini incelenmesi sonrası, dört farklı kavramın karşılaştırılması yapılacaktır. Karbon akreditasyonu, havalimanlarının çevresel performanslarını ölçmek ve iyileştirmek için bir fırsat sunmaktadır. Havalimanlarındaki LEED ve BREEAM sertifikasyonları ile karbon azaltma stratejilerinin etkinliği incelenebilir ve sürdürülebilirlik alanında yeni fırsatlar keşfedilebilir.

Literatür taraması aşamasında, havalimanlarında karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik yapılan çalışmaların genellikle havalimanına bağlı bulunan ek binalarda ya da küçük yapılarda yoğunlaştığı görülmüştür. Havalimanının birden fazla terminalinin iç yapısında yapılacak enerji verimliliği ve karbon ayak izi azaltma çalışmaları tek tek incelenerek elde edilecek enerji verimliliği faydası ve karbon ayak izi azaltma miktarı hesaplanmıştır [1, 5-19].

Geleceğe yönelik gerçekleştirilecek enerji tüketimleri, elde edilecek enerji verimliliğinin belirlenmesinde, sertifikasyon kriterlerinde ve önerilecek verimlilik projelerinin sürdürülebilirliği için önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle NZEB mimarisinde tüketilecek enerjinin temiz enerji kaynaklarının üretiminden karşılanabiliyor olması esastır. Bu sebeple, geleceğe yönelik enerji tüketimi tahmini yapan başarılı bir hibrit makine öğrenimi modeli geliştirilmiştir. Bu modelde her bir terminal için 12 ayrı model geliştirilip, 12 ayrı modelin birleşimi ile hibrit bir makine öğrenimi modeli oluşturulmuştur.

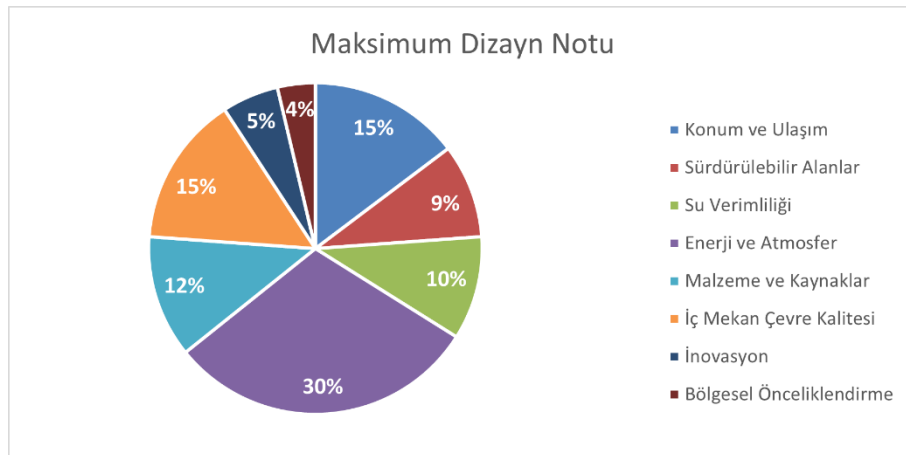
2. MATERYAL VE METOT

LEED, BREEAM, ACA ve NZEB kavramları, kredi başlıkları ve içerikleri, puanlamaları, havalimanlarında örnek yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmaların sürdürülebilirlik ve karbon ayak izinin azaltılması hedeflerine katkıları değerlendirilmiştir. Havalimanı kompleksinde NZEB, LEED ve ACA için yapılan inovasyon çalışmaları detaylandırılacak, enerji verimliliğine, sürdürülebilirliğe, karbon ayak izine katkıları hesaplanmıştır.

