

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**YAKLAŞIK SIFIR ENERJİ KONSEPTLİ BİNALAR İÇİN GERÇEK
ZAMANLI ENERJİ OPTİMİZASYONU**

Hacer GEDİZ TAŞKIN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞUBAT 2025

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAKLAŞIK SIFIR ENERJİ KONSEPTLİ BİNALAR İÇİN GERÇEK
ZAMANLI ENERJİ OPTİMİZASYONU**

Hacer GEDİZ TAŞKIN

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 06/02/2025 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Hamza Feza CARLAK (Danışman)

Prof. Dr. Ömer Halil ÇOLAK

Doç. Dr. Umut TİLKİ

ÖZET

YAKLAŞIK SIFIR ENERJİ KONSEPTLİ BİNALAR İÇİN GERÇEK ZAMANLI ENERJİ OPTİMİZASYONU FİZİBİLİTESİ

Hacer GEDİZ TAŞKIN

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Hamza Feza CARLAK

Şubat 2025 ; 52 sayfa

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. Havalimanı altyapılarının büyümesiyle birlikte, havalimanı ile ilgili iş, ticari, konut ve mekansal gelişim, kara ulaşım altyapısıyla birbirine bağlanan havalimanı çevresinde gerçekleşmektedir. 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 havalimanlarının altyapısının geliştirilmesinde ve havalimanlarının sürdürülebilirliğinin sağlanmasında, zararlı emisyonların azaltılmasına yönelik çalışmalar, temiz ve yeşil enerji kavramları, karbon ayak izinin azaltılması, NZEB, LEED, BREEAM gibi yeşil bina sertifika gereklilerinin sağlanması kurumsal hedefler arasında yer almaya başlamış ve kritik öneme sahip hale gelmiştir. Bu kavramların yanı sıra sadece havalimanı yapılarına özel Havalimanı Karbon Akreditasyon (ACA) programı da havalimanları için tercih edilebilir. ACA, havalimanı komplekslerinin olumsuz etkisini en aza indirerek karbon ayak izini azaltmayı amaçlamaktadır ve yedi seviye içerir.

Tüm bu kavramlar ve etki alanları küresel iklim değişikliğine olumlu katkı sağlamayı hedeflemektedir. Tezin 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 baz alınarak bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmesi hedeflemektedir. Tüketim analizleri, mimari yapı, pencere ve cam alanları, enerji kullanımı ve CO2 miktarı, ısıtma 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.

Enerji tüketim verisinin, elde edilecek enerji verimliliğinin belirlenmesinde, sertifikasyon kriterlerinde ve önerilecek verimlilik projelerinin sürdürülebilirliği için

önemli bir rol oynaması sebebi ile geleceğe yönelik enerji tüketim tahmini yapan başarılı bir hibrit makine öğrenimi modeli oluşturulmuştur ve etkisi incelenmiştir. Hibrit makine öğrenimi modelinde ilk olarak temel bir model seçilmiştir ve bu model eğitilmiştir. Temel modelin tahminleri, modele yeni bir girdi özelliği olan meta-model girdi verisi olarak eklenmiştir. Meta modelin yaptığı tahminler ile temel modelin tahminleri birleştirilmiştir. Meta modelin tahminleri, bir sonraki modelin tahminini iyileştirmek amacıyla kullanılmıştır. Böyle bir hibrit model kullanılmasının sebebi, daha doğru tahminler sağlamasıdır.

ANAHTAR KELİMELEER: BREEAM, Enerji Optimizasyonu, LEED, Makine Öğrenimi, NZEB.

JÜRİ: Doç. Dr. Hamza Feza CARLAK

Prof. Dr. Ömer Halil ÇOLAK

Doç. Dr. Umut TİLKİ

ABSTRACT

REAL-TIME ENERGY OPTIMIZATION FEASIBILITY FOR NEARLY ZERO ENERGY BUILDINGS (NZEB) CONCEPT

Hacer GEDİZ TAŞKIN

MSc Thesis in Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Hamza Feza CARLAK

February 2025 ; 52 pages

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. With the growth of airport infrastructures, airport-related business, commercial, residential and spatial development is taking place around the airport, which is connected by land transportation infrastructure. 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, in developing the infrastructure of airports and ensuring the sustainability of airports, 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 among the corporate goals and 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. ACA aims to reduce the carbon footprint of airport complexes by minimizing their negative impact and includes 7 levels.

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 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 successful hybrid machine learning model has been developed to predict future energy consumption, and its impact has been analysed, due to the important role energy consumption data plays in determining energy efficiency, certification criteria, and the sustainability of proposed efficiency projects. In the hybrid machine learning model, a basic model is first selected and trained. The predictions of the basic model are then added

as a new input feature to the model, forming the meta-model input data. The predictions made by the meta-model are combined with the predictions of the basic model. The meta-model's predictions are used to improve the accuracy of the next model's predictions. The reason for using such a hybrid model is to provide more accurate predictions.

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

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Hamza Feza CARLAK

Prof. Dr. Ömer Halil ÇOLAK

Assoc. Prof. Dr. Umut TİLKİ

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın başlangıcından itibaren bana verdiği destek ve yardımlarından dolayı değerli danışmanım Doç. Dr. Hamza Feza CARLAK'a,

Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve beni destekleyen değerli aileme (Güllü GEDİZ, Alparslan Urungu TAŞKIN, Mehmet GEDİZ, Gülçin Ece TAŞKIN ve Nil Defne TAŞKIN'a),

Kişisel görüşmelerdeki bilgi paylaşımlarıyla, tezin gelişmesinde önemli katkı sağlayan Mehmet Emir ÖZER'e ve Hasan Basri AKÇAY'a teşekkür ederim.

Şubat 2025

Hacer GEDİZ TAŞKIN

Elektrik-Elektronik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI	2
3. MATERYAL VE METOT	24
3.1. Enerji Optimizasyonu Çalışmaları	24
3.2. Makine Öğrenimi Modeli.....	26
4. BULGULAR.....	29
4.1. Mevcut Durum Analizleri	29
4.2. İyileştirme Önerileri Özet Tablosu ve Sonuçlar.....	43
5. TARTIŞMA	49
6. SONUÇLAR	50
7. KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yaklaşık Sıfır Enerji Konseptli Binalar İçin Gerçek Zamanlı Enerji Optimizasyonu Fizibilitesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

06/02/20025

Hacer GEDİZ TAŞKIN

İmzası

SİMGELELER VE KISALTMALAR

Simgeler

CO ²	: Karbondioksit
kWh	: Kilowatt Saat
Sm ³	: Standart Metreküp
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol

Kısaltmalar

AB	: Avrupa Birliği
ACA	: Airport Carbon Accreditation (Havalimanı Karbon Akreditasyon)
ASHRAE Engineers	: American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning
BREEAM	: Building Research Establishment Environmental Assessment Method
GBCI	: Green Building Certification Institute
LEED	: Leadership in Energy and Environmental Design
RF	: Random Forest Makine Öğrenimi Modeli
USGBC	: U.S. Green Building Council

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. NZEB Konsepti	8
Şekil 2.2. LEED Sertifikasına Sahip Dünyanın Havalimanı Komplekslerinin Şeması..	19
Şekil 3.1. Kredi Maddesi Yoğunluk Oranları	25
Şekil 4.1. Trijenerasyon Tesisi Örnek Çalışma Şematığı	29
Şekil 4.2. Trijenerasyon Tesisi Genel Görünümü.....	29
Şekil 4.3. Enerji Maliyetleri % Payları	30
Şekil 4.4. Toplam Enerji Tüketimi	30
Şekil 4.5. Karbondioksit Salınım Miktarı.....	31
Şekil 4.6. Isıtma Soğutma Derece Gün Değerleri.....	32
Şekil 4.7. Elektrik Tüketimi ile Soğutma Derece Gün Değeri Kıyaslaması.....	32
Şekil 4.8. Toplam Doğalgaz Tüketimi ile Isıtma Derece Gün Değeri Kıyaslaması	33
Şekil 4.9. Verimlilik Sınıflarına Göre AC Motorların Verim Değerleri.....	36
Şekil 4.10. Ridge ve RF Model Çıktıları-1	39
Şekil 4.11. Ridge ve RF Model Çıktıları-2.....	40
Şekil 4.12. 2024 Yılı Gerçek Verileri ve Model Tahminleri Sapma Miktarları-1.....	41
Şekil 4.13. 2024 Yılı Gerçek Verileri ve Model Tahminleri Sapma Miktarları-2.....	42

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Breeam Sertifikasyonu Puan ve Derece Tablosu.....	7
Çizelge 2.2. Havaalanının Fonksiyonel Unsurlarının Biyosfer Üzerindeki Etkisi	17
Çizelge 2.3. FXE Havacılık Ekipman ve Hizmet Tesisi LEED Kredi Özeti.....	20
Çizelge 4.1. Emisyon Faktörü Tablosu.....	33
Çizelge 4.2. İyileştirme Proje Önerileri	44
Çizelge 4.3 Tasarruf Potansiyeli Özet Tablosu.....	48

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, 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.

BREEAM 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.

Ayrıca, karbon ayak izi azaltma çabaları da havalimanlarının sürdürülebilirlik hedeflerinde önemli bir rol oynamaktadır. Havalimanları, enerji verimliliği önlemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, atık yönetimi politikaları gibi stratejiler uygulayarak karbon salınımını azaltmaya çalışmaktadır. Bu sayede, havalimanları çevreye daha az zarar verirken operasyonel maliyetlerini de düşürebilirler.

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 yapılan araştırmalarda, havalimanlarında karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik yapılan çalışmaların genellikle havalimanına bağlı bulunan ek binalarda ya da küçük yapılarda olduğu gözlemlenmiş olup, bu tezde mevcut havalimanının tüm iç yapısında yapılacak enerji verimliliği ve karbon ayak izi azaltma çalışmaları tek tek incelenmiş olup, siemens programı ile sağlanan enerji verimliliği faydası ve karbon ayak izi azaltma miktarı hesaplanmıştır.

Geleceğe yönelik gerçekleştirilecek enerji tüketimleri, elde edilecek enerji verimliliğinin belirlenmesinde, sertifikasyon kriterlerinde ve önerilecek verimlilik projelerinin sürdürülebilirliği için önemli bir rol oynayacaktır. Bu sebeple tez kapsamında 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. KAYNAK TARAMASI

Tez kapsamında, havalimanlarının çevre dostu yapılar olarak dönüşebilmesi amacıyla LEED, BREEAM, ACA sertifikasyonları için gerekli şartlar öncelikli olarak literatür taraması yapılarak özetlenmiş olup, yapılan örnek çalışmalara bu bölümde yer verilmiştir.

LEED, BREEAM ve ACA gibi sertifikasyonlara başvurmak çevresel sürdürülebilirliği artırmakta, karbon ayak izini azaltarak çevre dostu uygulamaları teşvik etmektedir.

LEED, çevresel sürdürülebilirlik standartlarını belirleyen ve binaların yeşil bir şekilde tasarlanmasını teşvik eden uluslararası bir sertifikasyon sistemidir. LEED, USGBC tarafından çıkarılan ve GBCI tarafından verilen ABD kökenli bir yeşil bina sertifikasıdır. Çevre dostu uygulamaları desteklemek, sürdürülebilirliğe katkı sağlamak için geliştirilmiştir. Bu sistem, binaların enerji verimliliği, su kullanımı, atık yönetimi, çevresel kalite, insan sağlığına olan etkileri ve sürdürülebilir malzeme seçimi gibi alanlarda belirli standartları karşılaması gerektiği üzerine kuruludur.

LEED sertifikasyonu almak isteyen bir binanın, belirlenen kriterleri karşılaması ve belgelendirmesi gerekmektedir. Bu kriterler, bina yönetimi, su verimliliği, enerji ve atmosfer, malzeme seçimi, iç mekan kalitesi, inovasyon ve tasarım süreci gibi çeşitli puanlama kategorilerinden oluşmaktadır. Bina projesi, bu kategorilerde belirli puanları elde ederek LEED sertifikasını almayı başarabilir. (<https://www.usgbc.org/guide-LEED-certification>, Erişim tarihi: 2024)

Öncelikle, bina yönetimi üzerine odaklanan kriterler, binaların verimli bir şekilde yönetilmesini ve sürdürülebilir bir operasyon modeline sahip olmasını amaçlar. Su verimliliği kriterleri ise bina içinde ve dışında su kullanımının azaltılmasını ve atık suyun geri dönüşümünü teşvik eder. Enerji ve atmosfer kategorisi, binaların enerji verimliliğini artırmayı ve karbon salınımını azaltmayı hedefler.

Malzeme seçimi kriterleri, çevreye ve insan sağlığına zararlı kimyasalların kullanımını azaltmayı ve geri dönüştürülebilir malzemelerin tercih edilmesini teşvik eder. İç mekan kalitesi kategorisi ise bina içindeki hava kalitesinin iyileştirilmesini ve insanların daha sağlıklı bir ortamda çalışmasını amaçlar. İnovasyon ve tasarım süreci kategorisi ise yaratıcı ve çevresel olarak sürdürülebilir tasarım çözümlerini teşvik eder.

Leed sertifikaları, yeni binalar, ticari iç mekanlar, mevcut binalar, büyük tadilat geçiren binalar, okul ve evler için alınabilir. Her biri belirli bir mülk türü veya proje türü için tasarlanmış birkaç farklı LEED derecelendirme sistemi vardır. (<https://www.usgbc.org/guide-LEED-certification>, Erişim tarihi: 2024)

Bu derecelendirme sistemleri aşağıdaki aşamaları içerir:

1. Bina Tasarımı ve İnşaatı (BD+C): Yeni inşaat projeleri veya büyük yenilemeler için tasarlanmıştır. İç Tasarım ve İnşaat (ID+C): Ticari iç mekanlar, perakende

- satış ve konaklama dahil olmak üzere komple iç mekan düzenleme projelerini kapsar.
2. Bina Operasyonları ve Bakımı (O+M): iyileştirme çalışmaları veya küçük tadilatlardan geçen mevcut binalar için sertifikasyon.
 3. Mahalle Gelişimi (ND): Bir bütün olarak toplulukların sürdürülebilirliğini ve bağlanabilirliğini kapsar.
 4. Evler için LEED: Müstakil evler ve alçak ila orta katlı binalar da dahil olmak üzere tek konut mülklerine odaklanır.
 5. Şehirler ve Topluluklar için LEED: Enerji kullanımı, atık, ulaşım, su tüketimi ve insan deneyimine dayalı olarak şehirlerin tamamını ve alt bölümlerini değerlendirir.
 6. LEED Zero: Enerji, atık, su veya karbon kaynaklarında net sıfır hedefi olan projeler için.
 7. LEED Tekrar Sertifikalandırma Süreci: Daha önce LEED sertifikası almış binalar için bu sistem, mülk sahiplerinin zaman içinde mülklerini korumalarına ve geliştirmelerine yardımcı olur.

LEED sertifika sisteminin ana kategorileri, ön koşul, kredi ve puanlamaları, alınacak yapı tipine göre farklılık gösteriyor olsa da, LEED kriterleri temelde çevre, ekonomi ve sağlık kategorilerine göre oluşturulmuştur. Leed sertifikası almak için gerekli genel kriterler: konum ve ulaşım (16 puan), sürdürülebilir araziler (10 puan), su verimliliği (11 puan), malzeme ve kaynaklar (13 puan), enerji ve atmosfer (33 puan), iç mekan çevre kalitesi (16 puan), inovasyon (6 puan), bölgesel öncelik (4 puan), bütünleştirici süreç (1 puan) kriterleridir. (<https://www.usgbc.org/guide-LEED-certification>, Erişim tarihi: 2024)

Genel olarak LEED derecelendirmesini iyileştirmenin en etkili yollarından bazıları şunlardır:

Enerji Verimliliği: Bina sahipleri, enerji verimli aydınlatma sistemleri uygulayarak, HVAC sistemlerini iyileştirerek ve enerji verimli cihazlar kurarak binalarının enerji verimliliğini artırabilir.

Su Verimliliği: Bina sahipleri düşük akışlı armatürler, yağmur suyu toplama sistemleri ve xeriscaping kurarak su tüketimini azaltabilirler.

İç Ortam Kalitesi: Bina sahipleri, doğal gün ışığı sağlayarak, havalandırmayı iyileştirerek ve etkili sıcaklık ve nem kontrolü uygulayarak iç ortam kalitesini artırabilir.

Malzemeler ve Kaynaklar: Bina sahipleri aynı zamanda sürdürülebilir ve çevre dostu yapı malzemeleri kullanarak binalarının LEED derecesini yükseltebilirler. Buna, hasat edilmiş, çıkarılmış ve sorumlu bir şekilde üretilmiş malzemelerin kullanılması ve yaşam döngüleri boyunca çevresel etkisi düşük olan malzemelerin seçilmesi de dahildir.

Yenilikçi Tasarım: Bina sahipleri, binalarına yenilikçi tasarım öğeleri ekleyerek sürdürülebilirliğe olan bağlılıklarını gösterebilirler. Bu, yeşil çatıları, güneş panellerini ve sürdürülebilirliği teşvik eden ve binanın LEED derecesini artıran diğer tasarım özelliklerini içerebilir.

Bina Analitiklerinin Kullanımı: Bina analitiği, bina performansı hakkında gerçek zamanlı veriler sağlayabilir ve bina sahiplerinin iyileştirilmesi gereken alanları belirlemesine yardımcı olabilir; binanın LEED çerçevesine göre performans göstermediği alanların belirlenmesine ve düzeltici önlemlerin alınmasına yardımcı olabilir.

Bir derecelendirme sistemindeki iyileştirmeler diğer sistemler için de kazanımlarla sonuçlanabilir. LEED derecelendirmenizi yükseltmek aynı zamanda ticari enerji performansı sertifikaları (EPC) ve BREEAM derecelendirmeleri için de verimlilik kazanımları ile sonuçlanabilir.

Bu kriterler üzerinden alınabilecek maksimum puan 110 olup, projeler ön koşulları sağlamaları ve yeterli asgari puanı almaları durumunda, topladıkları puana göre 4 farklı sertifika seviyesinden birisi ile sertifikalandırılırlar. Leed sertifika seviyeleri Sertifikalı (Certified), Gümüş (Silver), Altın (Gold) ve Platin (Platinum) olarak sıralanmaktadır. Yalın Leed sertifikası 40-49 puan, Gümüş Leed 50-59 puan, Altın Leed 60-79 puan, Platin Leed sertifikası ise 80-110 puan skalasında alınmaktadır. (<https://www.usgbc.org/guide-LEED-certification>, Erişim tarihi: 2024)

Yalın Leed Sertifikası (40-49 puan): Sertifikalı statüsüne ulaşmak, bir bina projesinin LEED sertifikasyonunun temel gerekliliklerini karşıladığını ve toplam olası puanların en az %40'ını güvence altına aldığını gösterir. Bu seviye, enerji verimliliği, su tasarrufu ve malzeme seçimi konularındaki temel uygulamaları kapsayan, sürdürülebilirliğe yönelik temel bir bağlılığı ortaya koymaktadır. Bu, projenin çevresel etkisini en aza indirmeye yönelik ilk adımlarının tanınmasıdır.

