

T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI

YAPAY ZEKÂ TABANLI MİKROEKONOMİK KARBON PİYASASI MODELİ VE KARAR DESTEK SİSTEMİ PROJESİ

1. Kurum Hakkında Bilgi

İklim Değişikliği Başkanlığı, Türkiye'nin iklim değişikliği ile mücadele, sera gazı emisyonlarının azaltılması, iklim değişikliğine uyum ve karbon fiyatlandırma mekanizmalarının geliştirilmesine yönelik ulusal politika ve stratejilerin oluşturulmasından sorumlu kamu kurumudur. Başkanlık; sera gazı emisyonlarının İzlenmesi, Raporlanması ve Doğrulanması (İRD), Türkiye Emisyon Ticaret Sistemi (TR ETS), karbon piyasaları, uluslararası iklim müzakereleri ve yeşil kalkınma politikaları kapsamında teknik, idari ve düzenleyici çalışmalar yürütmektedir. Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda iklim değişikliğiyle mücadele, yeşil dönüşüm, iklim finansmanı, kapasite geliştirme ve uluslararası iş birliği alanlarında faaliyet göstermektedir.

Karbon Fiyatlandırma Dairesi Başkanlığı ise iklim değişikliğiyle mücadelede ekonomik araçların etkin kullanımını sağlamak ve düşük karbonlu ekonomiye geçiş sürecini desteklemek amacıyla çalışmalar yürütmektedir. Başkanlık; ETS başta olmak üzere piyasa temelli karbon fiyatlandırma mekanizmalarının geliştirilmesi, uygulanması ve izlenmesine yönelik teknik ve idari süreçleri yürütmekte; karbon piyasaları, gönüllü karbon mekanizmaları ve uluslararası karbon piyasalarına ilişkin düzenleme ve koordinasyon faaliyetlerini gerçekleştirmektedir. Ayrıca ilgili sektörlerin kapasitesinin geliştirilmesi, uluslararası müzakere süreçlerinin takibi ve karbon fiyatlandırma araçlarından elde edilecek gelirlerin yönetimine yönelik politika çalışmalarına katkı sağlanması da başkanlığın görev alanları arasında yer almaktadır.

2. Problem Tanımı

Türkiye'de uygulanmaya başlanacak TR ETS kapsamında karbon piyasasının gözetimi ve yönetimi ihtiyaçları doğmaktadır. Karbon piyasaları gibi hassas yapıların yönetiminde, veriye dayalı öngörülebilirliğin sağlanamaması stratejik karar alma süreçlerinde ciddi riskler oluşturmaktadır. Piyasa değişkenlerinin dinamik olarak modellenememesi; karbon fiyatı değişkenliğinin, arz-talep dengesinin ve farklı politika senaryolarının ekonomi üzerindeki etkilerinin önceden tespit edilmesini zorlaştırmaktadır. Özellikle karbon fiyatındaki değişimlerin sektörler üzerindeki etkilerinin gerçek zamanlı olarak izlenememesi, politika yapımcılar için belirsizlik yaratmaktadır.

3. Mevcut Durum

Türkiye'de karbon piyasasına yönelik mevcut yaklaşımlar, dinamik ve veriye dayalı bir yapıdan ziyade, genel makro-ekonomik varsayımlara ve statik hesaplama modellerine dayanmaktadır. Özellikle ulusal ETS'nin hazırlık sürecinde, İRD sistemi kapsamında doğrulanmış tesis emisyon verileri toplanmakta; tesislerin emisyon yoğunlukları ve azaltım kapasitelerine ilişkin değerlendirmeler belirli zaman aralıklarını kapsayan raporlar ve manuel analizler üzerinden yürütülmektedir. Mevcut durumda ulusal ölçekteki karbon piyasası analizleri ağırlıklı olarak manuel değerlendirmeler ve raporlamalar üzerinden yürütülmekte olup, karbon fiyatı tahmini ve senaryo analizlerine yönelik bütünsel analitik araçlar bulunmamaktadır.