Çalışma sırasında, mevcut durum analizleri için çeşitli cihazlar kullanılmıştır. Bu cihazlar arasında enerji analizörü, termal kamera (FLIR T400, USA), lüksmetre (LUTRON LX-1108, USA), dijital fark basınç transmitteri, sıcaklık ölçer (TESTO, Almanya), baca gazı analizörü (ECOM, Almanya), ultrasonik debimetre (GE, USA), stroboskop (LUTRON, Taiwan), iletkenlik ölçer (LUTRON, Taiwan) bulunmaktadır. Bu cihazlar, verimlilik hesaplamaları için ölçümler yapmada kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında havalimanının mimari yapısı, bina durumu, yapı bileşenleri ve malzemeleri, konstrüksiyon detayları, pencere ve cam alanlar, enerji kullanımı ve CO2 miktarı, ısıtma, iklimlendirme, havalandırma ve soğutma sistemleri, tesisatlar, aydınlatma sistemleri, transformatörler, elektrik motorları, elektrikli cihazlar ve ofis ekipmanları, bina otomasyon sistemleri, fan sistemleri, pompa sistemleri, yalıtım sistemleri, bina enerji performansı mevcut durumları incelenerek, verimlilik artırıcı çözümler belirlenmiştir. Belirlenen projeler ile ACA, LEED sertifikasyon puanlamalarına katkıları ve NZEB mimarisine katkıları hesaplanmıştır.

Mevcut durum analizleri öncesinde istatistiksel olarak hangi kredi puanının katkısının daha çok olacağı incelenmiş ve toplam puan içerisindeki yoğunluk yüzdeleri Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kredi Maddesi Yoğunluk Oranları

LEED ve BREEAM kapsamında belirtilen her bir puanlama kriteri ayrı uzmanlık alanı gerektirmektedir. Enerji ve atmosfer puanlama kriterinin katsayı olarak en büyük katsayıya sahip olması ve NZEB mimarisinde enerjinin en önemli ana konulardan biri olması sebebi ile bu çalışma içerisinde enerji optimizasyonu konusuna odaklanılmıştır. Enerji optimizasyonu için, tüketimi azaltan, verimliliği

arttıran ve çevresel etkiyi azaltan yöntemler kullanılmıştır. Enerji optimizasyonunun önemli bir parçası olan, enerji tüketim tahmini için makine öğrenimi modeli kullanılmıştır. Makine öğrenimi modeli olarak veri setine en uygun olduğu düşünülen doğrusal regresyon modeline dayalı ridge regresyon ve karar ağacı temelli random forest makine öğrenimi modelleri kullanılmıştır. Verilerimizin doğrusal olduğundan emin olunmaması sebebi ile modelin genelleme yeteneği yüksek olan doğrusal olmayan ilişkileri yakalayabilen random forest modelinin de kullanılmasına karar verilmiştir.

Daha az enerjiyle daha fazla iş yapılmasını sağlayan enerji verimliliği teknolojileri ve stratejileri belirlenmiştir. Bu kapsamda fayda maliyet analizleri ve yatırım geri dönüş süreleri hesaplanmış olup, enerji optimizasyonu için öncelikli yatırımlar belirlenmiştir. Fayda maliyet analizleri kapsamında, doğrudan maliyetler ve dolaylı maliyetler belirlenmiştir. Faydaların finansal değeri (1) bağlantısı ile hesaplanmıştır.

$$NPV = \sum \frac{Faydalar_t}{(1+r)^t} - \sum \frac{Maliyetler_t}{(1+r)^t} \quad (1)$$

Bu denklemde NPV, İndirgenmiş değer (Net Present Value), Faydalar_t, t yılındaki faydalar, Maliyetler_t, t yılındaki maliyetler, r iskonto oranı, t yıl sayısı'nı ifade eder.

NPV'nin pozitif olması halinde, önerilen verimlilik projesinin toplam faydası maliyetinden daha fazla olup, ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Yatırım geri dönüş süresi hesaplaması için, her bir proje önerisinin yatırım maliyetleri ve yatırımın her yıl sağladığı nakit akışı (2) bağlantısı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Geri Ödeme Süresi} = \frac{\text{Yatırım Maliyeti}}{\text{Yıllık Nakit Akışı}} \quad (2)$$

Enerji optimizasyonu kapsamında, termal konfor ve karbon ayakizi azaltımı ölçümleri de yapılmıştır. Karbon ayak izi hesaplaması, enerji tüketimine bağlı olmak üzere (3) bağlantısı baz alınarak hesaplanmıştır.

$$CO_2 \text{ Emisyonu} = \text{Enerji Tüketimi} \times \text{Emisyon Faktörü} \quad (3)$$

Burada, enerji tüketimi TEP (Ton Eşdeğer Petrol) cinsinden enerji tüketimi miktarını, emisyon faktörü birim enerji tüketimi başına salınan CO₂ miktarını ifade eder. Bu faktör, kullanılan enerji türüne bağlı olarak değişmektedir. Kullanılan emisyon faktörleri Çizelge 1'deki gibidir.