Gümüş (50-59 puan): Gümüş sertifika seviyesi, bir projenin temel LEED gerekliliklerini aştığını ve mevcut puanların %50'sinden fazlasını elde ettiğini gösterir. Bu seviye, temel önlemlerin ötesine geçen gelişmiş sürdürülebilir uygulamaları birleştiren, çevre yönetimine yönelik önemli bir taahhüdü yansıtır. Bu seviyedeki projeler genellikle gelişmiş enerji yönetim sistemleri, su verimliliği stratejileri ve sürdürülebilir yapı malzemeleri içerir ve karbon ayak izinin azaltılmasına ve iç mekan çevre kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunur.

Altın (60-79 puan): Altın sertifikasına ulaşmak, bir binanın sürdürülebilir tasarım ve işletmede mükemmelleştiğini ve LEED puanlarının %60'ından fazlasını güvence altına aldığını gösterir. Bu prestijli seviye, bir projenin sürdürülebilirlikteki en iyi uygulamaları kapsamlı bir şekilde benimsediğinin göstergesidir. Altın sertifikalı binalar, diğer çevresel başarıların yanı sıra enerji tasarrufu, su kullanımının azaltılması ve iç mekan hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik yenilikçi yaklaşımlarıyla öne çıkmaktadır. Bu binalar, sürdürülebilirliğin örnek modelleri olarak gösterilmekte ve düşünceli tasarım ve işletme yoluyla çevresel etkinin önemli ölçüde azaltılması potansiyelini sergilemektedir.

Platin (Platinum) (80+ puan): Platin sertifikası, mevcut puanların %80'inden fazlasını kazanan projelere verilen LEED sertifikası başarının zirvesini temsil eder. Bu en yüksek düzeydeki sertifika, sürdürülebilirlik konusunda liderlik sergileyen ve en son yeşil bina teknolojilerini ve stratejilerini uygulayan binalara verilmektedir. Platin sertifikalı projeler, olağanüstü enerji verimliliği, minimum su kullanımı, azaltılmış sera gazı emisyonları ve bina sakinlerinin sağlık ve refahını iyileştirme kararlılığıyla karakterize edilir. Bu binalar yalnızca çevresel etkilerini önemli ölçüde azaltmakla

kalmamakta, aynı zamanda sürdürülebilir tasarım ve inşaat için yeni standartlar belirleyerek diğerlerine yeşil binada mükemmelliği yakalama konusunda ilham vermektedir.

Bu tez, hem mevcut havalimanı binasında yapılacak verimlilik çalışmalarına, hem de mevcut havalimanı bünyesinde yeni açılacak dış hatlar terminali için zorlayıcı verimlilik hedeflerini ve minimum karbon ayak izi için öneriler sunarak katkı sağlamayı hedeflemektedir.

BREEAM, binaların çevresel performansını değerlendirmek amacıyla İngiltere'de kurulmuş gönüllü bir yeşil bina sürdürülebilirlik derecelendirme sistemidir. Binaların performanslarını çok çeşitli çevresel sorunlar üzerinden değerlendirerek GEÇERLİ, İYİ, ÇOK İYİ, MÜKEMMEL veya OLAĞANÜSTÜ şeklinde bir derecelendirme elde edilir. Kategorileri, enerji ve su kullanımı, sağlık ve refah, kirlilik, ulaşım, malzeme, atık, ekoloji ve yönetim süreçlerini değerlendirir.

Değerlendirme koşulları tezin ilerleyen safhalarında detaylı olarak tanımlanacak olup, LEED ile kıyaslamaları da sunulacaktır.

BREEAM, Birleşik Krallık'ın sürdürülebilirlik stratejilerini ve taahhütlerini desteklemeye yönelik süregelen ihtiyaçtan kaynaklanmakta olup, inşaat aşamasındaki binaların, planlamadan kullanıma ve yenilemeye kadar olan bir binanın tüm yaşam döngüsünü kapsayacak şekilde değerlendirme aşamaları içermektedir. (<https://www.buildenergy.co.uk>, Erişim tarihi: 2024)

BREEAM standardı, yeni binalara, mevcut binalara, yenileme projelerine ve büyük gelişmelere yönelik versiyonlarıyla hemen hemen her bina ve konuma uygulanabilir:

Yeni inşaatlar için BREEAM sertifikası, Birleşik Krallık'taki yeni, konut dışı binaların sürdürülebilirliğinin değerlendirildiği BREEAM standardıdır. Geliştiriciler ve proje ekipleri, binalarının performansını ölçmek, değerlendirmek, iyileştirmek ve yansıtmak için tasarım ve satın alma sürecinin önemli aşamalarında bu planı kullanmaktadır.

BREEAM uluslararası yeni inşaat, Birleşik Krallık ve ulusal BREEAM planına sahip diğer ülkeler hariç, dünya çapındaki ülkelerdeki yeni konut ve konut dışı binaların sürdürülebilirliğini değerlendirmeye yönelik BREEAM standardıdır. Bu program, geliştirilenin yer aldığı ülke veya bölgenin koşullarını, önceliklerini, kurallarını ve standartlarını dikkate alan değerlendirme kriterlerinden yararlanır.

BREEAM In-Use, bina yöneticilerinin işletme maliyetlerini azaltmalarına ve mevcut binaların çevresel performansını iyileştirmelerine yardımcı olan bir programdır. İki bölümden oluşur: i) bina varlığı ve ii) bina yönetimi.

Her iki bölüm de tüm konut dışı, ticari, endüstriyel, perakende ve kurumsal binalarla ilgilidir. BREEAM In-Use, planın sertifikasyonu için bir platform sağlayan Uluslararası Sürdürülebilirlik İttifakı (ISA) üyeleri tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır.

BREEAM yenileme, sürdürülebilir konut yenileme projeleri için bir tasarım ve değerlendirme yöntemi sağlayarak mevcut konutların sürdürülebilirliğini ve çevresel performansını uygun maliyetli ve sağlam bir şekilde iyileştirmeye yardımcı olur. Konut dışı yenileme projelerine yönelik bir plan geliştirilmekte olup, 2014 yılı başında başlatılması hedeflenmektedir. Başlatma tarihi, pilot uygulama ve bağımsız emsal değerlendirme süreçleri tamamlandıktan sonra duyurulacaktır.

BREEAM toplulukları, tüm toplulukların master planlamasına odaklanır. İnşaat sektörü profesyonellerinin, insanların yaşamak ve çalışmak isteyeceği, çevreye duyarlı ve ekonomik açıdan başarılı mekânlar tasarlamalarına yardımcı olmayı amaçlamaktadır.

BREEAM değerlendirmesi, bir geliştirmenin tedariğini, tasarımını, inşasını ve işletilmesini performans kriterlerine dayalı bir dizi hedefe göre değerlendirir. (<https://breeam.com/about/how-breeam-works>, Erişim Tarihi: 2024)

Çeşitli kategorilerde sürdürülebilir değere odaklanır:

- Enerji
- Arazi kullanımı ve ekoloji
- Su
- Sağlık ve refah
- Kirlilik
- Ulaşım
- Malzemeler
- Atık
- Yönetim süreçleri
- İnovasyon

Ana kredi kategorilerini kısaca özetlemek gerekirse;

Enerji: Enerjinin verimli kullanımı ve yönetimi ile karbon emisyonlarının azaltılmasını hedefleyip ölçümlemektedir.

Arazi kullanımı ve ekoloji: Habitat ve biyolojik çeşitliliğin korunmasına odaklanarak bir projeyi çevreleyen arazinin korunması ve sürdürülebilir kullanımı ölçümlemektedir.

Su: Su tüketimini ve sızıntı yoluyla kaybı azaltarak suyun verimli kullanılması hedefleyip ölçümlemektedir.

Sağlık ve refah: Bina sakinlerinin sağlığının, konforunun, güvenliğinin ve genel yaşam kalitesinin iyileştirilmesini ölçümlemektedir.

Kirlilik: Bir projenin çevre üzerindeki gürültü, hava, su, toprak veya ışık kirliliği şeklindeki etkisinin azaltılması hedefleyip ölçümlemektedir.

Ulaşım: Bina sakinleri için kamuya ait ve diğer daha sürdürülebilir ulaşım araçlarının mevcudiyeti ve erişilebilirliğini ölçümlemektedir.

Malzemeler: İnşaatta kullanılan malzemelerin sorumlu bir şekilde bulunması, tedarik edilmesi ve imha edilmesini ölçümlemektedir.

Atık: Bir yapının inşaatı, işletmesi ve gelecekteki onarımlarından kaynaklanan atıkların azaltılması ve sürdürülebilir yönetimi hedefleyip ölçümlemektedir.

Yönetim Süreçleri: Tasarımdan operasyonlara kadar tüm inşaat süreci boyunca sürdürülebilir değerlerin ve eylemlerin birleştirilmesini ölçümler.

İnovasyon: Herhangi bir kategoride standart gereklilik seviyelerinin ötesine geçen yenilikçi veya yüksek performanslı özelliklerin kullanılmasını hedefler ve ölçümler.

Her kategori, azaltılmış karbon emisyonları, düşük etkili tasarım, iklim değişikliğine uyum, ekolojik değer ve biyolojik çeşitliliğin korunması gibi en etkili faktörlere odaklanmaktadır. Krediler yukarıda listelenen bölümlerde verilir ve nihai derecelendirmeyi vermek üzere toplanır. Çizelge 2.1, Breeam Sertifikasyonu Puan ve Derece tablosu, her BREEAM derecelendirmesi için gereken yüzde puanlarını göstermektedir.

Çizelge 2.1. Breeam Sertifikasyonu Puan ve Derece Tablosu

% Puan	BREEAM Derecesi
<30	Sınıflandırılmamış
=30	Geçerli
=45	İyi
=55	Çok İyi
=70	Mükemmel
=85	Olağanüstü

BREEAM ve LEED sertifikasyonları için belirlenen ana kategorilerin çok benzer olduğu görülmektedir. Bu kapsamda sürdürülebilir yeşil havalimanı hedefine ulaşabilmek adına NZEB ve ACA kavramlarına da tez kapsamında bu bölümde değinilecektir.

Avrupa Komisyonu tarafından yayımlanan NZEB kavramı, neredeyse sıfır emisyonlu bina (NZEB), çok yüksek enerji performansına sahip bir bina anlamına gelirken, gereken neredeyse sıfır veya çok düşük miktardaki enerjinin, üretilen yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerji de dahil olmak üzere, yerinde veya yakınındaki yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjiyle çok önemli ölçüde karşılanması gerekir. (<https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings>, Erişim Tarihi:2024)



Şekil 2.1.NZEB Konsepti

Avrupa komisyonu tarafından yayınlanan bilgide;

Binaların Enerji Performansı Direktifi, AB ülkelerinin 2020 yılı sonuna kadar tüm yeni binaların neredeyse sıfır enerjili olmasını sağlamasını, 31 Aralık 2018'den sonra ise tüm yeni kamu binalarının neredeyse sıfır enerjili olmasını sağlamasını gerektiriyor.

Komisyonun direktifi yenileme teklifi (Aralık 2021), mevcut NZEB'den sıfır emisyonlu binalara (ZEB) doğru bir adım atarak yeni binalar için enerji performansı gerekliliğini uzun vadeli iklim tarafsızlığı hedefine ve "önce enerji verimliliği ilkesine" uyumlu hale getiriyor.

Direktifin teklifine göre sıfır emisyonlu bir bina, çok yüksek enerji performansına sahip, gerekli olan çok düşük miktardaki enerjinin tamamıyla yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerji ile karşılandığı ve fosil yakıtlardan kaynaklanan yerinde karbon emisyonu olmayan bir bina olarak tanımlanıyor.

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. (<https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings>, Erişim Tarihi:2024)

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.

Türkiye’de NZEB kavramı çok yaygın olmasa da, ya da direktifler ile zorunlu hale getirilmese de, sürdürülebilirlik hedefleri olan havalimanı gibi büyük ticari işletmelerde gerekliliklerin sağlanması büyük önem arz etmektedir.

NZEB, LEED, BREEAM kavramlarına ek olarak havalimanlarının karbon ayak izi azatılmasına yönelik tek küresel sertifikasyon programı olan, havalimanı karbon akreditasyonu (ACA) programının gereklilikleri, seviyeleri ve ana kriterlerini incelenmesi sonrası, dört farklı kavramın karşılaştırılması yapılacaktır.

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'. (<https://www.airportcarbonaccreditation.org/about/7-levels-of-accreditation>, Erişim Tarihi: 2024)

Havaalanı Karbon Akreditasyonu, 7 seviyeli sertifikasyonu aracılığıyla, havalimanlarının kapsamlı karbon yönetimine yönelik yolculuklarında farklı aşamalarda olduklarını kabul etmektedir. Programlı yolcu trafiğine sahip merkezler ve bölgesel havalimanlarının ötesine uzanan, genel havacılık ve yük odaklı havalimanlarını da kapsayacak şekilde her büyüklükteki havalimanlarına yönelik bir programdır.

Havaalanı Karbon Akreditasyonu aynı zamanda uluslararası kabul görmüş metodolojilere dayanan tek küresel, havaalanına özgü karbon standardıdır. Havalimanlarına ölçülebilir hedeflerle aktif karbon yönetimi için ortak bir çerçeve sağlar. Program, kullanılan metodolojinin her zaman sağlam olmasını sağlarken, ulusal veya yerel yasal gereklilikleri dikkate alma esnekliğine izin veren sahaya özeldir.

Havaalanı Karbon Akreditasyonu, havaalanı endüstrisinin karbon ayak izini etkili bir şekilde azaltmasını, daha düşük enerji tüketimi, paylaşılan uzmanlık ve bilgi alışverişi ve sonuçların daha iyi iletişimi yoluyla artan verimlilikten yararlanmasını sağlamaya çalışmaktadır. Programın her düzeyinde sertifikalandırılmış önemli sayıda havalimanı, büyüklük veya coğrafyadan bağımsız olarak bu havalimanlarının havacılığın yerdeki karbon ayak izini etkin bir şekilde azaltarak öncülük ettiğini açıkça gösteriyor. (<https://www.airportcarbonaccreditation.org/about/7-levels-of-accreditation>, Erişim Tarihi: 2024)

Seviye 1- Haritalama = Havaalanı Karbon Akreditasyonunun 1. Seviye 'Haritalama' aşamasında, havalimanlarının karbon ayak izlerini ölçmeleri ve envanterlerini çıkarmaları gerekmektedir. Bu düzeyde akreditasyona ulaşmak için bir havaalanının şunları yapması gerekir:

1. Sera Gazı Protokolü'nde tanımlandığı şekilde 'operasyonel sınırını' ve bu sınır içindeki Kapsam 1 ve Kapsam 2 kaynakları olan emisyon kaynaklarını belirlemelidir.
2. Veri toplamalı ve bu kaynaklar için en son yıllık karbon emisyonları hesaplanmalıdır.
3. Karbon ayak izi raporu hazırlanmalıdır.

Seviye 2- Azaltma = Havaalanı Karbon Akreditasyonunun 2. Seviye 'Azaltılması' aşamasında, havalimanlarının kendi karbon yönetimlerini kurmaları ve karbon ayak izini azaltmaya yönelik ilerlemeleri gerekmektedir.

Bu düzeyde akreditasyona ulaşmak için bir havaalanının şunları yapması gerekir:

- Seviye 1- Haritalama'nın tüm gerekliliklerini yerine getirmelidir
- Hedef belirleme de dahil olmak üzere etkili karbon yönetimi prosedürlerine dair kanıt sağlamalıdır.
- En son karbon ayak izini önceki yılların emisyonlarıyla karşılaştırarak karbon ayak izinde bir azalma meydana geldiği gösterilmelidir.

Bir havalimanı karbon ayak izini ölçtüğünde karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik çalışabilir. Bu süreç, karbon yönetimi olarak bilinir ve bir havalimanının aşağıdakileri yapması gereken çeşitli önlemleri içerir:

- Düşük karbon/düşük enerji politikasına sahip olmak
- Kıdemli bir komitenin veya organın iklim değişikliği/karbon/enerji konularında sorumluluğu olduğunu göstermek
- Yakıt ve enerji tüketimini izlemek
- Karbon/enerji azaltma hedeflerine sahip olmak
- Operasyonların emisyonları en aza indirmesini sağlamak için eylemler, programlar veya kontrol mekanizmalarını uygulamaya koymak
- Yatırımların emisyon etkisini göz önünde bulundurmak
- Çalışanlar için emisyonlara ilişkin farkındalık eğitimleri vermek
- İyileştirmelere yönelik ilerlemeyi izlemek için bir öz değerlendirme ve denetim sürecine sahip olmak
- Emisyon performansını ilgili paydaşlara iletmek

Havalimanı karbon akreditasyonu resmi sayfasında, seviye 2 için belirtilen karbon yönetimi önlemlerinin spesifik örnekleri aşağıdaki gibidir:

- Enerji talebinin azaltılması – denetim, ölçüm, yönetim, otomatik sayaç okuma (AMR), otomatik izleme ve hedefleme (AM&T), iyi ayarlanmış ve etkili kontrol yoluyla
- Temiz enerji tedariki – kombine ısı ve güç, yenilenebilir enerji kaynakları (tesis içi veya tesis dışı)
- Düşük enerjili tasarım – yenileme ve yeni inşa standartları, tüm yeni projelere karbon azaltma çalışmalarının zorunlu olarak dahil edilmesi
- Alternatif yakıtlı havalimanı araçlarına yönelik seçenekler (elektrikli, hibrit, hidrojen, LPG vb.)
- Personel iletişimi ve katılım planları
- Karbon azaltıcı yatırım projelerine eşit veya tercihli değerlendirme
- Tedarik zinciriyle ilgili emisyonları incelemeye ve azaltmaya yönelik program

Seviye 3- Optimizasyon = Havaalanı Karbon Akreditasyonunun 3. Seviye 'Optimizasyonu'nda, havalimanlarının üçüncü taraflarını karbon ayak izi yönetimine dahil etmeleri gerekmektedir. Üçüncü taraflar arasında havayolları ve bağımsız yer hizmetleri

şirketleri, catering şirketleri, hava trafik kontrolü ve havaalanı sahasında çalışan diğerleri gibi çeşitli hizmet sağlayıcılar yer alır. Aynı zamanda yetkililer ve kullanıcılarla yüzey erişim modları (karayolu, demiryolu) üzerinde etkileşimi de içerir.

- Bu düzeyde akreditasyona ulaşmak için bir havaalanının şunları yapması gerekir:
- 'Seviye 1- Haritalama' ve 'Seviye 2- Küçültme'nin tüm gerekliliklerini yerine getirmek
- Karbon ayak izi kapsamını Kapsam 3 emisyonlarını içerecek şekilde genişletmek (GHG Protokolü uyarınca)
- Ölçülecek Kapsam 3 emisyonları diğerlerinin yanı sıra aşağıdakileri içerir:
 - iniş ve kalkış döngüsü emisyonları
 - yolcular ve personel için havaalanına yüzey erişimi
 - personelin iş seyahati emisyonları
- Havaalanı kaynaklı karbon emisyonlarının daha geniş çapta azaltılması için üçüncü taraf operatörlerle yapılan çalışmalara ilişkin kanıtların sunulması

Havalimanları, havayolları ve havalimanı sahasındaki yer hizmetleri ve ikram şirketleri gibi hizmet sağlayıcılarla iş birliğine dayanır. Ancak bu hizmetler aynı zamanda karbon salmakta ve bu da karbon ayak izinin genel olarak azaltılması için sağlayıcılarla etkileşimi zorunlu kılmaktadır.

Seviye 3 için paydaş katılımı değerlendirilirken bir havalimanı, asgari olarak aşağıdaki gerekliliklerin karşılandığından emin olunmalıdır:

- Havaalanının yönlendirebileceği ve etkileyebileceği paydaşların belirlenmesi ve sınıflandırılması
- Kilit paydaşlarla ortaklıkların kurulması ve kolaylaştırılması için açık rol ve sorumlulukların tahsisi
- Önerilen eylemler ve zamanlamalar da dahil olmak üzere paydaşlarla etkileşime geçmek için amaçlanan yaklaşımın net bir uygulama planının sunulması

Bir havalimanının karbon emisyonlarını azaltmak için paydaşlarla birlikte çalışabileceği yollara ilişkin spesifik örnekler şunları içerir:

- Havaalanı topluluğu genelinde enerji verimliliği ve düşük karbon uygulamalarının profilini yükseltmeye yönelik farkındalık ve davranış değişikliği kampanyaları. Bu, aracın kapatılması / rölanti süresinin kısaltılması gibi belirli davranışları teşvik eden kampanyaları içerebilir.
- Belirli kişisel veya operasyonel uygulamaların veya ekipman veya araç seçiminin benimsenmesini teşvik eden ve kolaylaştıran, havaalanı çapında resmi programlar. Örneğin, araba paylaşım programları, temiz araç programları ve atıkların en aza indirilmesi ve geri kazanım programları.
- Havaalanı politikasını, amaçlarını ve hedeflerini anlamalarını ve uygulamayı destekleyebilmelerini sağlamak için kilit iş ortaklarıyla birlikte çalışmak. Örneğin, havaalanı kiracılarını ve hava tarafı operatörlerini temsil eden gruplar veya danışma komiteleri aracılığıyla.
- Bir havalimanının altyapı planlarının, havalimanının karbon azaltma hedeflerini yansıtır uygulamasını ve büyük üçüncü şahısların emisyonlarının azaltılmasını

kolaylaştırabilmesini sağlamak için havalimanı planlamacıları ve üçüncü taraflarla birlikte çalışmak. Yardımcı Güç Ünitelerinin (APU'lar) kullanımını ve taksi sürelerini azaltmak için havayollarıyla çalışmak buna bir örnek olabilir.

- Enerji verimliliği ve karbon yönetimi teknikleri konusunda üçüncü taraflara eğitim verilmesi. Minimum performans standartlarının belirlenmesi, ör. bina/perakende biriminin yenilenmesi.
- Daha düşük/daha yüksek emisyonlu uçaklar için farklı ücretlendirme yapılması gibi iyi uygulamaları ve verimli araçların kullanımını teşvik etmek için teşviklerin ve maliyet yapılarının kullanılması. Mevcut üçüncü taraf kiralama/sözleşme koşullarına karbon/enerji hususlarının dahil edilmesi ve/veya performansa ilişkin kontrollerin ve havaalanı denetim süreçlerine uygulanmasının dahil edilmesi. Örneğin Sürdürülebilir Havacılık Yakıtları (SAF) ile ilgili olarak yatırım projeleri ve fırsatları üzerinde iş birliği yapmak üzere havayolları veya yüklenicileri de içeren önemli havaalanı operatörleriyle stratejik ortaklıklar oluşturmak.

Seviye 3+- Nötrlük = Havaalanı Karbon Akreditasyonunun Seviye 3+ 'Nötrlük', havalimanlarının başka yollarla azaltılamayan kalan karbon emisyonlarını dengeleme yoluyla telafi etmesi gerekmektedir.

Bu düzeyde akreditasyona ulaşmak için bir havaalanının şunları yapması gerekir:

- 'Seviye 1- Haritalama', 'Seviye 2- Azaltma ve 'Seviye 3- Optimizasyon'un tüm gerekliliklerini yerine getirmek
- Kalan Kapsam 1 ve 2 karbon emisyonlarının yanı sıra çalışanların iş seyahatinden kaynaklanan emisyonları, uluslararası kabul görmüş denkleştirmeler kullanarak dengelemek

Karbon nötrlüğü, kalan havaalanı emisyonlarının karbon kredisi satın alınarak telafi edilmesiyle sağlanır. Karbon dengeleme, havalimanı tarafından tamamen ortadan kaldırılamayan emisyonları telafi etmek amacıyla karbondioksiti azaltan diğer projelere fon sağlanmasıdır. Örneğin bir havaalanı, kömürle çalışan bir elektrik santralinin yerine geçecek bir rüzgar enerjisi tesisi için ödeme yapabilir.

Havaalanı Karbon Akreditasyonu, çevre danışmanlığı Ecofys tarafından yürütülen bir çalışmaya dayanarak özel bir Dengeleme Kılavuzu geliştirmiştir. Artık emisyonlarını dengelemeye karar veren havalimanlarının, güvenilir karbon kredilerini seçmeye yönelik bu kapsamlı kılavuza başvurmaları tavsiye edilir.

Seviye 3+ 'Nötrlük'ün temel gerekliliklerinden biri, havalimanlarının ancak emisyonlarını mümkün olduğu kadar azalttıktan sonra dengeleme işlemine devam etmesidir. Havalimanlarının mevcut emisyon azaltma potansiyellerinin tamamını kullanıp kullanmadıklarını değerlendirmelerine yardımcı olmak için Havaalanı Karbon Akreditasyonu, Dengelemeden Önce Emisyonların Azaltılmasına ilişkin özel bir Kılavuz sunmaktadır.

Teze konu olan havalimanı, havalimanı karbon akreditasyonu seviyesi olarak Seviye 3+- Nötrlük akreditasyonuna sahiptir. Tez kapsamında çalışılan seviyeler akreditasyon derecesine arttırmaya yönelik analizleri ve kazançları gösterecektir. Bu sebeple, üst seviyelerdeki akreditasyon gerekliliklerini incelemek önem arz etmektedir.

Seviye 4- Dönüşüm = Havaalanı Karbon Akreditasyonunun 4. Seviye 'Dönüşüm'de havaalanlarının, karbon yönetimi hedeflerini küresel iklim hedefleriyle uyumlu hale getirmeleri ve operasyonlarını mutlak emisyon azaltımlarını göz önünde bulundurarak dönüştürmeleri ve aynı zamanda paydaş katılımını güçlendirmeleri gerekmektedir.

Bu düzeyde akreditasyona ulaşmak için bir havaalanının şunları yapması gerekir:

- Emisyonların mutlak azaltılmasına yönelik bir politika taahhüdü belirlemek
- İlave (Seviye 3'e kadar) Kapsam 1 ve Kapsam 3 emisyonlarını karbon ayak izine dahil etmek
- Uzun vadeli mutlak bir karbon emisyonu azaltma hedefi formüle etmek. Hedef miktar ve tarih, IPCC 1,5°C veya 2°C yollarıyla uyumlu hale getirilecektir.
- Hedefe ulaşmak için bir Karbon Yönetim Planı geliştirmek. Havaalanı, karbon emisyonlarını azaltma hedefine ulaşmak için güzergahını ve bu güzergahta kalmak için uygulamayı beklediği eylemleri tanımlayacaktır. Paydaş Ortaklık Planının Geliştirilmesi. Paydaş Ortaklık Planı, havalimanının, havalimanındaki üçüncü tarafları, kendi azaltım planları veya havalimanı işletmecisi tarafından başlatılan tedbirler aracılığıyla emisyon azaltımlarını kendileri sağlamaya yönelik aktif olarak teşvik ettiğini gösterecektir.

Seviye 4'e ulaşmak için, bir havalimanının asgari olarak tüm Kapsam 1 ve Kapsam 2 emisyonlarını içeren mutlak bir emisyon azaltım hedefi (yani, bir havalimanı operatörünün hedef kapsamı) belirlemesi gerekmektedir. Bir havalimanının bunu yapmayı seçmesi durumunda, hedefine bir veya daha fazla Kapsam 3 emisyon kaynağını da dahil edebilir ve dolayısıyla havalimanını bir sistem (yani üçüncü tarafları kapsayan bir hedef kapsamı) olarak kısmen veya tamamen kapsayabilir.

Uygulama Kılavuzu, karbon ayak izi oluşturma gerekliliklerini, hedeflerin ve yörüngelerin tanımını ve paydaş ortaklığına ilişkin gereklilikleri ayrıntılı olarak sunmaktadır.

Seviye 4+- Geçiş = Havaalanı Karbon Akreditasyonunun 4+ 'Geçiş' seviyesinde, havalimanlarının kalan karbon emisyonlarını telafi etmeleri gerekmektedir.

Bu düzeyde akreditasyona ulaşmak için bir havaalanının şunları yapması gerekir:

- 'Seviye 4- Dönüşüm'ün tüm gereklerini yerine getirmek
- Kalan Kapsam 1 ve 2 karbon emisyonlarının yanı sıra personelin iş seyahatinden kaynaklanan emisyonları, uluslararası kabul görmüş denkleştirmeler kullanarak dengelemek

Karbon dengeleme, ortadan kaldırılamayan emisyonları telafi etmek amacıyla karbondioksiti azaltan diğer projelere fon sağlanmasıdır. Örneğin bir havaalanı, kömürle çalışan bir elektrik santralinin yerine geçecek bir rüzgar enerjisi tesisi için ödeme yapabilir.

Havaalanı Karbon Akreditasyonu, çevre danışmanlığı Ecofys tarafından yürütülen bir çalışmaya dayanarak özel bir Dengeleme Kılavuzu geliştirdi. Artık

emisyollarını dengelemeye karar veren havalimanlarının, güvenilir karbon kredilerini seçmeye yönelik bu kapsamlı kılavuza başvurmaları tavsiye edilir.

Seviye 5 = Havaalanı Karbon Akreditasyonunun havaalanı endüstrisinin Net Sıfır CO₂ emisyonuna ulaşma hedefini kolaylaştırma ve yönlendirme yeteneğini artırması gerekmektedir. Bu çerçevede, Havaalanı Karbon Akreditasyonu Görev Gücü, programın çerçevesini küresel olarak havalimanları tarafından verilen taahhütlerle uyumlu hale getirmek için ek bir Seviye 5 oluşturmakla görevlendirilmiştir. Bu yeni seviye, bir havalimanının Kapsam 1 ve 2'de Net Sıfır karbon dengesine ulaştığını ve bu dengeyi koruduğunu ve Net Sıfır'a giden yolda önemli ölçüde etkileyebileceği Kapsam 3 emisyon kaynaklarını ele aldığını belgeliyor.

Seviye 5, Havaalanı Karbon Akreditasyonu programının en üst düzeyidir ve havalimanlarının mutlak karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaları için yüksek standartlar belirler. Ek olarak, bu seviyedeki havalimanları, daha geniş Net Sıfır taahhütlerine uygun olarak emisyonların azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmak için çalışanlar, tedarikçiler, iş ortakları, havayolları ve diğer şirketler ve havalimanı sahasında aktif olan üçüncü taraflar da dahil olmak üzere tüm ekosistemiyle iş birliği yapmalıdır. Sektörün, ilerlemeyi ölçmek ve şeffaflığı sağlamak için düzenli izleme ve değerlendirme yapması şarttır.

Havalimanı karbon akreditasyon sertifikasyon programı resmi sitesinde yayınlanan sertifikasyon seviyeleri özet olarak yukarıdaki şekilde sunulmuştur.

Havalimanı çok büyük bir yapı kompleksidir: yolcu terminali, mağazalar ve rekreasyon alanları, ofis binaları, endüstriyel binalarla karşılaştırılabilir alanlar, kontrol kulesi, pistler, telekomünikasyon ve radyo navigasyon tesisleri için tasarlanmış alanlar vb. içeren ticari binalara atfedilebilir. Bu nedenle, bu işletmenin sertifikasyonu benzersizdir.

Resmi kurum/kuruluşlar tarafından yayınlanan sertifikasyon gerekliliklerinin özeti sonrası, tez çalışmasına örnek oluşturulabilmesi için ticari binalarda, iç ortamlarda, havalimanı ve benzer yapılarda çalışan/gerçekleştirilen çalışmalara yer verilecektir.

(Susorova vd. 2013) ve (Lin ve Hong, 2013) yaptıkları çalışmalarda açıkladıkları gibi her bina, inşaat türüne bağlı olarak yalnızca konumu, yönelimi veya çevre koşulları nedeniyle değil, aynı zamanda boyutları, geometrisi, kabuğunda kullanılan inşaat malzemeleri, her alanın dağılımı, her alanın kullanımı ve kimliği nedeniyle de benzersizdir. Binanın şekli, yüksekliği, cephesi, WWR, gün ışığı alan alanlar, pencere özellikleri, hava sızıntısı veya kabuğun sıklığı, bina konfigürasyonu, doğal havalandırma, duvar ve tavan malzemelerinin özellikleri gibi sebepler nedeniyle bina kabuğunun NZEB mimarisi için en önemli faktörlerden biri olduğu açıktır. Bu sebeple bu tez için, literatür taraması yoğunluklu olarak havalimanları için gerçekleştirilen ACA, NZEB, LEED çalışmaları incelenmiş ve örnek çalışmalardan bahsedilmiştir.

M.C. Falvo, F. Santi, R. Aciri, E. Manzan tarafından NZEB ve Sürdürülebilir havalimanları hedefi için Roma Uluslararası Havalimanı için yapılan çalışmada, Fiumicino Havalimanı'nın T3 terminalini NZEB yapmak için majör olarak gerçekleştirilen çalışmalar aşağıdaki gibi belirtilmiştir. (Falvo vd. 2015)

- HVAC sistemleri, binanın soğutma talebinin yanı sıra kış aylarındaki ısıtma talebini de karşılayabilecek bir trijenerasyon sistemini entegre etmek için 24 MW'lık bir CHP enerji santrali tarafından ısıtılan bir havaalanı bölgesel ısıtma dahili ağına bağlanacaktır.
- Gelişmiş bir Bina Yönetim Sistemi (BMS), HVAC tesislerinin tüm otomatik düzenlemelerini entegre edecek ve yaygın bir sensör ağı sayesinde çeşitli alanların gerçek kullanımı temelinde iç hava sıcaklığını ve nemi optimize edecektir.
- Full LED aydınlatma sistemi, binaların devasa cam cephelerinden gelen gün ışığı katkıları dikkate alınarak en uygun şekilde tasarlanmıştır. DALI otomatik gün ışığı düzenlemesi ve doluluk sensörleri, her alandaki aydınlatma seviyelerini optimize ederek ışık akışı israfını önler.
- Gelişmiş bir SCADA sistemi, çatıya monte edilen ve bazı yeni dağıtılan birkaç fotovoltaik tesisin entegre edildiği akıllı bir şebekeye dönüştürülecek olan havaalanı iç enerji dağıtım şebekesinin güç akışlarının, voltajının ve diğer parametrelerinin optimum otomatik düzenlemesini gerçekleştirir. Güç akışlarını optimize etmek ve şebeke kullanılabilirlik faktörlerini en üst düzeye çıkarmak için Li-Ion piller tarafından yapılan enerji depolaması yapılması majör olarak yapılması gereken çalışmalardır.

Terminal içindeki enerji hizmeti taleplerini karşılamak amacıyla, doğal katkıları en üst düzeye çıkarmak için piyasanın en iyisi enerji teknolojisi çözümlerini en iyi mimari çözümlerle birleştirerek, onu sürdürülebilir bir şekilde NZEB'e dönüştürmek mümkündür.

Aynı makalede, biniş alanı F olarak isimlendirilen alandaki iç katkıların 30kWh/year/m³ biraz üzerinde olduğu belirlenmiştir. Bu katkının dağılımları, terminalin içinde bulunan ekipman (%40) ve transit halindeki insanlar tarafından üretilen duyulur ısı (%37), LED aydınlatmanın ürettiği ısı yaklaşık %9'u ve pencereler ve opak bileşenler %14'ü oluşturmakta olduğu bilgisi verilmiştir. Yenilenen T3 terminali için ise, dahili katkıları 40 kWh/yıl/m³'ün biraz üzerinde olduğu belirtilmiştir; bunun büyük bir kısmı terminal içinde bulunan ekipmanın ürettiği ısı (%39) ve transit halindeki insanlar tarafından üretilen duyulur ısı (%21), LED aydınlatmanın ürettiği ısı yaklaşık %18, pencerelerden ve opak bileşenlerden gelen girdiler %22'yi oluşturduğu belirtilmiştir. T3 terminalinin yenilenmesi sonrası yapılan dinamik enerji modellemesi, tüm koşullar eşit olmak üzere, ısıtma, iklimlendirme, iç mekan hava işleme ve aydınlatma için toplam birincil enerji tüketiminde %57'lik bir azalma olduğunu göstermiştir. Klimalı hacim birimi başına özgül enerji tüketimindeki önemli ölçüdeki azalmayı ise yaklaşık 114 kWh/m³/yıl'dan yaklaşık 26 kWh/m³/yıl'a, yani %77'lik bir azalma olduğu belirtilmiştir. Fotovoltaik üretim olmasa bile, 2013 tasarım incelemesi birincil enerji tüketiminde %49 oranında (968 TEP/yıl'dan 492 TEP/yıl'a) veya yalnızca hava dikkate alınırsa %29 (665 TEP/yıl'dan 475 TEP/yıl'a) kadar bir azalmaya olanak sağlandığı belirtilmiştir. Bu iyileştirmeler, NZEB kriterleri net olarak belirli olmadığı için, biniş alanı ve yenilenen terminal 3'ün NZEB kriterlerini sağlayacağı öngörülmüştür.