Çizelge 1. Emisyon Faktörü Tablosu

Yakıt Tipi	Emisyon Faktörü (CO ₂) (kg/GJ)
Petrol	72,6
Benzin	68,6
Fuel Oil	76,6
Dizel	69
Diğer Petrol Ürünler	72,6
Antrasit	96,3
Kok Kömürü	92,7
Taşkömürü	92,7
Linyit	99,2
Kok Gazı	106
Doğal Gaz	55,8
Elektrik	153,6
1 TEP = 41,868 GJ	

Mevcut durum analizleri sonrası, geleceğe yönelik gerçekleşecek enerji tüketimleri tahmini yapan makine öğrenimi modeli geliştirilmiştir. Enerji tüketim verisinin, elde edilecek enerji verimliliğinin belirlenmesinde, sertifikasyon kriterlerinde ve önerilecek verimlilik projelerinin sürdürülebilirliği için önemli bir rol oynaması sebebi ile enerji tüketim tahmini yapan hibrit makine öğrenimi modeli oluşturulmuştur.

Bu tekniğin genel metodolojisi şu şekildedir: Temel modelin tahminleri, yeni bir özellik olarak meta-model girdi verisi olarak eklenmektedir. Bu durumda, modelin tahminleri, bir sonraki modelin tahminini iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır.

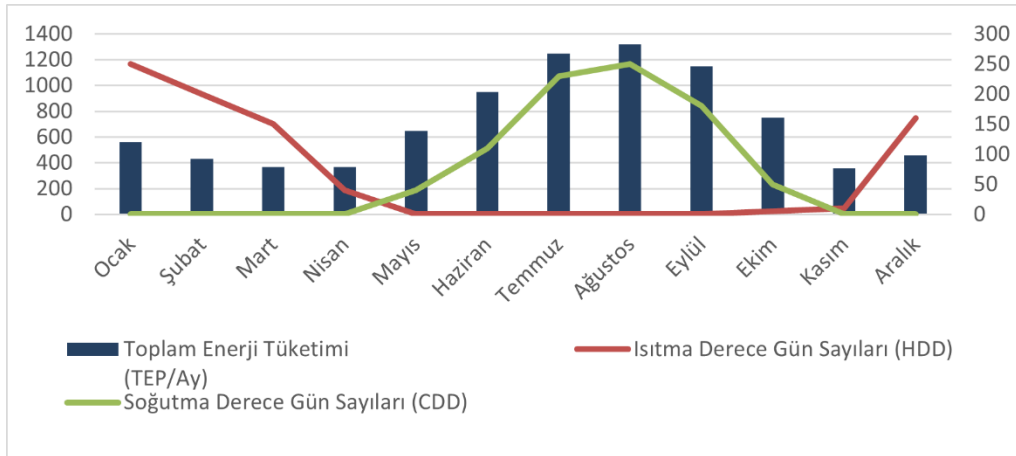
İlk olarak, temel model seçilmektedir ve bu model eğitilmektedir. Bu modelin tahminleri daha sonra, modelin girdi özelliklerinden biri olarak kullanılmaktadır. Son adımda, meta-modelin yaptığı tahminler veya düzeltmeler ile temel modelin tahminleri birleştirilmektedir. Böyle bir hibrit model kullanılmasının sebebi, genellikle daha doğru ve sağlam tahminler sağlamasıdır.

3.BULGULAR VE TARTIŞMA

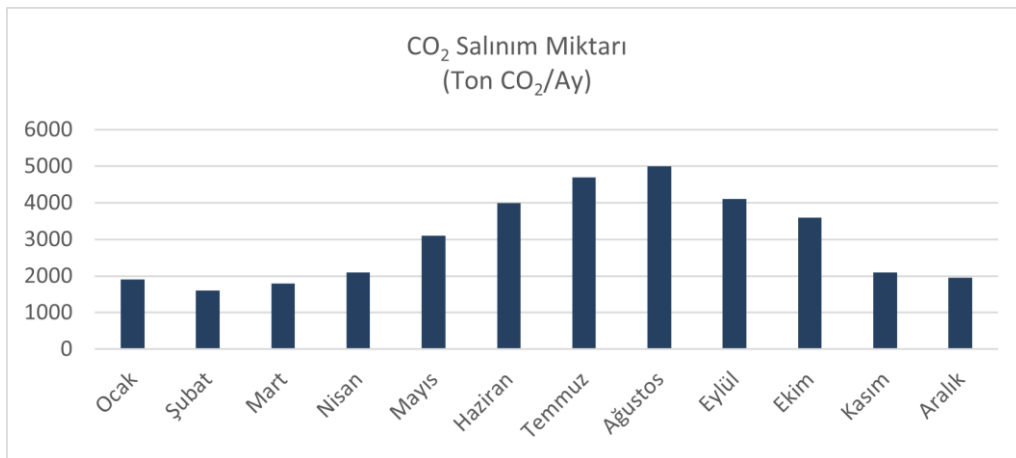
3.1. Mevcut Durum Analizleri

Tüketilen enerjinin havalimanı bölümlerine kırılımları incelenmiş olup, %18 Terminal 1, %21 Terminal 2, %14 Terminal 3 ve %47 diğer bölümler olduğu tespit edilmiştir.

Aylara sarıh toplam enerji tüketimi, ısıtma ve soğutma sistemlerinin etkileri incelenmiş olup kıyaslama grafiği Şekil 3'te ve karbondioksit salınım miktarı Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Isıtma-Soğutma-Tüketim Karşılaştırması



Şekil 4. Karbondioksit Salınım Miktarı

Mevcut durum analizlerinde verimlilik projelerinin belirlenebilmesi amacıyla, ısıtma ve soğutma sistemlerindeki ısı pompalarının verimliliklerine, tesisat elemanlarındaki izolasyon eksikliklerine, kazanların baca gazı analizlerindeki O₂ miktarına ve baca gazı sıcaklıklarına ölçümlenmiştir. İstenen verimlilikte çalışmayan tesisat elemanları tespit edilip iyileştirme projeleri oluşturulmuştur. Belirlenen iyileştirme projeleri ile toplam 35 TEP/Yıl tasarruf sağlanacağı hesaplanmıştır. 129,7 ton/yıl karbondioksit azalma miktarı hesaplanmıştır.

Bazı noktalarda floresan ve metal hali de aydınlatmalarının lux değerinde değişiklik olmadan LED lambalar ile değiştirilmesi iyileştirme projeleri içerisine dahil edilmiştir. Proje, yaklaşık 4100 armatür değişimini kapsamaktadır.

Havalimanı ve ek tesislerde elektriksel gücün mekanik güce çevrilmesi amacıyla kullanılan tüm AC pompa, fan ve kompresör motorlarının verimlilikleri incelenmiş olup, düşük verimliliğe sahip motorların değiştirilmesi iyileştirme projeleri içerisine dahil edilmiştir.

Havalimanında kullanılan tüm trafoların etiket değerlerine bakılmış, tüm yükleri incelenmiş olup, yüklenme oranlarının %14-42 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Trafolardaki kayıplar boşta kayıplar (demir kayıpları) ve yükte kayıplar (bakır kayıpları) olmak üzere analiz edilmiştir. Trafoların verimliliğin yüksek olması ve yüklenme oranlarının az olması sebebi ile iyileştirme projesine dahil edilmemiştir.

Ölçüm sonuçlarında, hatlarda gerilim dengesizliği ile ilgili bir problem olmadığı görülmüştür. Gerilim dengesizliği sınır değer olan %1'in çok altındadır. Herhangi bir verimsizliğe neden olacak seviyede değildir.

Yapıda kullanılan AC motorların bazıları, sürücüler ile çalıştırılmaktadır. AC sistemlerin hız kontrolü sayesinde hem enerji tasarrufu sağlanmakta hem de verimlilik artırılmaktadır. AC motorlarda en büyük tasarruflar sistem kontrollerinde gereksiz çalışma durumlarında kapatılması veya hızlarının düşürülmesi şeklinde olabilir.

Binaların kullanım suyu ihtiyacını karşılamak amacı ile pompa sistemleri kullanılır. Yapılan mevcut durum analizlerinde, ölçümlerde hidrofor pompalarının verimliliklerinin düşük olduğu (ortalama %36) tespit edilmiş olup, iyileştirme projeleri içerisine dahil edilmiştir.