Natalia Shushunova, Liubov Lisienkova, Irina Mitrofanova, and Rimma Karimova tarafından yazılan makalede LEED yeşil derecelendirme sistemlerinin havalimanı komplekslerinin altyapısında uygulanması için yapılan çalışmada, özellikle havalimanı kompleksi için ulaşım altyapısında yeşil teknolojilerin kullanımını analiz

etmektedir. NZEB'den farklı olarak, modern yeşil derecelendirme sistemleri (LEED ve BREEAM gibi), yapılara ek olarak ulaşım altyapısının da yeşillendirilmesini içermektedir. Karbon ayak izinin azaltılması için yapılan çalışmalar ne kadar kapsamlı ele alınırsa, karbon ayak izi azalması daha yüksek seviyede başarılmış olacaktır. Makalede, havalimanlarının faaliyetlerinden kaynaklanan zararlı emisyonların karbondioksitin yaklaşık %2'sini oluşturduğunu, ve önümüzdeki 10-15 yıl içinde aktif olarak artan yolcu trafiğiyle birlikte bu rakam iki katına çıkabileceğinden bahsedilmektedir. Ayrıca havalimanı altyapısı, on binlerce hanenin ihtiyacına eşdeğer miktarda enerji ve su tüketimine sahip olurken, büyük miktarda atık bırakmaktadır. Tüm olumsuz etkilere rağmen havacılık iletişimi hayatı kolaylaştırması sebebi ile uzun zamandır iş ve yaşamın bir parçası olmuştur. Bu bağlamda, son zamanlarda havalimanlarının çevre üzerindeki zararlı etkilerinin izlenmesine, azaltılmasına ve bölgenin doğal dengesinin yeniden sağlanmasına giderek daha fazla önem verilmektedir. (Shushunova vd. 2023)

Makalede, havalimanlarının yeşillendirilmesine odaklanan tek programın havalimanı karbon akreditasyon (ACA) programı olduğunu belirtmiş olup, tezin ilk sayfalarda bahsettiğimiz ACA seviyelerini aşağıdaki gibi özetlemiştir:

- Haritalama – karbon ayak izinin ölçümü;
- Azaltma – altyapının iyileştirilmesi ve olumsuz etkinin azaltılması;
- Optimizasyon — kontrolsüz emisyonların ölçülmesi ve bunları azaltmak için önlemlerin alınması;
- Tarafsızlık - ilk aşamalarda azaltılamayan kalan karbondioksit emisyonları için "tazminat", yani karbondioksit emisyonlarını azaltmaya odaklanan projelere fon sağlamak;
- Dönüşüm – zararlı emisyonların yönetilmesi ve en aza indirilmesi için uzun vadeli bir stratejinin hazırlanması;
- Geçiş - tüm akreditasyon gerekliliklerinin yerine getirilmesi, uluslararası kabul görmüş tazminatlar nedeniyle artık karbon emisyonlarının telafi edilmesi.

Makale, havaalanı altyapısının çevre üzerinde uçakların işletiminden daha büyük bir olumsuz "yük" taşıdığını savunmakta olup, Çizelge 2.2'deki gibi bir etki matrisi yayınlamıştır.

Çizelge 2.2. Havaalanının Fonksiyonel Unsurlarının Biyosfer Üzerindeki Etkisi

Havalimanı Alanı	Fonksiyonel Elemanlar	Havaalanı Çevresel Etkileri								
		Hava Kirliliği	Biyolojik Çeşitlilik Etkileri	İklim Değişikliği	Arazi Alımı	Peyzaj	Gürültü	Su Kirliliği	Su Kullanımı	Atık
Havalimanı Altyapısı ve Yer Trafiki	Havalimanı Erişimi									
	Otopark									
	Yolcu Terminali									
	Kontrol Kulesi									
	Havacılık Ofis Binaları									
	Araç Bakım Tesisleri									
	Hangarlar									
	Pistler Ve Taksi Yolları									
Uçaklar, Pistler ve Akıntı Suları İçin Buz Çözme Koruması	Uçaklar İçin Buz Çözme Ekipmanı									
	Antifrizli Tanklar									
	Uçak Park Drenaj Boruları									
	Buz Çözme Ekipmanlarının Takibi									
Uçak Yakıt İkmali	Uçak Yakıt İkmali Ekipmanları									
	Yakıt Depolamak İçin Tanklar									
Bakım Ekipmanı ve Kamu Servisi	Bakım Ekibi İçin Yakıtlar									
	Kentsel Atık									
	Zararlı Atık									
	Bina Suyu, Isıtması									
Uçak Hareketi	Uçak Bakım Dinlenmesi									
	Uçak İnişi Ve Kalkışı									

NZEB, LEED (Amerika), BREEAM (Birleşik Krallık), havalimanı karbon akreditasyon sertifikası gerekliliklerini optimum seviyede sağlayabilmek için, havalimanı organizasyon yapısında var olan her prosesin çevresel etkisinin incelenmesi, mevcut durum analizi yapılması, geliştirme önerileri için temel oluşturmaktadır.

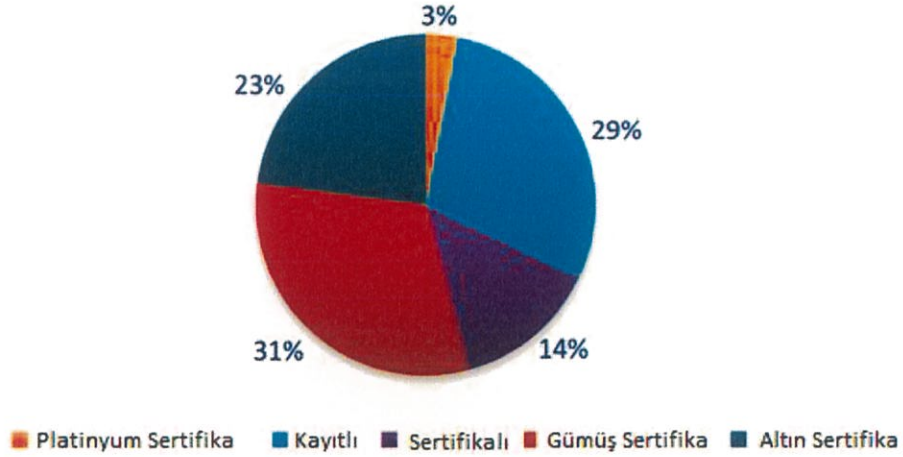
Makalede aynı zamanda, 2006 yılında Boston Logan Terminal A dünyada LEED sertifikası alan ilk havalimanı terminali olduğunu, binanın enerji ihtiyacının yaklaşık %3'ünü karşılayan 20 rüzgar türbiniyle donatıldığını, ısıyı yansıtan bir çatı monte edildiği, su tüketimi düşük su boruları ve pist çevre dostu asfalttan yapıldığı belirtmektedir. Bu iyileştirme ve geliştirmeler tez için öneri niteliğinde önem arz etmektedir. Başka havalimanları tarafından yapılan yenileme çalışmalarında, yeşil havalimanı olma hedefiyle hangi geliştirmelerin yapıldığı örnek teşkil etmektedir.

Ayrıca, eski terminalin yıkılması ve yeni terminalin inşası sırasında ortaya çıkan atıkların %75'ten fazlası yeniden kullanılmış olup geri dönüştürüldüğü, inşaat malzemelerinin %10'undan fazlasının geri dönüştürülmüş malzemelerden üretildiği belirtilmiştir. Ek olarak, inşaat sırasında iç mekan hava kirliliğini azaltacak önlemler alınmıştır. İzlenen yol, atık yönetimi ve beşikten mezara metodolojisini benimseyen yaşam döngüsü analizleri için çok büyük fayda sağlamıştır.

Aynı makalede, 2019 yılında Dubai'nin en büyük havalimanı Terminal 2'ye 15.000 güneş paneli içeren güneş enerjisi sistemleri kurulduğu, bu panellerden 7.483.500 kWh enerji üretilmesi nedeniyle enerji tasarrufu sağlandığı ve karbondioksit emisyonlarının sayısının 3243 metrik ton azaldığı belirtilmiştir.

Makalede anlatılan yeşil havalimanı karşılaştırılmasında, Singapur'un en ünlü havalimanı olan Changi havalimanında, yağmur suyunu pompalayan derenin binanın kubbesi altındaki havayı soğutuyor ve toplanan su, havalimanının ihtiyaçlarına gidiyor. Doğal aydınlatma için tavan pencereleriyle donatmak, gün içerisinde elektrikli aydınlatma ihtiyacını azalttığından bahsedilmektedir. (Shushunova ve ark., 2023)

Kuzey Amerika'da LEED programında sertifikalandırılmış San Francisco Uluslararası Havaalanı, Chicago O'Hare Uluslararası Havaalanı, New York ve New Jersey Liman İdaresi, Los Angeles Havaalanı ve Columbus Uluslararası Havaalanı gibi havalimanları arasından San Diego Uluslararası Havalimanı, projenin yüksek enerji verimliliği ve çevresel frekansı nedeniyle dünyada LEED Platinum sertifikası alan ilk havalimanı olduğu bahsedilmektedir. LEED sistemi havayolu kompleksinin tamamına değil, yalnızca bazı binalarına uygulanabildiği de özellikle makalede belirtilmektedir. Aynı makalede Dünya'daki LEED sertifikalı havalimanlarının sertifikasyon dereceleri ile ilgili diyagram Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. LEED Sertifikasına Sahip Dünyanın Havalimanı Komplekslerinin Şeması

E.M. Vélez-Vega, P.E. ve D.R. Bardt, P.E. tarafından yazılan Havacılık Tesislerinde Sürdürülebilir İnşaat Uygulamaları makalesinde, Fort Lauderdale Executive Havalimanının (FXE) sürdürülebilir havalimanı olma yönünde LEED Altın sertifikası hak kazanmasını sağlayan uygulamalardan bahsetmektedir. (Vélez-Vega vd. 2013)

Altın sertifika almasına etki eden uygulama revizyonları özetlemek gerekirse;

- 1- Sürdürülebilir alanlar kategorisinde;
 - Herhangi bir birinci sınıf tarım arazisinde veya tehdit altındaki veya nesli tükenmekte olan herhangi bir türün yaşam alanı olarak özel olarak tanımlanan arazide veya herhangi bir sulak alanın veya özel önem taşıyan alanların 30 metre yakınında geliştirilmemesi nedeniyle 8 puan,
 - Projenin Toplu Taşıma Erişimi sağlaması nedeniyle Alternatif Ulaşım 4 puan,
 - Genel olarak yüzey akışını yerinde tutan ve yavaş yavaş toprağa sızmasına izin veren bir yağmur suyu yönetim planı uygulayarak %50'den az veya buna eşit mevcut geçirimsizlik gereksinimlerini karşılaması, aynı zamanda geçirimsiz örtüyü azaltan, sızmayı teşvik eden ve kabul edilebilir 'En İyi Yönetim Uygulamalarını (BMP'ler)' kullanarak ortalama yıllık yağışın %100'ünden gelen yağmur suyu akışını yakalayan ve işleyen bir yağmur suyu yönetim planı uygulanması sebebi ile 2 puan,
- 2- Su verimliliği kategorisinde; verimli sulama teknikleri, kuraklığa dayanıklı bitkiler ve yeniden toplanan yağmur suyu kullanılarak çevre düzenlemesi için içme suyu kullanımını %50 oranında azaltan su tasarruflu peyzaj düzenlemesini kapsayan Su Verimliliği alanında 5 puan, (Sarnıç suyunun sulama, tuvalet ve pisuar sifonlarında kullanılması için de bir sarnıç tasarlanmış, içme suyunun azaltılmasına yönelik yüksek verimli armatürler, susuz pisuarlar ve el sensörleri kullanılarak su kullanımı da %30 oranında azaltılmıştır.)
- 3- Enerji ve atmosfer kategorisinde;

- Florida Enerji Kanunu'na göre enerji maliyetini %21 oranında azaltarak enerji performansını optimize ettiği için 6 puan,
 - Aydınlatma, yalıtım, HVAC enerji geri kazanım üniteleri ve yüksek performanslı bina kabuğunun verimliliğini değerlendirmek için bir enerji modeli geliştirilip, tasarım belgelerini incelemek ve yüklenici sunumlarını incelemek için bağımsız bir devreye alma temsilcisinin kullanılmasıyla Gelişmiş Devreye Alma için de 1 puan,
- 4- Malzemeler ve kaynaklar kategorisinde; inşaat/yıkım atıklarının geri dönüştürülmesiyle inşaat atık yönetiminin %75'inin yönlendirilmesi nedeniyle Malzemeler ve Kaynaklar alanında 4 puan,
- 5- İç mekan çevre kalitesi kategorisinde; dış hava dağıtımını izlemek: havalandırma oranlarının minimum yönetmelik gerekliliklerine göre %30 oranında artırılması, inşaat iç hava kalitesi yönetim planı (inşaat sırasında ve öncesinde), düşük emisyonlu malzemeler, yapıştırıcılar ve sızdırmazlık malzemeleri, boyalar ve kaplamalar, halı sistemleri, kompozit ahşap ve tarımsal elyaf ürünleri, iç mekan kimyasalları ve kirletici kaynak kontrolü, aydınlatma, ısı konfor, tasarım ve doğrulama gibi sistemlerin kontrol edilebilirliği puanlamalarından toplam 14 puan,
- 6- İnovasyon ve Tasarım kategorisinde; su kullanımını %40 oranında azaltma gibi örnek bir performansla İnovasyon ve Tasarım alanında 5 puan kazanmıştır.

Fort Lauderdale Executive Havalimanının ekipman ve hizmet tesisi binasının altın LEED sertifika puanlama tablosu Çizelge 2.3'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.3. FXE Havacılık Ekipman ve Hizmet Tesisi LEED Kredi Özeti

Kredi Maddesi	Dizayn Notu
Sürdürülebilir Alanlar	8
Su Verimliliği	5
Enerji ve Atmosfer	6
Malzeme ve Kaynaklar	4
İç Mekan Çevre Kalitesi	14
İnovasyon ve Dizayn Süreci	5
Toplam Kazanılan Dizayn Puanı	42*
* Resmi LEED v2 Puanlama: Sertifikalı:26-35 Gümüş:33-38 Altın:39-51 Platinyum:52+	

Makale aynı zamanda FXE dışında sürdürülebilir çözümler kullanan havalimanları ve çözümleri hakkında da bilgi vermektedir. Kuzey Florida'daki Tallahassee Bölge Havaalanı (TLH), eski bir terminal beton apronu temizleyerek bunu yeni bir asfalt apronun temel tabakası olarak kullandığını, Napoli Bölgesel Havalimanı'nda (APF) mevcut beton apron kaldırılarak yeni kaplama yapısı için temel kaplama malzemesi olarak geri dönüştürüldüğü örneklerini de bilgi olarak vermektedir. (Vélez-Vega vd. 2013).

Makale kapsamında yapılan literatür taramalarında, (Rupatha vd. 2015) tarafından ticari binalarda enerji performansını iyileştirmek için tanımlanan yol haritası; (Harish ve

Kumar, 2015) tarafından yapılan güç sistemlerinin modellemesi ve kontrolü çalışması; herhangi bir binanın enerji sistemini etkileyen faktörleri inceleyen çalışma (Santos vd. 2016) ve (Kneifel, 2010) tarafından yapılan LCC hesaplaması için yeni ticari binalarda farklı maliyet etkin enerji verimliliği iyileştirmeleri çalışması incelendi.

Tez kapsamında, NZEB mimarisine ulaşabilmek için bağımsız değişkenler ve etki dereceleri incelenmiş olup, korelasyon katsayısı yüksek olan değişkenler ile istatistiksel model oluşturulmuştur. Her bina, kendine has bir mimari yapı, bina kabuğu, inşaat malzemesi, cam malzemesi, gün ışığından yararlanma durumu, cephesi gibi çok değişken parametrelerle sahip olması sebebi ile farklı istatistiksel modele sahip olacağı düşünülmektedir. Bu sebeple, birçok bina için birçok model ve algoritma çalışılmıştır. 2010 yılında Tuhus-Dubrow ve Krarti, konut binalarının enerji kullanımını ve yaşam döngüsü maliyetini en aza indirmek için bir genetik algoritma benimsemiş ve çeşitli bina formlarının yanı sıra bina kabuğu parametrelerini de araştırmışlardır. 2012 yılında Fesangary ve arkadaşları, harmoni arama algoritmasına dayalı çok amaçlı bir optimizasyon modeli önermiş ve yaşam döngüsü maliyetini ve karbondioksit eşdeğeri emisyonları en aza indirmek için bir konut binasının kabuk parametrelerini optimize etmiştir. 2013 yılında Lartigue vd. karar değişkenleri olarak pencere-duvar oranını (WWR) ve pencere tipini seçmiş, bir yatakhane odasının ısıtma yükünü, soğutma yükünü ve gün ışığı performansını optimize etmiştir. 2015 yılında Méndez Echenagucia vd. açık alanlı bir ofis binasının ısıtma, soğutma ve aydınlatma enerjisini en aza indirmek için pencerelerin sayısını, konumunu, şeklini ve tipini ve yığma duvarların kalınlığını optimize etmiştir.

Tez kapsamında geleceğe yönelik gerçekleşecek enerji tüketimleri, 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.

Makine öğrenimi, bilgisayarların veri analizi yaparak örüntü yoluyla öğrenmesini ve deneyim yoluyla gelişmesini sağlayan bir yapay zeka dalıdır. Makine öğrenimi, verilerden desenler ve ilişkiler çıkararak, oluşturulan model aracılığı ile tahminler yapma, karar alma ve belirli görevleri daha etkin şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlar.

Makine öğrenimi algoritmaları hedeflenen sonuca göre birkaç sınıfa ayrılabilir (Stuart Russel; Peter Norvig (2003) [1995])

- 1- Denetimli Öğrenme (Supervised Learning): Denetimli öğrenme, bilgisayarların etiketlenmiş örnek verilerden öğrenme yeteneğini içerir. Bu modelde her eğitim örneği bir girdi ve ona karşılık gelen bir çıktıya (etikete, doğru cevaba) sahiptir. Bir e-postanın spam olup olmadığını tahmin etme (sınıflandırma) ya da bir evin fiyatını özelliklerine göre tahmin etme (regresyon) gibi etiketlenmiş veri setlerinde, model veri setlerini analiz ederek girdileri çıktıya eşleme yeteneğini geliştirir. Lojistik regresyon, destek vektör makineleri, karar ağaçları, KNN(K-En Yakın Komşu), denetimli öğrenme algoritmalarına örnek verilebilir.
- 2- Denetimsiz Öğrenme (Unsupervised Learning): Denetimsiz öğrenme, bilgisayarların etiketlenmemiş verilerden örüntüleri keşfetme yeteneğini içerir. Bu yaklaşım, verilerdeki yapıları anlamak ve veri setlerindeki gizli ilişkileri keşfetmek için kullanılır. Bir pazarlama analizi yapılırken, müşteri segmentlerini

- belirlemek (kümeleme) ya da veri setlerini daha anlaşılır hale getirmek için boyut sayısını azaltma (boyut indirgeme) için denetimsiz öğrenme teknikleri kullanılır. Belirlenen yöntemler ile önceden tanımlanmış etikete gerek kalmadan veri setindeki doğal gruplamalar ve veri desenleri keşfedilir. Kümeleme ve özellik çıkartma, denetimsiz öğrenme algoritmalarına örnek verilebilir.
- 3- Pekiştirmeli Öğrenme (Reinforcement Learning): Pekiştirmeli öğrenme, bir ajanın bulunduğu çevre ile etkileşimde bulunarak deneme-yanılma yoluyla (ödül-ceza tekniği kullanılarak) en uygun davranışı öğrenme yeteneğini içerir. Bu öğrenme metodu, karar alma ve kontrol problemleri için kullanılır. Ajan, belirli eylem ve aksiyonlar gerçekleştirir ve deneyimleme sonuçlarına göre ödül ya da ceza alır. Bu ödüller ve cezalar, ajanın davranışını optimize etmesine yardımcı olur. Örnek uygulamaları, bir robotun belirli bir ortamda dengede kalmasını öğrenmesi, bilgisayar oyunu geliştirme, online reklam alıcılarına otomatikleştirilmiş fiyat teklifi verilmesi gibi uygulamalar için pekiştirmeli öğrenme kullanılabilir. Q öğrenme ve derin pekiştirmeli öğrenme, pekiştirmeli öğrenme algoritmalarına örnek verilebilir.
- 4- Yarı Gözetimli Öğrenme - Uygun işlev ya da sınıflandırıcılar oluşturmak için etiketli ve etiketsiz örnekleri birlikte ele alır. Bu öğrenme modeli, etiketlenmemiş verilere uygulanabilecek bağıl özellikler için etiketli verileri analiz eder. Etiketlenen veriler, bir başlangıç yapmaya çalışır ve öğrenme hızını ve doğruluğunu önemli ölçüde iyileştirebilir.

Makine öğrenimi süreci genellikle aşağıdaki adımlardan oluşur:

- 1- Veri Toplama ve Hazırlama:
 - Verilerin toplanması ve işlenmesi
 - Veri temizliği (eksik verilerin doldurulması, hatalı verilerin düzeltilmesi) ve özellik mühendisliği (önemli özelliklerin seçilmesi)
- 2- Veri Keşfi (Exploratory Data Analysis, EDA):
 - Verinin dağılımı, ilişkiler, ve istatistiksel özelliklerin incelenmesi
 - Görselleştirmeler (grafikler, histogramlar vb.) kullanılarak veri hakkında daha fazla bilgi edinilmesi
- 3- Model Seçimi ve Eğitim:
 - İlgili probleme uygun makine öğrenimi algoritması seçilmesi
 - Modelin eğitilmesi
- 4- Model Değerlendirme:
 - Modeli test verisi ile değerlendirme
 - Doğruluk, F1 skoru, hata payı, R2 gibi metrikler ile modelin performansını değerlendirme
- 5- Model İyileştirme:
 - Modelin hiperparametreleri (örneğin, karar ağacının derinliği veya öğrenme oranı) ayarlanarak daha iyi sonuçlar elde edilmesi
 - Modeli eğitmek için daha fazla veri toplanması ve modelin genelleme yeteneğinin artırılması
- 6- Sonuç Yorumlama:
 - Sonuçların iş çıktılarıyla anlamlı olup olmadığının kontrolü
 - Modelin doğruluğunun ve performansının zamana bağlı kontrolü
 - Modelin gerekmesi halinde yeni verilerle güncellenmesi ve iyileştirilmesi

Yapılan literatür taraması kapsamında, tez içerisinde kullanılan veri yapısına uygun iki model tespit edilmiş olup denenmiştir. Bu modeller, denetimli öğrenme algoritmalarından random forest makine öğrenimi ve ridge regresyon makine öğrenimi modelidir. RF, özellikle sınıflandırma ve regresyon problemlerini çözmek için kullanılır. RF modelinin avantajları arasında, hem sayısal hem de kategorik verilerle çalışılabilmesi, bagging yöntemi sayesinde aşırı öğrenme riskinin az olması ve modelin doğruluğunun artması, eğitim süresinin kısa olması ve hangi özelliklerin modelde daha önemli olduğunu belirlemek amacıyla özellik seçimi yapılabilmesi sayılabilir. Ridge regresyonu, doğrusal regresyon modelinin bir çeşididir ve aşırı uyum (overfitting) sorununu önlemek için L2 düzenleme tekniğini kullanır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Enerji Optimizasyonu Çalışmaları

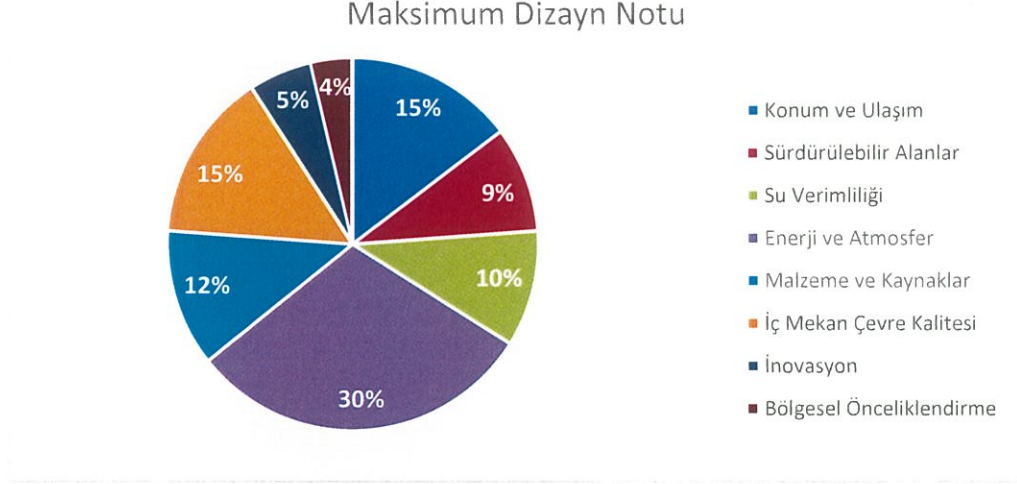
LEED, BREEAM, ACA ve NZEB kavramları, kredi başlıkları ve içerikleri, puanlamaları, havalimanlarında örnek yapılan çalışmalar, verimlilik etkileri, yapılan çalışmaların sürdürülebilirliğe ve karbon ayak izinin azaltılması hedefine olan katkılarının incelenmesi sonrası, havalimanı kompleksinde NZEB, LEED ve ACA için yapılan inovasyon çalışmaları detaylandırılacak, enerji verimliliğine, sürdürülebilirliğe, karbon ayak izine katkıları hesaplanmıştır.

Çalışma sırasında, mevcut durum analizleri için; 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) cihazları verimlilik hesaplamalarında ölçümler için kullanılmıştır.

Tez 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 3.1’de gösterilmiştir.

Enerji ve atmosfer puanlama kriteri, %30 ile en yüksek orana sahiptir. LEED sertifikasyon kriterine ek olarak NZEB mimarisinde enerjinin en önemli kriter olması sebebi ile bu alandaki iyileştirmelerin yatırım önceliklendirilmesinde üst sıralarda yer alacağı öngörülmektedir. Enerji ve atmosfer kriterini, %15 katkı oranı ile konum ve ulaşım ve iç mekan çevre kalitesi takip etmektedir. Bu puanlama kriterlerinin altında yer alan alt puanlama kriterleri (güneş ışığı, termal konfor, karbon ayak izi azaltımı vb.), hem NZEB mimarisi, hem de ACA sertifikasyonu için önemli girdilerdir. Bu sebeple yapılan önceliklendirmeler, her sertifikasyon türü için aynı önemi göstermektedir.



Şekil 3.1. 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 tez 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 (3.1) bağlantısı ile hesaplanmıştır.

$$NPV = \sum \frac{Faydalar_t}{(1+r)^t} - \sum \frac{Maliyetler_t}{(1+r)^t} \quad (3.1)$$

Burada;

NPV= İndirgenmiş değer (Net Present Value)

Faydalar_t = t yılındaki faydalar

Maliyetler_t = t yılındaki maliyetler

r = İskonto oranı

t = yıl sayısı

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 (3.2) bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Geri Ödeme Süresi} = \frac{\text{Yatırım Maliyeti}}{\text{Yıllık Nakit Akışı}} \quad (3.2)$$

Enerji optimizasyonu kapsamında, termal konfor ve karbon ayakizi azaltımı ölçümleri de yapılmıştır.

Karbon ayak izi hesaplaması, enerji tüketimine bağlı olmak üzere (3.3) bağıntısı baz alınarak hesaplanmıştır.

$$\text{CO}_2 \text{ Emisyonu} = \text{Enerji Tüketimi} \times \text{Emisyon Faktörü} \quad (3.3)$$

Enerji Tüketimi: Tüketilen enerji miktarı (örneğin, kWh, litrelik yakıt, metreküp gaz).

Emisyon Faktörü: Birim enerji tüketimi başına salınan CO₂ miktarı.

Bu faktör, kullanılan enerji türüne bağlı olarak değişmektedir. Tez kapsamında kullanılan emisyon faktörleri Çizelge 4.1'deki gibidir.

Ortalama olarak %45'lik kredi maddesi puanını sağlamak için uygun geliştirme projeleri bulunması hedeflenmiştir.

3.2. Makine Öğrenimi Modeli

Enerji tüketim tahmini için, verilerimiz zaman serisi olması sebebi ile zaman serisi verilerde sıkça kullanılan başarı oranı fazla olan ridge regresyon modeli ve random forest yöntemleri kullanılmıştır. Doğrusal regresyonun genel matematiksel modeli (3.4) bağıntısı ile gösterilmiştir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \epsilon \quad (3.4)$$

Burada:

y = hedef (bağımlı) değişken,

$X_1, X_2, \dots, X_p$ = bağımsız değişkenler,

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ = modelin parametreleridir,

ϵ = hata terimidir (gerçek değer ile tahmin edilen değer arasındaki fark)

MSE, tüm gözlemler için tahmin hatalarının karelerinin ortalamasıdır ve (3.5) bağıntısı ile gösterilmiştir.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2 \quad (3.5)$$

Burada:

n = gözlem sayısıdır,

y_i = gerçek değerler,

$\tilde{y}_i$ = modelin tahmin ettiği değerlerdir.

MSE'yi minimize etmek, modelin hata terimlerinin karelerini küçültmeye çalışmaktır. Ridge regresyonu, doğrusal regresyon modeline L2 regularizasyonu ekler. L2 regularizasyonu, modelin katsayılarının büyüklüğünü cezalandırarak aşırı uyum yapmasını engellemeye çalışır. Ridge regresyonunun kayıp fonksiyonu (3.6) bağıntısı ile gösterilmiştir.

$$Kayıp Fonksiyonu = MSE + \lambda \sum_{j=1}^p \beta_j^2 \quad (3.6)$$

Burada:

λ = regularizasyon parametresidir ve penalize etme gücünü kontrol eder

$\sum_{j=1}^p \beta_j^2$ = modelin katsayılarının karelerinin toplamını ifade eder. Bu, katsayıların büyük olmasını engellemeye çalışır.

Bu regularizasyon terimi, modelin parametrelerinin aşırı büyümesini engeller ve modelin genelleme gücünü artırır. Ridge regresyonunda kayıp fonksiyonu minimize etmek için kapalı formda (3.7) bağıntısındaki gibi bir denklem elde edilir.

$$\hat{\beta} = (X^T X + \lambda I)^{-1} X^T y \quad (3.7)$$

Burada:

X = gözlem matrisi (her bir satır bir gözlemi ve her bir sütun bir değişkeni temsil eder)

X^T : matrisin transpozu,

I : birim matris (diagonal elemanları 1 olan kare matris),

y : hedef vektörü (bağımlı değişkenin gözlemleri),

λ : regularizasyon parametresidir.

İkinci tercih edilen random forest modeli karar ağaçlarının birleşiminden oluşur ve matematiksel olarak her bir karar ağacının tahmini kullanarak genel tahmini üretir.

Regresyon için (3.8) matematiksel ifadesi kullanılır.

$$\hat{y}(x) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \hat{y}_k(x) \quad (3.8)$$

Burada;

$\hat{y}_k(x)$ = k-inci karar ağacının regresyon tahmini,

K = toplam ağaç sayısıdır.

Sınıflandırma için (3.9) daki matematiksel ifadesi kullanılır.

$$\hat{y}(x) = \text{majority vote} (\hat{y}_1(x), \hat{y}_2(x), \dots, \hat{y}_K(x)) \quad (3.9)$$

Burada;

$\hat{y}_k(x)$: k-inci karar ağacının regresyon tahmini,

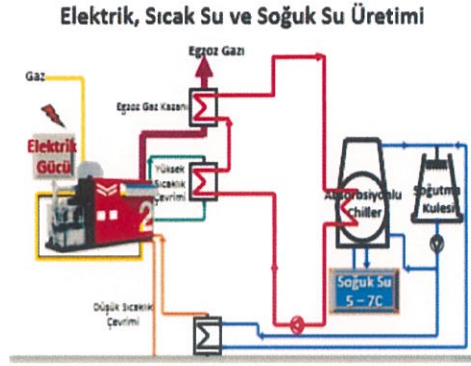
majority vote = her bir ağacın sınıf tahminini alıp, en sık tahmin edilen sınıfı seçmeyi ifade eder.

4. BULGULAR

Tez kapsamında öncelikli olarak geliştirmeye açık alanların belirlenebilmesi için mevcut durum analizleri yapılmıştır.

4.1. Mevcut Durum Analizleri

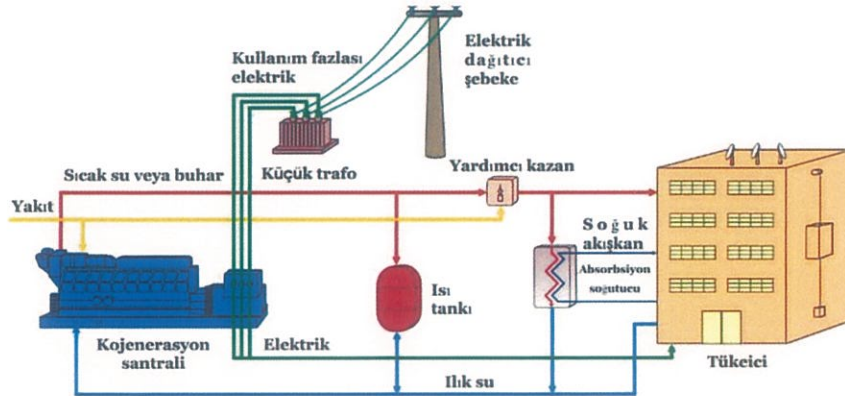
Havalimanı, trijenerasyon enerji santraline sahip olup, elektrik, sıcak su/buhar ve soğuk su olmak üzere üç farklı enerji çıktısına sahiptir.



Şekil 4.1. Trijenerasyon Tesisi Örnek Çalışma Şematığı

Şekil 4.1’de trijenerasyon tesisinin örnek çalışma şematığı gösterilmektedir. (https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/14_9.pdf, Erişim Tarihi: Mart,2020). Havalimanı kapsamında, absorpsiyonlu chiller teknolojisi ile sıcak su veya buhar kullanılarak ayrıca soğuk su elde edilmektedir.

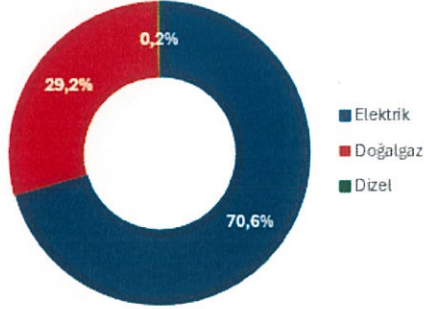
Şekil 4.2’de verilen trijenerasyon tesisinin genel görüşü, üretilen enerji çıktılarının giriş noktaları genel olarak gösterilmektedir. (http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/9e595be0c7d924a_ek.pdf?tipi=2&туру=X&sube=9, Erişim Tarihi: 2015)



Şekil 4.2. Trijenerasyon Tesisi Genel Görünümü

1 yıllık yapılan ölçümler ile havalimanının enerji miktarının %44'ünü elektrikten, %55'ini doğalgazdan, %1'ini ise dizel yakıttan karşıladığı tespit edilmiştir. Toplam enerji maliyeti payları ise Şekil 4.3'de gösterildiği gibidir.

ENERJİ MALİYET % PAYLARI

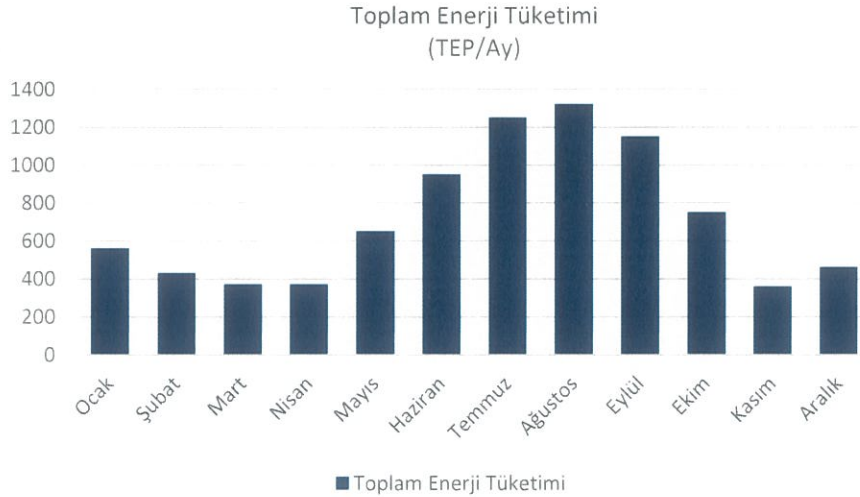


Şekil 4.3. Enerji Maliyetleri % Payları

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

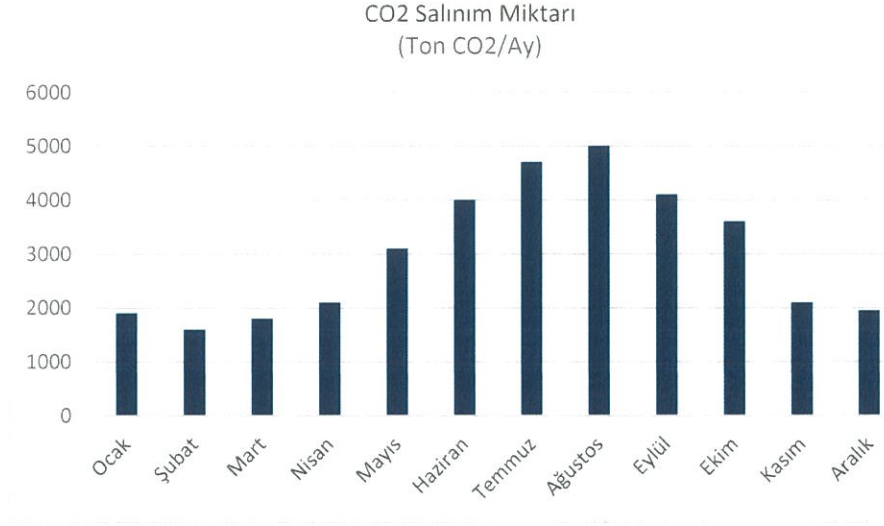
Tüketilen doğalgazın havalimanı bölümlerine kırılımları ise, %5 Terminal 1 ısı merkezi, %0,2 Terminal 2 enerji merkezi, %94,8 Yeni kuvvet santrali olduğu tespit edilmiştir.