Mevcut durum analizleri sonrası, geleceğe yönelik gerçekleşecek enerji tüketimleri tahmini yapan makine öğrenimi modeli geliştirilmiştir. Enerji tüketim verisinin, elde edilecek enerji verimliliğinin belirlenmesinde, sertifikasyon kriterlerinde ve önerilecek verimlilik projelerinin sürdürülebilirliği için önemli bir rol oynaması sebebi ile enerji tüketim tahmini yapan hibrit makine öğrenimi modeli oluşturulmuştur.

Modelde toplam 37 aylık veri bulunmaktadır. 12 ay veri eğitim için, diğer 12 aylık veri validasyon için ve son 12 aylık veri ise test için kullanılmıştır. Geriye kalan 1 aylık veri ise tahminler ile gerçekleşen verilerin kontrolü için kullanılmıştır. Özellik mühendisliği (feature engineering) yapılmıştır. Bir tarih verisinin elimizde olması sebebi ile, ham verimizden saat, gün ve ay gibi özellikler kod ile çıkarılmıştır. One hot encoding ile trend eklenmiştir. Mevsimsel olarak modelin trendi algılamasını sağlanmıştır. Bu sayede, saat, gün ve ay özelliklerine mevsim özelliği de eklenmiştir. Zamanla artan tüketim durumu söz konusu olması halinde bu durumu trend (eğilim) ile yakalayabilmek için eklenmiştir. Zaman serisi verileri üzerinde yapılan analizlerde, geçmiş veriler önemli bir etkiye sahiptir. Geçmiş verilerin gelecekteki tahminlere nasıl etki ettiğini modellemek için çok önemli bir tekniktir. "Get lag" yöntemiyle geçmiş zaman dilimlerinden elde edilen verileri, modelin daha iyi öğrenmesini sağlamak için özellikler (features) olarak kullanılmıştır. Bu sayede 1 saat öncesinden başlayarak geçmiş tüm veriler "n" saat önceye kadar kullanılmıştır. Bu yeni özellikleri, makine öğrenimi modelinin zaman serisi verilerini daha iyi anlamasına yardımcı olması için kullanılmıştır.

Makine öğreniminin üçüncü aşaması olan model seçimi ve eğitim aşamasında, geleceğe yönelik saatlik bazda enerji tüketim tahmini için, random forest ve ridge regresyon makine öğrenimi modelleri seçilmiştir. Lineer regresyon yerine ridge seçilmesinin sebebi, aşırı uyumu (overfitting) engelleyen L2 normu eklemesi ve çoklu doğrusal bağlantılarda kullanılmaya daha uygun olmasıdır. Random forest modelinin zaman serisi verimizde kullanabilmek adına, verimiz özellik mühendisliği aşamasında

kullanıma hazır hale getirilmiştir. Zaman serisi modeller sıralı ve bağımlı verilerdir fakat random forest sırasız verilere dayalı bir algoritmadır. Zaman serisi modellerinde zaman bağımlılığının dikkate alınması gerektiğinden, random forest makine öğrenimi modeline uygun hale getirebilmek için lag features, gün, hafta, ay, yıl gibi zaman serimize etki eden mevsimsel ve doğasal özellikler sebebi ile özellik çıkarma işlemleri uygulanmıştır. Ek olarak, zaman serisinin genel trendi veya mevsimsel döngüleri de özelliklerle hava durumu gibi alanlarda önemli olması sebebi ile trend ve mevsimsel özellik çıkarma işlemi de kodumuzda yapılmıştır. Bu işlemler ile, sırasız verilere dayalı Random Forest algoritmasının kullanabilmesi için, zaman serisi sırasız bir formata dönüştürülmüştür.

Bu çalışmalar ışığında, model değerlendirme aşamasında her iki model için sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Validation T1 (TEP) Scaled - Ridge: MSE=-0.01285

Validation T1 (TEP) Scaled - RF: MSE=-0.01232

Validation T2 (TEP) Scaled - Ridge: MSE=-0.01392

Validation T2 (TEP) Scaled - RF: MSE=-0.0138

Validation T3 (TEP) Scaled - Ridge: MSE=-0.01251

Validation T3 (TEP) Scaled - RF: MSE=-0.01183

Validation Other (TEP) Scaled - Ridge: MSE=-0.01346

Validation Other (TEP) Scaled - RF: MSE=-0.01273

Test T1 (TEP) Scaled - Ridge: MAE=5.62575

Test T1 (TEP) Scaled - RF: MAE=6.61223

Test T2 (TEP) Scaled - Ridge: MAE=6.73309

Test T2 (TEP) Scaled - RF: MAE=8.01429

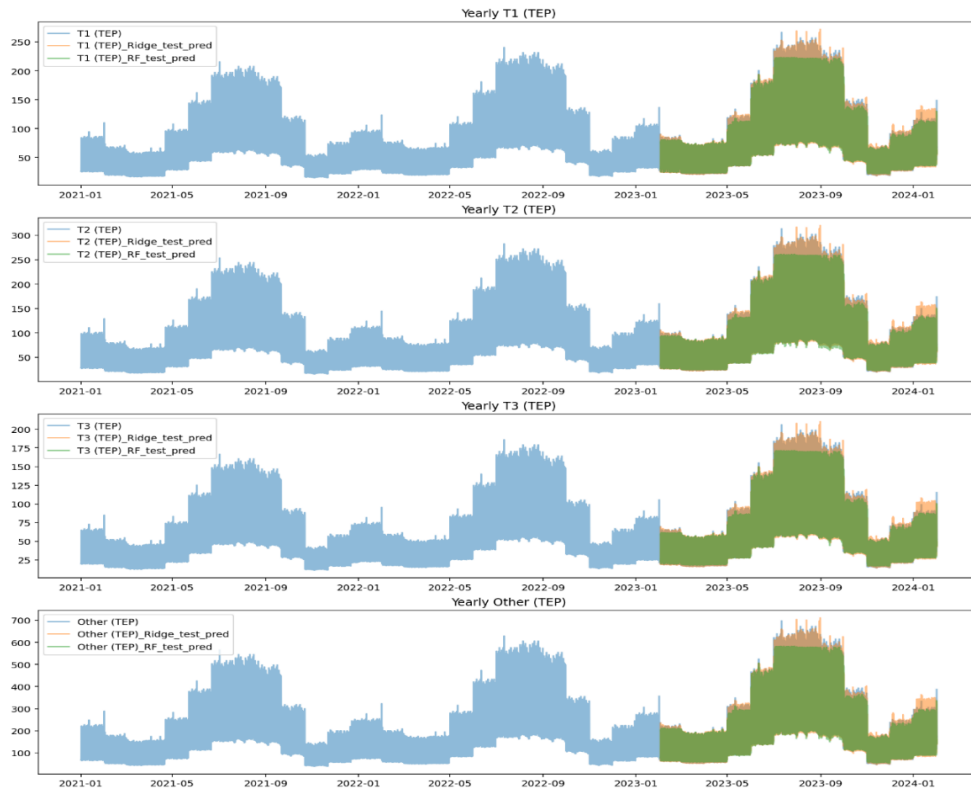
Test T3 (TEP) Scaled - Ridge: MAE=4.32273

Test T3 (TEP) Scaled - RF: MAE=5.24974

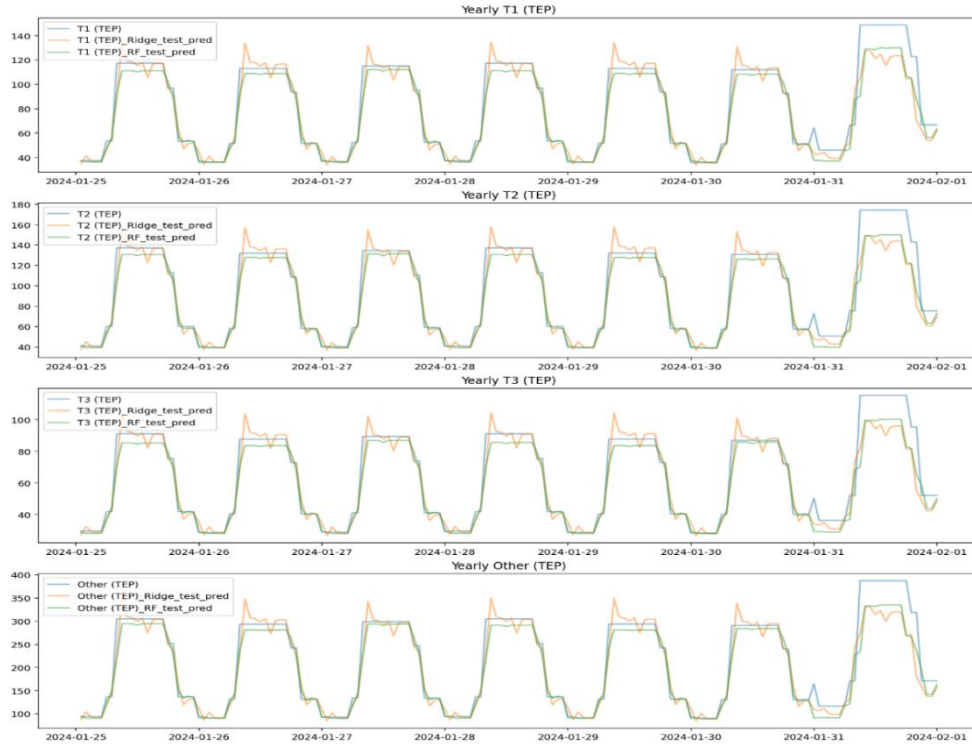
Test Other (TEP) Scaled - Ridge: MAE=14.84201