Ölçülen yıl boyunca aylara sarıh toplam enerji tüketimleri ise Şekil 4.4'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.4. Toplam Enerji Tüketimi

Karbondioksit salınım miktarı hesaplamasında, ortalama yaklaşık 3.000 ton CO₂/ay olduğu gözlemlenmiş ve aylara sarıh ölçüm grafiği Şekil 4.5'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.5. Karbondioksit Salınım Miktarı

Karbon ayak izi hesaplamasının en genel ve basit formülü, tüketim miktarı ve emisyon faktörünün çarpımı şeklindedir. Havalimanının karbondioksit ayak izi hesabı yapılırken, spesifik enerji tüketimleri ve emisyon faktörleri ayrı ayrı (4.1) bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.

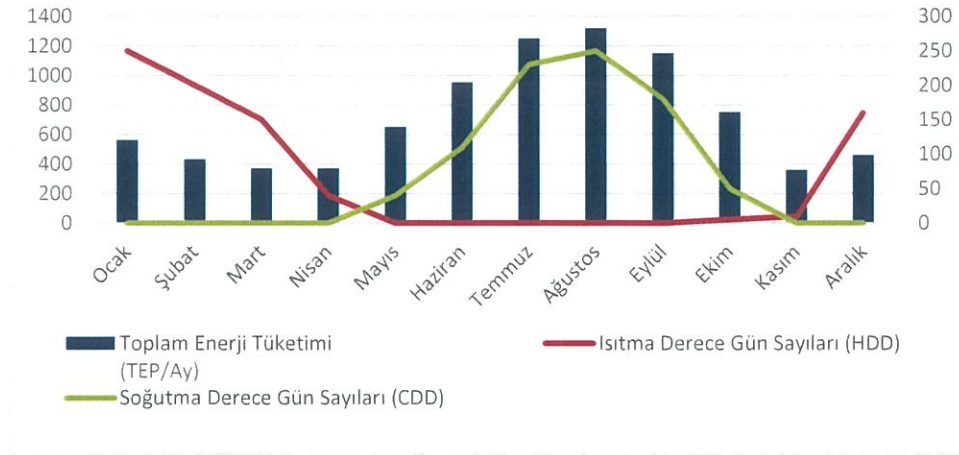
$$CO2 \text{ Emisyonu} = \text{Enerji Tüketimi} \times \text{Emisyon Faktörü} \quad (4.1)$$

Enerji Tüketimi: Tüketilen enerji miktarı (örneğin, kWh, litrelik yakıt, metreküp gaz).

Emisyon Faktörü: Birim enerji tüketimi başına salınan CO₂ miktarı.

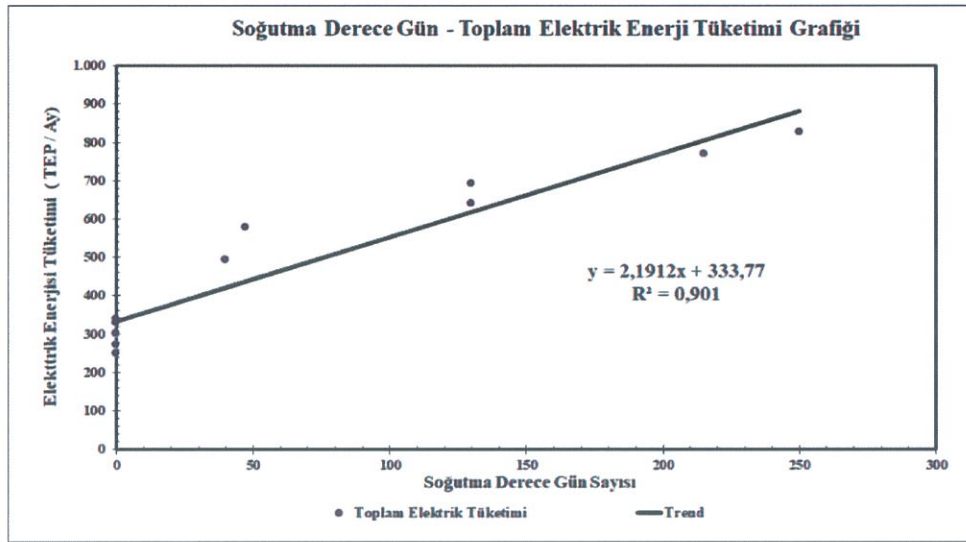
Bu faktör, kullanılan enerji türüne bağlı olarak değişmektedir. Hesaplamalarda kullanılan emisyon tablosu, Çizelge 4.1'deki gibidir. Enerji tüketimi ve CO₂ salınım grafiğinin benzer eğilime sahip olduğu gözükmemektedir. Literatür taramalarında da yaptığımız önemli çıkarımlardan biri de, enerji tüketiminde verimliliğin sağlanması ve daha yeşil enerji kaynaklarından enerjinin elde edilmesinin karbon ayak izi azaltılması hedefine önemli katkı sağladığıdır.

Enerji tüketiminde büyük etkisi bulunan ısıtma soğutma sistemlerinin mevcut durum analizleri, geliştirme/iyileştirme çalışmalarına baz teşkil edeceğinden, Şekil 4.6'da ısıtma, soğutma derece gün değerleri ve toplam enerji tüketimi verileri gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Isıtma Soğutma Derece Gün Değerleri

Grafikler baz alındığında, özellikle yaz aylarında soğutma yükünün artmasıyla beraber chillerlerin devreye girmesi sonucu elektrik enerji tüketimindeki artış normal olarak değerlendirilebilir.

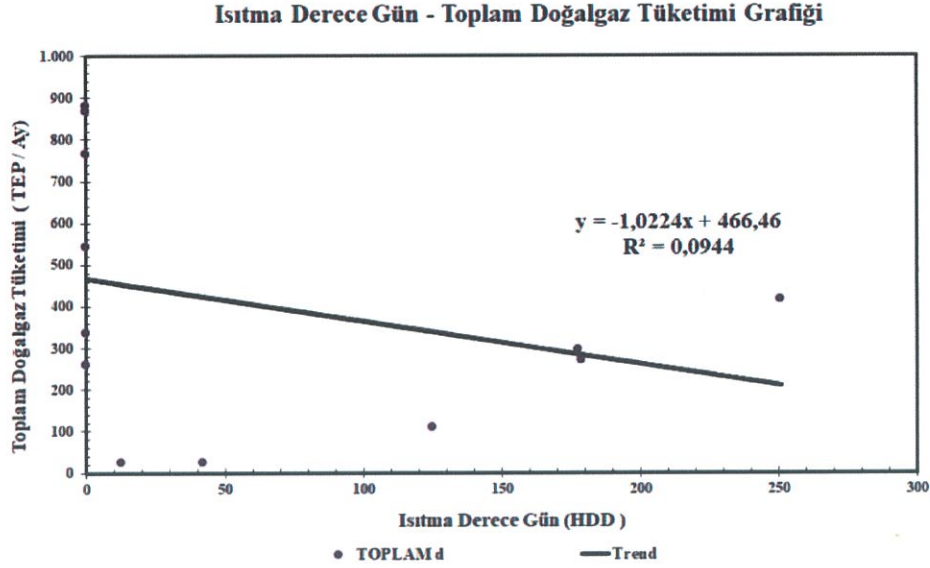


Şekil 4.7. Elektrik Tüketimi ile Soğutma Derece Gün Değeri Kıyaslaması

Şekil 4.7’de belirtilen regresyon analizinden de görüleceği üzere toplam elektrik enerjisi tüketiminin Soğutma Derece Gün Sayısı ile korelasyonu kıyaslandığında $R^2=0,901$ olarak çıkmaktadır. İdeal koşullarda bu değer $R^2=1$ ’e yaklaşır. Buradan elektrik enerjisi ihtiyacının belirlenmesinde Soğutma Derece Gün Sayısının belirleyici olduğu yukarıda grafikten anlaşılmaktadır. Yazın soğutma ihtiyacının artması ile beraber elektrik enerjisi tüketiminin artmasına bağlı olarak, soğutma derece gün sayısı ile elektrik tüketimi arasındaki korelasyonun yüksek olması normal olarak değerlendirilmektedir.

Şekil 4.6’da toplam enerji tüketimi ve ısıtma derece gün sayıları karşılaştırması gösterilmekte olup, tüketilen doğalgaz miktarının bir kısmı ile elektrik üretimi yapıldığı

için ısıtma derece gün sayısı ile doğalgaz tüketimi arasında anlamlı bir korelasyon kurulamamıştır. Gerçekleştirilen regresyon analizi sonuçları Şekil 4.8’de belirtilmiştir. Grafikten görüleceği üzere toplam doğalgaz tüketiminin ısıtma derece gün sayısı ile ilişkisinin $R^2=0,0944$ gibi düşük bir değere sahip olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebinin tüketilen doğalgazın bir miktarının elektrik üretiminde kullanılması olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.8. Toplam Doğalgaz Tüketimi ile Isıtma Derece Gün Değeri Kıyaslaması

Enerji tüketimi kaynaklı karbondioksit emisyonu salınımı miktarları incelendiğinde CO_2 salınımının m^2 bina alanı başına yaklaşık $180 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2 \times \text{Yıl}$ olduğu görülmektedir. Enerji tüketimi kaynaklı karbondioksit salınımı miktarlarının hesaplanmasında kullanılan referans değerler, Çizelge 4.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. 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	

Terminal binası ve sorumluluk alanı içindeki binaların ısıtma ihtiyacı için genel olarak Isı Merkezi'ndeki sıcak su kazanları ve trijenerasyon ünitesinden gelen ısı enerjisi kullanılır.

Üretilen sıcak su, terminallere ilgili pompa grubu ile gönderilir. Terminallerde bulunan pompa odalarında ihtiyaca göre klima santrali ya da fan coil ünitelerine ayrıca pompalar aracılığı ile gönderilir. Trijenerasyon tesisi çalıştırılmadığı ya da yetersiz geldiği durumlarda terminallerin ısıtma ihtiyacını karşılamak amacıyla doğalgaz ve fuel-oil ile çalışan sıcak su kazanı kullanılmaktadır. Üretilen sıcak su ilgili terminalin pompa dairesine gönderilir ve buradan gerekli yerlere (Klima santrali, FCU sistemleri vb.) pompalar ile dağıtımı yapılır.

Yapılan ölçümlerde, her üç terminal için klima santrallerine soğuk ve sıcak su sağlayan ısı pompalarının verimliliklerinin sırasıyla %32, %45 ve %50 olarak bulunmuştur. Isı pompalarının verimliliklerinin düşük olduğu tespit edilmiş olup, öncelikli olarak iyileştirilmesi gereken yatırım projesi içerisinde yer almıştır.

Isıtma soğutma sistemi sistemi için ek olarak yapılan termal kamera ölçümlerinde, bazı tesisat elemanlarında izolasyon eksiklikleri saptanmış olup izolasyon eksikliklerinin giderilmesi ile enerji tasarrufu elde edilmesi için iyileştirme projeleri içine dahil edilmiştir.

Kazanların baca gazı analizlerinde, O₂ miktarının ideal seviyede olmadığı tespit edilmiştir (İdeal O₂ oranı %3). Kazanlara uygulanacak oksijen trim sistemi ile bu değer için ideal koşullara çekilmesi sonucu enerji tasarrufu elde edileceği için iyileştirme projeleri içine dahil edilmiştir.

Kazanlar için baca gazı sıcaklıkları ortalama 150 °C'nin üzerinde ölçülmüştür. Bu değer doğalgaz yakıtlı kazanlarda 120 °C civarına kadar düşürülebilmektedir. Fakat yapılan ölçümlerde atık ısı geri kazanım potansiyeli ve çalışma süresinin yetersiz kalması nedeniyle ekonomizer uygulaması yerine brülörde yapılacak yanma ayarı ile baca gazı sıcaklığının düşürülmesi sonucu enerji tasarrufu sağlanabilecektir.

Terminal binaları ve sorumluluk alanı içindeki binaların kullanım suyu ihtiyacını karşılamak amacı ile kullanılan pompa sistemlerinde oluşur. Yapılan mevcut durum analizlerinde, ölçümlerde hidrofor pompalarının verimliliklerinin düşük olduğu (ortalama %36) tespit edilmiş olup, iyileştirme projeleri içerisine dahil edilmiştir.

Havalimanında ağırlıklı olarak LED aydınlatmalar kullanılmaktadır. Fakat bazı noktalarda floresan ve metal halide aydınlatmaları da bulunmaktadır. Mevcut lambalardan çalışma süresi yüksek olan düşük verimli lambalar, ışık verim değeri yüksek olan lambalar ile değiştirilmesi, ek olarak LED olmayan aydınlatmaların 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 verimliliğinin yüksek olması ve yüklenme oranlarının az olması sebebi ile iyileştirme projesine dahil edilmemiştir.

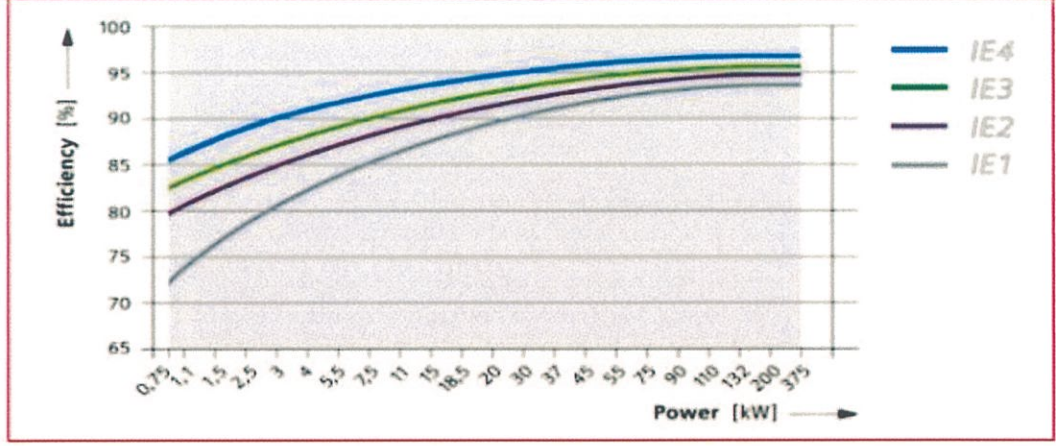
Harmoniklerin varlığı motor manyetik kayıpların frekansla orantılı olması sebebiyle motorda kayıpların artmasına ısınmayla birlikte arızaların yaşanmasına sebep olacaktır. 5. harmoniğin yarattığı ters-dönen bir alana karşın 7. harmonik ve 11. harmonik motorun senkron hızından bağımsız ayrı bir dönen alan yaratır ve meydana gelen tork darbesi kaplin ve yataklarda aşınma ve hasara neden olur. Hızının sabit olması nedeniyle harmoniklerin taşıdığı enerji ısıya dönüşür ve motor ömrünü kısaltıcı etki yapar. Ayrıca, rotora geçen harmonik akımların yarattığı ilave ısı rotor/stator arasındaki hava boşluğunu daraltarak motor verimliliğinin düşmesine yol açar. Harmonik ölçümlerine ek olarak, gerilim dengesizlikleri de saptanmalıdır. Gerilim dengesizliği güç kalitesi sorunlarının en önemlilerinden birisidir. Motorlarda erken aşırı ısınmaya sebep olmaktadır. Ölçümü için motor kablo bağlantılarından gerilim ölçülerek gerilim dengesizliğinin % 1'in altında kaldığı doğrulanmalıdır. Havalimanı içerisindeki elektrik dağıtım sistemine ait tek hat şeması kontrol edilerek yüklerin fazlara dengeli dağıtılıp dağıtılmadığı belirlenmelidir. Bu sebeple, şebekedeki harmonik ve gerilim ölçümleri yapılmıştır. Ölçülen bütün trafolarda THDI (Akım Harmoniği) değeri, limit değer olan %5'in üstündedir. Daha yüksek yüklenme oranlarında çalışması durumunda harmonik değerleri daha düşük olacaktır. Daha yüksek yüklerde akım harmoniği değerleri kontrol edilecektir. Ölçülen bütün trafolarda THDV (Gerilim Harmoniği) değeri limit değer olan %3 ün altındadır. Herhangi bir arızaya sebep olacak düzeyde değildir.

Ölçüm sonuçlarında, havalimanındaki hatlarda gerilim dengesizliği ile ilgili bir problem olmadığı görülmüştür. Fazlar arası gerilim farkları normal düzeydedir. Trafolardaki gerilim dengesizliği %0,13 ile 0,25 arasındadır. Gerilim dengesizliği sınır değeri olan %1'in çok altındadır. Herhangi bir verimsizliğe neden olacak seviyede değildir.

Havalimanında kullanılan AC motorların bazılarının 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. Özellikle fan ve pompa uygulamalarında devir değişimlerinde kübik şekilde güç değişimi yaşandığından sistem kontrollerini bu kurgu üzerine yapmak faydalıdır. Örnek olarak çalışan bir makinede boş çalışma durumlarında hızlarının düşürülmesi veya kapatılması ile ciddi miktarlarda enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

AC sürücü kullanılması her durum için şart değildir. Bunun yanında sistem uygunluğuna göre çift hızlı veya dahlander sargılı bir AC motor ile iş yapma esnasında uygun devir, boş çalışma, soğutma gibi zamanlarda da düşük devir çalıştırılarak enerji tasarrufları sağlanabilir. Uygun büyüklükte ve yüksek verimli motor seçimleri sayesinde de enerji tasarrufu sağlamak mümkündür. Özellikle de sürücü olmadığı halde düşük yükte çalışan motorların değişimi ile tasarruf sağlamak mümkündür. Havalimanında farklı güçlerdeki IE1 veya IE2 verimlilik sınıfındaki motorların IE4 verim sınıfındaki motorlarla değişimi sonucu oluşacak verimlilik artışı Şekil 4.9'da belirtilmiştir.

Motorların verimli motorlar ile değişimi ile hem motorlar yenilenmiş olacak hem de çıkan motorlar acil bir duruma karşı yedek olarak kullanılabilir.



Şekil 4.9. Verimlilik Sınıflarına Göre AC Motorların Verim Değerleri

Yüksek verimli motorların temel özellikleri aşağıda verildiği gibidir:

- Sargıda %20 – 60 daha fazla bakır
- Gövdede %35 daha fazla çelik
- Daha ince çelik laminentler
- Yüksek kalitede elektriksel çelik
- Daha verimli rotor tasarımı
- Düşürülmüş sargı ve sürtünme kayıpları ve ek kayıplar
- Daha uzun gövdeden dolayı düşürülmüş direnç (I^2R) kayıpları
- Rotor ve stator arasında optimum hava boşluğu
- Daha az mekanik tolerans

Verimlilik sınıfı IE1 ve IE2 olan 74 adet motorun IE4 verimlilik sınıfındaki motorla değişimleri analiz edilmiştir. Yıllık tüketim tasarrufu yaklaşık 260MWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Yatırımın geri ödeme süresi ise 3,7 yıl olarak hesaplanmıştır. Karbondioksit azalması ve sertifikasyon sürecine etkisi tezin devamında belirtilen iyileştirme önerileri özet tablosunda belirtilmiştir.

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.

Makine öğreniminin ilk ve ikinci aşaması olan veri toplama, hazırlama ve veri keşfi aşamalarında, geçmişe yönelik saatlik bazda olmak üzere 36 aylık enerji tüketim verileri kullanılmıştır. Bu noktada, özellik mühendisliği (feature engineering) yapılmıştır. Bir tarih verisinin elimizde olması sebebi ile, ham verimizden saat, gün ve ay gibi özellikler kod ile çıkarılmıştır. Daha sonra özellik dönüşümü aşamasında, modelin daha

iyi öğrenebilmesi adına, veri üzerindeki büyük farkları azaltmak için Log dönüşümü yapılmıştır. Bu dönüşüm ile veri daha uygun bir ölçeğe getirilmiştir. 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. Özellik mühendisliğinde "get lag" terimi, zaman serisi verisiyle çalışırken geçmiş verilerden yeni özellikler (features) elde etmek için kullanılan 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 özellikle 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.

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. Modele, öncelikli olarak önümüzde 1 aylık veri tahmin ettirildi. Bu 1 aylık veri de, tahminleme modelimize girdi teşkil edecek şekilde modelimizde kullanılarak 12 ay için 12 ayrı model tahminlemesi yapıldı. Toplam olarak 1 yıllık bir tahminleme algoritması oluşturuldu. 12 ayrı modeli birleştirip hibrit bir model oluşturduk. 12 adet ayrı ridge modeli, 12 adet ayrı random forest modeli oluşturularak, Üç ayrı terminal için de aynı 12 şer modeller oluşturulup, tek bir hibrit modele çevrilmiştir.

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

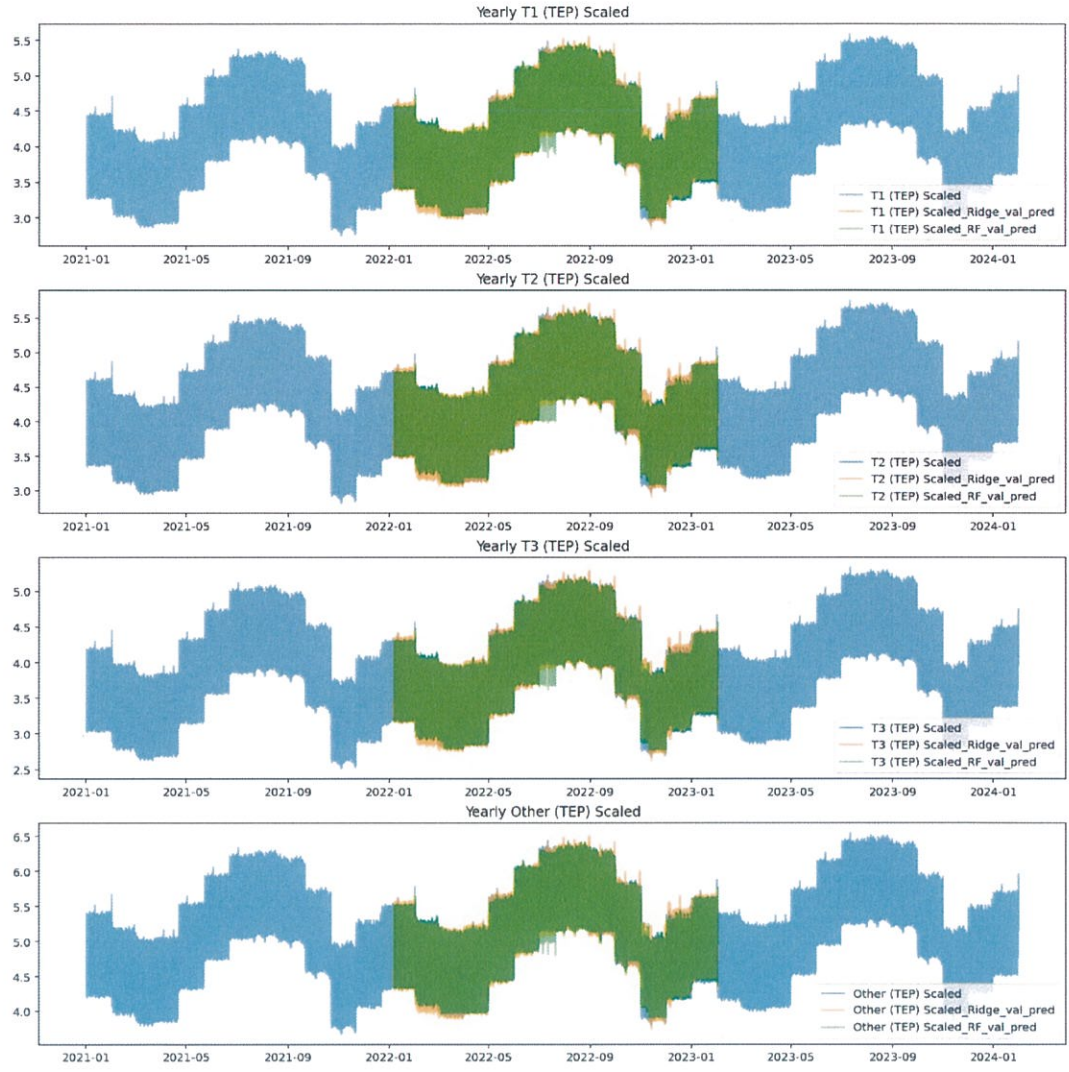
adımında, meta-modelin yaptığı tahminler veya düzeltmeler ile temel modelin tahminleri birleştirilmektedir. Böyle bir hibrit model kullanılmasının sebebi, genellikle daha doğru ve sağlam tahminler sağlamasıdır.

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

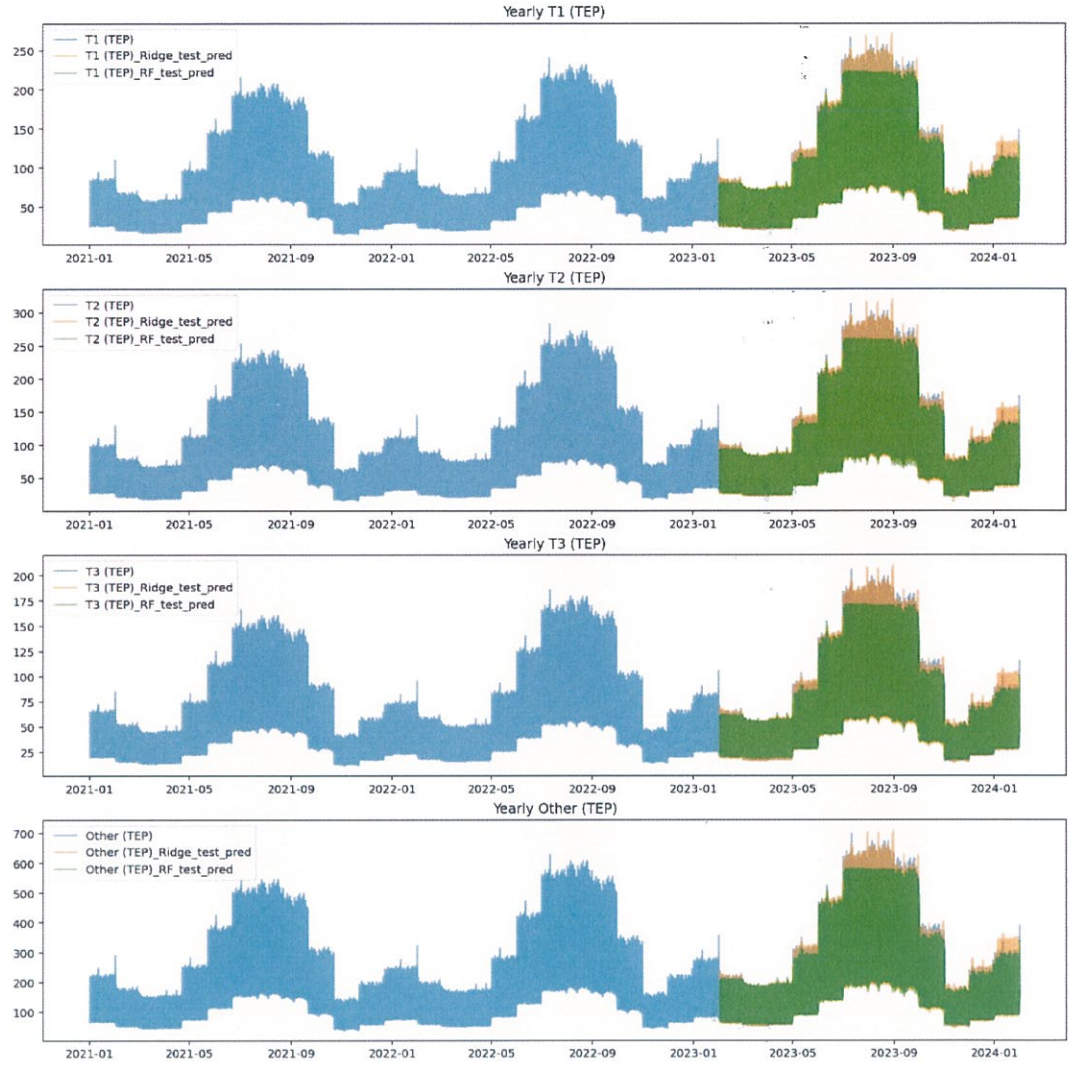
Validation T1 (TEP) Scaled - Ridge: MSE=-0.01285
Validation T1 (TEP) Scaled - RF: MSE=-0.01232
Validation T2 (TEP) Scaled - Ridge: MSE=-0.01392
Validation T2 (TEP) Scaled - RF: MSE=-0.0138
Validation T3 (TEP) Scaled - Ridge: MSE=-0.01251
Validation T3 (TEP) Scaled - RF: MSE=-0.01183
Validation Other (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

MSE (mean square error) değerinin sıfıra yakın olması, model başarısını desteklemektedir. MAE (mean absolute error) değeri kontrol edildiğinde ise, ridge regresyon modelinin, random forest'a göre daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

12 aylık veri eğitim için, 12 aylık veri model validasyonu, üçüncü yıl gerçekleşen 1 aylık veri de modellerin tahminleri ve gerçekleşen veri arasındaki sapmanın kontrolü için ayrılmıştır. Sonuçlar, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de gösterilmektedir.

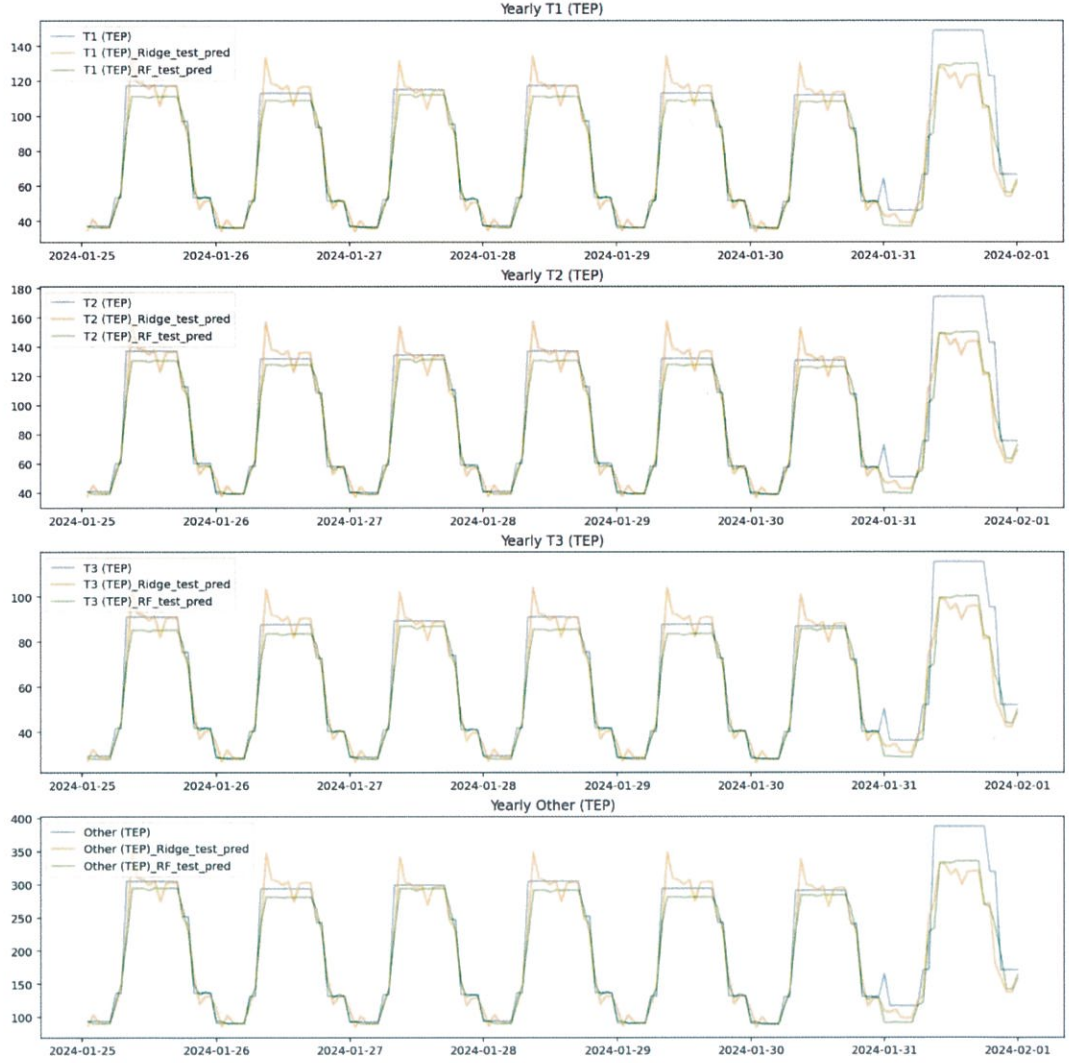


Şekil 4.10. Ridge ve RF Model Çıktıları-1



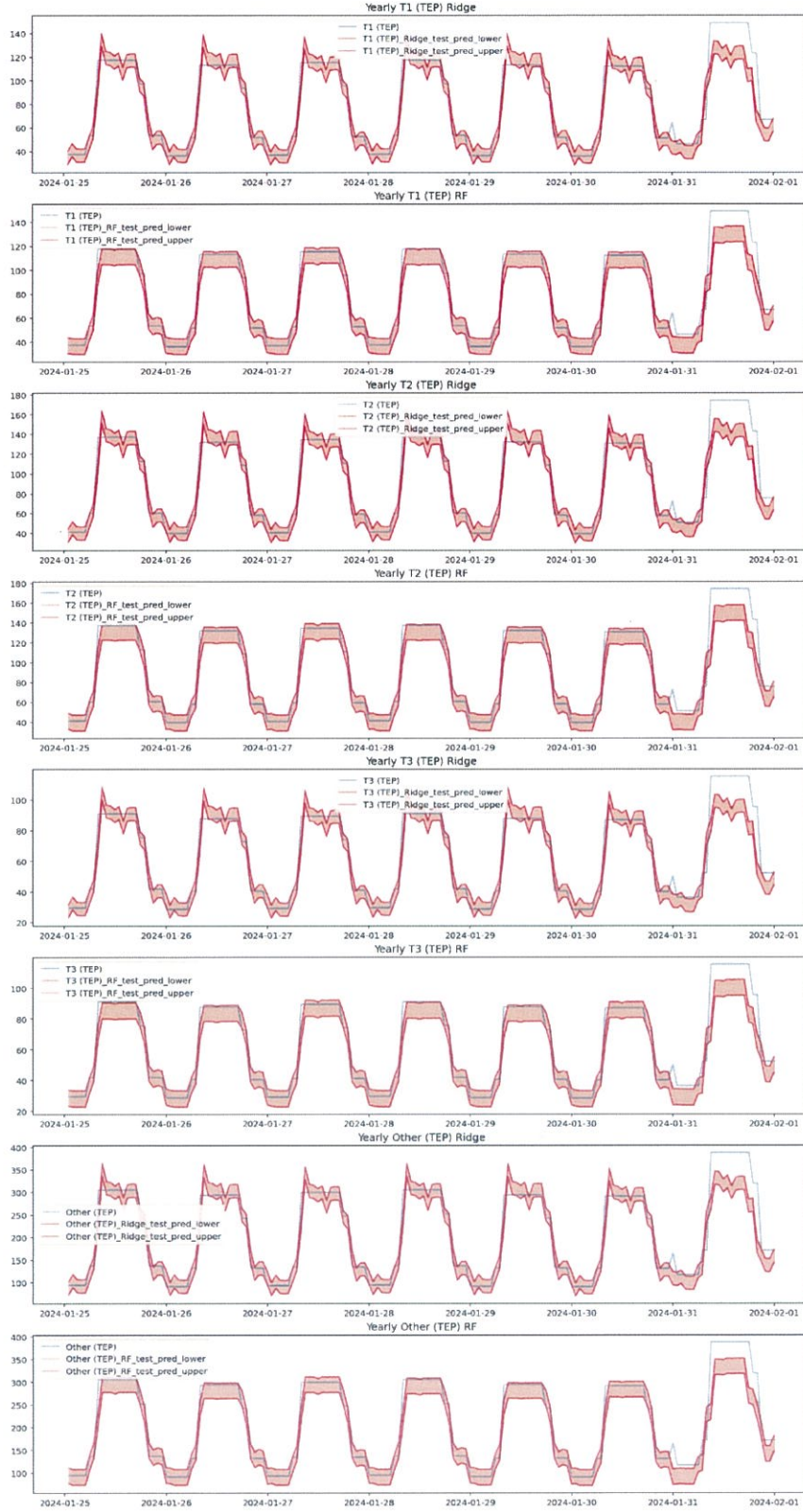
Şekil 4.11. Ridge ve RF Model Çıktıları-2

Şekil 4.12’de, RF, Ridge modelinin test sonuçları verilmiş olup, gerçek değerler ile tahmin sonuçlarını içeren değerler üst üste yazdırılmıştır. Gerçek sonuçlara en yakın tahmini veren model daha net gözlemlenmiştir.