Test Other (TEP) Scaled - RF: MAE=17.35436

Ridge ve RF model test çıktıları Şekil 5'te 1 aylık tahminler ve gerçek ölçüm sonuçları karşılaştırması Şekil 6'daki gibidir.



Şekil 5. Ridge ve RF Model Test Çıktıları



Şekil 6. 2024 Yılı Gerçek Verileri ve Model Tahminleri Sapma Miktarları

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

LEED puanlama kriteri içerisinde en yüksek ağırlığa sahip olan enerji üzerinde çalışılmış olup, enerji optimizasyonu ile NZEB mimarisinde önemli gelişme kaydedileceği düşünülmüştür. Bu sebeple tüketimi azaltmayı hedefleyen tüm iyileştirme projeleri çıkarılmıştır. Aynı zamanda bu çalışma kapsamında, havalimanındaki tüm terminallerin, ek binaların ve yapıların NZEB kapsamında değerlendirilebileceği düşünülmüştür. Ancak, önerilen tüm iyileştirme projeleri uygulansa bile yüksek tüketimi nedeniyle NZEB mimarisinin tüm havalimanı için sağlanamayacağı kanıtlanmıştır. Fakat havalimanı içerisinde bulunan bağımsız bölümler için uygulanabilme ihtimali yüksektir. Literatür taraması aşamasında karşılaşılan örnek projelerde de bu çalışmalar incelenmiştir.

Ayrıca, enerji optimizasyonunun NZEB mimarisini sağlamada etkisinin yüksek olacağı düşünülmüştür. Ancak, tüm optimizasyon projeleri gerçekleştirilse bile iyileştirme etkisinin yalnızca 178 TEP/yıl olduğu görülmüştür. TEP iyileştirme etkisi beklenildiği kadar çok olmasa da karbon emisyonu azalma miktarı (1.045 ton CO₂/yıl) ve çevresel etki (3.135 ağaç eşdeğeri) iyileştirmeleri de göz önüne alındığında, projelerin hayata geçirilmesi gerekliliği önem arz etmektedir. Fakat enerji alanında yapılacak bu iyileştirmelerin, havalimanı içerisinde yapılan tüm yapılar için tek başına yeterli olmadığı da tespit edilmiştir. Bu sebeple, NZEB mimarisinin uygulanabilmesi için pilot yapılar/terminal binaları seçilip, aşamalı geliştirme projeleri yapılmalıdır. Bina kabuk detayı, mimari yapısı, enerji yönetim sistemi gibi tüm faktörler birbirini tamamlayan veri girdileri olması sebebi ile bir bütün olarak incelenmelidir. Puanlama kriterlerinin ayrı düşünülmesi, etki yoğunluk katsayıları ya da ilişkilerini belirten korelasyon katsayıları yüksek olsa da bir bütün halinde ele alınmadığı sürece katkısı beklenildiği gibi olmayacaktır.

Pilot yapıların seçilmesi ile her bir bağımsız bölümde enerji optimizasyonu çalışmalarına ek olarak yapılacak iyileştirmelerin (bina kabuk detayı, mimari yapı vb.), tüketim üzerindeki etkisi çalışma kapsamında oluşturulan hibrit makine öğrenimi modelinde simüle edilecektir.

ACA sertifikasyonu için bu çalışma kapsamında belirtilen iyileştirmelere ek olarak, özellikle ulaşım ve taşımacılık alanında ek projeler planlanmaktadır. Taşımacılıkta elektrikli araçların kullanılması, hibrid çalışma sistemine geçilerek su, enerji tüketiminin azaltılması, ulaşım araçlarının sayılarının azaltılması, atık yönetimi gibi birçok proje üzerinde çalışılmaktadır. Karbon ayak izi azaltımı ve sürdürülebilirliği

katkının artırılması için, özel projelerin üretildiği komite kurulması da ACA sertifikasyonu için önemli teşvik projelerinden biridir.

Hayata geçirilen tüketim tahmin modeli, aylık tüketim tahminleri yapmaktadır. Tüketim tahmini modeli, hibrit olması sebebi ile ilgili terminalde yapılacak olan enerji verimliliği iyileştirme projelerini de tüketim modelinde göz önüne alıyor olacaktır. Bu sebeple yapılan iyileştirmeler gelecek tahminlerine direk etkiyor olup, bu etki göz önüne alınarak iyileştirme projelerinin önceliklendirilmesi için de birbirini besleyen devamlı bir döngü sağlanmış olacaktır.

5. REFERANSLAR

- [1] <https://www.usgbc.org/leed>, [Son Erişim Tarihi: 22.04.2024]
- [2] <https://breeam.com/>, [Son Erişim Tarihi: 01.03.2024]
- [3] <https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings>, [Son Erişim Tarihi: 15.05.2024]
- [4] <https://www.airportcarbonaccreditation.org/>, [Son Erişim Tarihi: 01.05.2024]
- [5] Natalia Shushunova, Liubov Lisienkova, Irina Mitrofanov, Rimma Karimova. Application of LEED Green Rating Systems in In-frastructure of Airport Complexes. 2023 February E3S Web of Conferences 371. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337106002>
- [6] Fesanghary, M.; Asadi, S.; Geem, Z.W. Design of low-emission and energy-efficient residential buildings using a multi-objective optimization algorithm. *Build. Environ.* 2012, 49, 245–250
- [7] Harish VSKV, Kumar A. A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;56:1272–92. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.040>.
- [8] Kneifel J. Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings. *Energy Build* 2010;42:333–40. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.011>.
- [9] Konis, K.; Gamas, A.; Kensek, K. Passive performance and building form: An optimization framework for early-stage design support. *Sol. Energy* 2016, 125, 161–179.
- [10] Lartigue, B.; Lasternas, B.; Loftness, V. Multi-objective optimization of building envelope for energy consumption and daylight. *Indoor Built Environ.* 2014, 23, 70–80.
- [11] Lin H-W, Hong T. On variations of space-heating energy use in office buildings. *Appl Energy* 2013;111:515–28. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.040>.
- [12] Méndez Echenagucia, T.; Capozzoli, A.; Cascone, Y.; Sassone, M. The early design stage of a building envelope: Multi-objective search through heating, cooling and lighting energy performance analysis. *Appl. Energy* 2015, 154, 577–591.
- [13] Rahmani Asl, M.; Zarrinmehr, S.; Bergin, M.; Yan, W. BPOpt: A framework for BIM-based performance optimization. *Energy Build.* 2015, 108, 401–412.
- [14] Ruparathna R, Hewage K, Sadiq R. Improving the energy efficiency of the existing building stock: a critical review of commercial and institutional buildings. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;53:1032–45. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.084>.
- [15] Santos-Herrero JM, Lopez-Guede JM, Flores I, Sala JM. An ongoing review on building energy efficiency improvement systems. Istanbul: IV European Conference on Renewable Energy Systems; 2016.
- [16] Susorova I, Tabibzadeh M, Rahman A, Clack HL, Elnimeiri M. The effect of geometry factors on fenestration energy performance and energy savings in office buildings. *Energy Build* 2013;57:6–13. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.035>.
- [17] Toutou, A.; Fikry, M.; Mohamed, W. The parametric based optimization framework daylighting and energy performance in residential buildings in hot arid zone. *Alex. Eng. J.* 2018, 57, 3595–3608.

- [18] Tuhus-Dubrow, D.; Krarti, M. Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Build. Environ.* 2010, 45, 1574–1581.
- [19] Zhang, A.; Bokel, R.; van den Dobbelsteen, A.; Sun, Y.; Huang, Q.; Zhang, Q. Optimization of thermal and daylight performance of school buildings based on a multi-objective genetic algorithm in the cold climate of China. *Energy Build.* 2017, 139, 371–384.