Şekil 4.12. 2024 Yılı Gerçek Verileri ve Model Tahminleri Sapma Miktarları-1

Şekil 4.13’de, Ridge ve RF modelleri için yüksek ve düşük tahminlerin kıyaslama grafiği çizdirilmiştir.



Şekil 4.13. 2024 Yılı Gerçek Verileri ve Model Tahminleri Sapma Miktarları-2

4.2. İyileştirme Önerileri Özet Tablosu ve Sonuçlar

Yapılan tüm mevcut durum analizleri neticesinde, tasarruf edilecek elektrik enerjisi miktarı yaklaşık olarak 178TEP olarak hesaplanmıştır. 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. Siemens analiz programına tez kapsamında belirtilen 22 adet iyileştirme projesi işlenmiştir. Hesaplamalar sonucu majör iyileştirme projelerinin katkıları Çizelge 4.2’de sunulmaktadır.

Projelerin uygulama planları vadeleri ve yıl parametreleri kısıtlımı aşağıda belirtilen şekildedir.

Kısa Vade: 0-2 Yıl

Orta Vade: 2-4 Yıl

Uzun Vade: 4-6 Yıl

Uygulanabilir Değil: >6 Yıl

Çizelge 4.2. İyileştirme Proje Önerileri

Proje No	İyileştirme Projeleri	İlgili Tesis/	Enerji Türü	Tasarruf Miktarı			CO2 Azalma Miktarı	Çevresel Etki	Yatırım Geri Ödeme Süresi	Uygulama Planı Vade
		Ünite		Miktar	Birim	TEP/Yıl				
1.1.S.1	Tüm Kazanların Yanma Ayrar Optimizasyonu ile Enerji Tasarrufu Sağlanması-1	Isıtma Sistemi	Doğalgaz	4.186,00	Sm3	3,5	8	24	1,2	Kısa Vade
1.1.S.2	Tüm Kazanların Yanma Ayrar Optimizasyonu ile Enerji Tasarrufu Sağlanması-2	Isıtma Sistemi	Doğalgaz	7.233,00	Sm3	6	14	42	0,7	Kısa Vade
1.1.S.3	Pompa Odası Yalıtım Eksikliklerinin Tamamlanması	Isıtma Sistemi	Doğalgaz	758	Sm3	0,6	1	4	1,7	Kısa Vade
1.1.S.4	Kazan Mahali Isı Yalıtım Eksikliklerinin İyileştirilmesi ile Enerji Tasarrufu Sağlanması-1	Isıtma Sistemi	Doğalgaz	2.107,00	Sm3	1,7	4	12	3,7	Orta Vade

Proje No	İyileştirme Projeleri	İlgili Tesis/	Enerji Türü	Tasarruf Miktarı			CO2 Azalma Miktarı	Çevresel Etki	Yatırım Geri Ödeme Süresi	Uygulama Planı Vade
		Ünite		Miktar	Birim	TEP/Yıl				
1.I.S.5	Kazanlarının Yanma Ayarlarının Optimize Edilerek Baca Gazı Değiştirilmesi Sayesinde Enerji Tasarrufu Sağlanması	Isıtma Sistemi	Doğalgaz	3.510,00	Sm3	2,9	7	21	2,9	Orta Vade
1.S.A.1	Hidrofor Pompalarının Verimli Pompalar ile Değiştirilmesi-1	Su Arıtma Sistemi	Elektrik	29.520,00	kWh	2,5	16,3	49	3,3	Orta Vade
1.I.S.1	Klima Santrallerinde Direct-Drive Güç iletimi ile Enerji Tasarrufu Sağlanması	İklimlendirme Sistemi	Elektrik	764.474,00	kWh	65,7	423	1268	3,7	Orta Vade
1.S.S.1	Soğutma Pompalarının Verimli Pompalar ile Değiştirilmesi Sonucu Enerji Tasarrufu Sağlanması	Soğutma Sistemi	Elektrik	15.444,00	kWh	1,3	8,5	26	3,1	Orta Vade
1.A.A.1	Atık Su Arıtma Blowerlerinin O2 Miktarına Bağlı Olarak Kontrolü ile Enerji Tasarrufu Sağlanması	Atık Su Arıtma	Elektrik	80.280,00	kWh	6,9	44,4	133	3,1	Orta Vade
1.E.M.1	Motorların IE3 ve IE4 Verimlilik Sınıfı Yeni Motorlarla Değişimi ile Tasarruf Sağlanması	Elektrik Motorları	Elektrik	257.629,00	kWh	22,2	142,4	427	3,7	Orta Vade

Proje No	İyileştirme Projeleri	İlgili Tesis/	Enerji Türü	Tasarruf Miktarı		CO2 Azalma Miktarı		Çevresel Etki	Yatırım Geri Ödeme Süresi	Uygulama Planı Vade
		Ünite		Miktar	Birim	TEP/Yıl	Ton/Yıl			
1.S.S.2	Chiller Evaporatör Pompalarının Verimli Pompalar ile Değiştirilmesi-2	Soğutma Sistemi	Elektrik	32.244,00	kWh	2,8	17,8	53	3,6	Orta Vade
1.I.S.6	Baca Gazı Isısından Ekonomizer ile Geri Kazanım Yapılması Sayesinde Enerji Tasarrufu Sağlanması-1	Isıtma Sistemi	Doğalgaz	7.640,00	Sm3	6,3	15	45	5	Uzun Vade
1.S.A.2	Pompalarının Verimli Pompalar ile Değiştirilmesi-2	Su Arıtma Sistemi	Elektrik	8.541,00	kWh	0,7	4,7	14	4,3	Uzun Vade
1.S.S.3	Chiller Evaporatör Pompalarının Verimli Pompalar ile Değiştirilmesi-1	Soğutma Sistemi	Elektrik	27.072,00	kWh	2,3	15	45	4,3	Uzun Vade
1.S.S.4	Chiller Kondanser Pompalarının Verimli Pompalar ile Değiştirilmesi	Soğutma Sistemi	Elektrik	36.582,00	kWh	3,1	20,2	61	4	Uzun Vade
1.I.S.2	Klima Santrali Isıtma Pompalarının Verimli Pompalar ile	İklimlendirme Sistemi	Elektrik	22.464,00	kWh	1,9	12,4	37	5,1	Uzun Vade

1.A.S.1	Verimli Armatür Kullanımı ile Tasarruf Sağlanması	Aydınlatma Sistemi	Elektrik	486.238,00	kWh	41,9	268,8	806	9,7	Uygulanabilir Değil
Proje No	İyileştirme Projeleri	İlgili Tesis/ Ünite	Enerji Türü	Tasarruf Miktarı		CO2 Azalma Miktarı		Çevresel Etki	Yatırım Geri Ödeme Süresi	Uygulama Planı Vade
				Miktar	Birim	TEP/Yıl	Ton/Yıl	Ağaç Eşdeğer	Yıl	Vade
1.I.S.7	Baca Gazı Isısından Ekonomizer İle Geri Kazanım Yapılması Sayesinde Enerji Tasarrufu Sağlanması-2	Isıtma Sistemi	Doğalgaz	4.262,00	Sm3	3,5	8	24	9	Uygulanabilir Değil
1.I.S.8	Isı Pompası Verimlilik İyileştirilmesi	Isıtma Sistemi	Elektrik	2.430,00	kWh	0,2	1,3	4	23,4	Uygulanabilir Değil
1.S.A.3	Hidrofor Pompalarının Verimli Pompalar ile Değiştirilmesi-3	Su Arıtma Sistemi	Elektrik	6.570,00	kWh	0,6	3,6	11	6,1	Uygulanabilir Değil
1.S.S.5	Chiller Evaporatör Pompalarının Verimli Pompalar ile Değiştirilmesi-3	Soğutma Sistemi	Elektrik	15.316,00	kWh	1,3	8,5	25	7,5	Uygulanabilir Değil
1.S.S.6	Chiller Evaporatör Pompalarının Verimli Pompalar ile değiştirilmesi	Soğutma Sistemi	Elektrik	2.448,00	kWh	0,2	1,4	4	20,9	Uygulanabilir Değil

Enerji türlerine göre ayrılmış şekilde toplam tasarruf edilecek enerji miktarı, karbon ayak izi azalımı ve mevcut elektrik tüketimi içerisindeki oranı Çizelge 4.3’de sunulmuştur.

Çizelge 4.3 Tasarruf Potansiyeli Özet Tablosu

Enerji Türü	Tasarruf Edilecek Enerji Miktarı	Birim	TEP	CO2 Emisyonu Azalma Miktarı (Ton CO2)	Çevresel Etki (Ağaç Eşdeğer)	Oran %
Elektrik	1.787.253	kWh	153,6	988	2.963	3,96 %
Doğalgaz	29.696	Sm3	24,5	57	172	0,51 %
Toplam	1.816.949		178	1.045	3.135	

Çizelge 4.2’de belirtilen kısa, orta ve uzun vadeli yatırımlar, yatırımın geri dönüş süreleri hesaplanarak önceliklendirilmiştir.

CO2 miktarındaki azalma, öncelikle ACA sertifikasının bir üst seviyeye taşınması için önem arz etmektedir. Mevcutta Seviye 3+ Nötr sertifikasına sahip olan havalimanı tez kapsamında bahsedilen projelere ek olarak planlanan projeler ile Seviye 4+: Geçiş sertifikasını almak için çalışmalara başlamış durumdadır.

Yatırımın geri dönüş süresinden bağımsız olarak, klima santrallerinde Direct-Drive Güç iletimi ile Enerji Tasarrufu Sağlanması ve Aydınlatma Armatürlerinde Verimli Lamba Kullanımı ile Tasarruf Sağlanması projelerinin önemli oranda hem tasarruf edilecek enerji miktarına hem de CO2 oranına katkı sağladığı aşikardır.

5. TARTIŞMA

Tez kapsamında, LEED puanlama kriteri içerisinde en çok yoğunluğu içeren enerji üzerinde çalışılmış olup, enerji optimizasyonu ile NZEB mimarisinde önemli gelişme kaydedileceği düşünülmüştür. Bu sebeple tüketimi minimize eden tüm iyileştirme projeleri çıkarılmıştır. Aynı zamanda tez kapsamında, havalimanındaki tüm termianların, ek binaların ve yapıların NZEB kapsamında değerlendirilebileceği düşünülmüştür. Fakat NZEB mimarisinin, önerilen tüm iyileştirme projeleri uygulansa dahi tüm havalimanı için sağlamayacağı kanıtlanmıştır.

Literatür taramasında da saptandığı gibi, tüm havalimanı yapısı için değil havalimanı içerisinde yer alan belirli bir terminal/ek bina/yapı için NZEB mimarisi uygulanabilir olduğu görülmüştür. Tüm havalimanı yapısının yüksek güç tüketimine sahip olması sebebi ile mevcut üretim kaynakları ya da iyileştirilmiş enerji yönetim sistemi ile NZEB mimarisi sağlanamamaktadır.

Ayrıca, enerji optimizasyonunun NZEB mimarisini sağlamada etkisinin yüksek olacağı düşünülmüş, fakat tüm optimizasyon projeleri gerçekleştirilse dahi iyileştirme etkisinin ortalama elektrik enerjisi türünde %3,96, doğalgaz enerji türünde ise %0,51 olduğu görülmüştür. Literatür taramasında başka havalimanlarının küçük bir bölümünde yapılan enerji optimizasyonu çalışmaları daha iyi iyileşme sonuçlar vermiştir. Fakat çalışmanın yapıldığı havalimanı ‘Seviye 3+- Nötrlük’ seviyesine sahip olması sebebi ile enerji alanında yapılabilecek fark yaratacak öncelikli optimizasyon çalışmaları geçmişte yapılmıştır. Bu sebeple ‘Seviye 4-Dönüşüm’ ve ‘Seviye 4+ Geçiş’ derecelerinin gereklilikleri olan, karbon yönetimi hedeflerini küresel iklim hedefleriyle uyumlu hale getirmek ve operasyonlarını mutlak emisyon azaltımlarını göz önünde bulundurarak dönüştürme projeleri yapmak, aynı zamanda paydaş katılımını güçlendirmek ilk yol adımı olmalıdır. TEP iyileştirme etkisi beklenildiği kadar çok olmasa da, karbon emisyonu azalma miktarı ve çevresel etki iyileştirmeleri de göz önüne alınması halinde projelerin hayata geçirilmesi gerekliliği de önem arz etmektedir. Fakat enerji alanında yapılacak bu iyileştirmelerin, tez kapsamında tek başına yeterli olmadığı da tespit edilmiştir.

NZEB mimarisi için ise enerji tüketim miktarı, yenilebilir enerji noktası ve üretim miktarı, yapı bina kabuğu ve mimari projesi (güneş ışığından yararlanma, ısıyı ya da soğuk havayı iç alanda muhafaza etme gibi önemli hususlar) baz alınarak proje fazlarına ayrılmalıdır. Her bir proje için hazırlanan makine öğrenimi modeli kullanılarak tüketim tahmini ve tüketimin üretimden karşılanma miktarı ölçümlenmelidir.

Mevcut durumda sadece trijenerasyon üretim tesisine sahip olan yapı için, yüksek üretim gücüne sahip bir güneş enerji sistemi kurulacak uygun alan bulunmamaktadır. Konum itibari ile verimli olmayacağı hesaplanarak rüzgar enerji sistemi kurulması uygun değildir. Fakat projenin yapılara ve fazlara ayrılması halinde çatı güneş enerji sistemleri kurulması NZEB mimarisine ulaşma önemli bir destek sağlayacaktır.

6. SONUÇLAR

Enerji üretim santralının kapasitesinin artırılması ve enerji için bir otomasyon sisteminin sağlanması şüphesiz NZEB mimarisine katkısı en yüksek olan geliştirme olacaktır. Fakat NZEB mimarisini sağlayabilmesi adına yüksek güçlü bir enerji santraline ihtiyaç duyulacak olup, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından bu büyüklükte üretim santrallerinin uygulanması hem büyük bir alan, hem dağıtım şebekesi, hem de birçok onay prosedürü gerektirmektedir.

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 birbirlerini 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 olmamaktadır.

ACA sertifikasyonu için tez kapsamında belirtilen iyileştirmelere ek olarak, özellikle ulaşım ve taşımacılık alanında ek projeler planlanmaktadır. Taşımacılıkta elektrikli araçların kullanılması, hybrid çalışma sistemine geçilerek su, enerji tüketiminin azaltılması, ulaşım araçlarının sayılarının azaltılması, atık yönetimi ve paydaş katılımı güçlendirilmesi gibi birçok proje üzerinde çalışılmaktadır.

Karbon ayak izi azaltımı ve sürdürülebilirliğe katkının artırılması için, özel projelerin üretildiği komite kurulması da ACA sertifikasyonu için önemli teşvik projelerinden biridir.

Tez kapsamında 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 gözünene alınarak iyileştirme projelerinin önceliklendirilmesi için de birbirini besleyen devamlı bir döngü sağlanmış olacaktır.

7. KAYNAKLAR

- Anonim 1: https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/14_9.pdf, [Son Erişim Tarihi: 10.05.2024]
- Anonim 2: <https://www.airportcarbonaccreditation.org/>, [Son Erişim Tarihi: 01.05.2024]
- Anonim 3: <https://www.usgbc.org/leed>, [Son Erişim Tarihi: 22.04.2024]
- Anonim 4: <https://breeam.com/>, [Son Erişim Tarihi: 01.03.2024]
- Anonim 5: <https://www.buildenergy.co.uk>, [Son Erişim Tarihi: 15.05.2024]
- Anonim 6: <https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings>, [Son Erişim Tarihi: 15.05.2024]
- Anonim 7: <https://www.sap.com/turkey/products/artificial-intelligence/what-is-machine-learning.html> [Son Erişim Tarihi: 19.12.2024]
- Alfaro, E., Gamez, M., & García, N. (2013). adabag: An R Package for Classification with Boosting and Bagging. *Journal of Statistical Software*, 54(2), 1–35. <https://doi.org/10.18637/jss.v054.i02>
- Banfield, R. E., Hall, L. O., Bowyer, K. W., & Kegelmeyer, W. P. (2007). A comparison of decision tree ensemble creation techniques. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 29(1), 6–10.
- Breiman, L. Bagging predictors. *Machine Learning*, 24(2), 1996, 123–140
- Deng, H., Runger, G., Tuv, E., & Vladimir, M. (2013). A time series forest for classification and feature extraction. *Information Sciences*, 239, 142–153.
- 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
- 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>.
- 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>.
- 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.
- Lartigue, B.; Lasternas, B.; Loftness, V. Multi-objective optimization of building envelope for energy consumption and daylight. *Indoor Built Environ.* 2014, 23, 70–80.
- Liang, G., Zhu, X., & Zhang, C. (2011). An Empirical Study of Bagging Predictors for Different Learning Algorithms. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 25(1), 1802–1803. <https://doi.org/10.1609/aaai.v25i1.8026>

ÖZGEÇMİŞ

Hacer GEDİZ TAŞKIN

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2021-2025	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2008-2009 (Erasmus)	Hogskolan Dalarna Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İsveç
Lisans 2005-2010	Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Trabzon

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Business Analyst 2024-Devam Ediyor	ALPHA HVAC INDUSTRIES DOO Technic Systems, Montenegro
Data Analytic & Reporting Specialist 2022-Devam Ediyor	Fraport TAV Antalya Havalimanı İnsan Kaynakları ve Org. Gelişim Departmanı, Antalya
İş Geliştirme Yöneticisi 2021-2022	Inelso Enerji Sistemleri Ar-Ge Departmanı, Antalya
Yatırım Planlama Yöneticisi 2013-2021	Akdeniz Elektrik Dağıtım A.Ş. Yatırım Direktörlüğü, Antalya
Ar-Ge Mühendisi 2011-2013	Vestel Beyaz Eşya A.Ş. Elektriksel Tasarım Ar-Ge Departmanı, Antalya