Ulusal karbon fiyatlamasına yönelik projeksiyonlar, Türkiye'de henüz aktif bir ETS piyasası bulunmaması nedeniyle ağırlıklı olarak uzman değerlendirmeleri, uluslararası karbon piyasalarından

elde edilen veriler ve çeşitli ekonomik göstergeler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. TR ETS hazırlık çalışmaları kapsamında, İRD sistemi altında 2015 yılından bu yana tesis bazında doğrulanmış sera gazı emisyon verileri toplanmakta ve analiz edilmektedir. Ayrıca ETS tasarım çalışmalarında kullanılmak üzere sektörel kıyas değer (benchmark) geliştirme çalışmaları yürütülmekte, sektörel faaliyet verileri ve emisyon yoğunlukları değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte TR ETS henüz uygulama aşamasına geçmediğinden ulusal karbon fiyatı, piyasa işlem verileri, gerçekleşmiş tahsisat verileri ve kıyas değer uygulama sonuçları gibi piyasa temelli veri setleri henüz oluşmamıştır. ETS'nin devreye alınmasını takiben oluşacak karbon fiyatları, işlem hacimleri, tahsisat kayıtları ve diğer piyasa verilerinin mevcut veri kaynakları ile birlikte değerlendirilmesi mümkün olacaktır.

Mevcut durumda söz konusu veriler farklı sistemlerde tutulmakta ve analizler büyük ölçüde manuel değerlendirmeler ve raporlamalar üzerinden yürütülmektedir. Karbon piyasası; enerji fiyatları, sektörel üretim hacimleri, dış ticaret verileri ve iklim politikaları gibi birbiriyle ilişkili çok sayıda veri setinden oluşmaktadır. Bu verilerin bütünleşik ve ileri analitik yöntemlerle değerlendirilememesi, piyasadaki arz-talep dengesinin ve karbon fiyatı değişkenliğinin sağlıklı şekilde öngörülmesini zorlaştırmaktadır. Türkiye'nin emisyon azaltım hedefleri ile ekonomik büyüme dinamikleri arasındaki dengeyi kuracak, politika yapımcılar ve sektörel temsilciler için stratejik çıktı üreten entegre bir karar destek sistemi bulunmamaktadır.

4. Proje Amaç ve Kapsamı

Türkiye'de uygulanacak olan TR ETS ve Avrupa Birliği (AB) tarafından uygulanan Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) kapsamında, karbon fiyatlarının oluşumu, firma davranışları ve politika etkilerinin önceden öngörülmesi için geliştirilecek çözüm ile karbon fiyat tahmininin yapılması, farklı politika, piyasa ve ekonomik senaryolar ile birlikte senaryo simülasyonunun gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır.

Geliştirilecek sistem, uçtan uca analiz ve senaryo simülasyon kabiliyetine sahip aşağıdaki temel bileşenlerden oluşacaktır. İlk olarak; küresel enerji fiyatları, Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi (AB ETS) trendleri, ulusal makroekonomik göstergeler ve İRD/EPİAŞ verilerini içeren çok boyutlu veri setlerinin entegre edileceği bir veri akış sisteminin kurulması ve bu verilerin işlenerek analiz edilebilir hale getirilmesi sağlanacaktır. Ardından, makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı zaman serisi algoritmaları kullanılarak; kısa, orta ve uzun vadeli karbon fiyatını tahminleyen bir model geliştirilecektir. Sistemin çekirdeğini oluşturacak olan yapay zekâ destekli mikroekonomik senaryo simülasyon modeli ile; farklı politika parametrelerinin piyasa üzerindeki etkileri çeşitli senaryolar üzerinden analiz edilecektir. Söz konusu senaryo simülasyonları aracılığıyla piyasa dinamiklerinin ve sektörel etmenlerinin karbon piyasasına olan etkisinin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi, elde edilen öngörülerin ise model açıklanabilirlik yöntemleriyle karar vericilere sunulması amaçlanmaktadır. Tüm bu süreçler; fiyat tahmini, senaryo simülasyonu, model açıklanabilirliği ve veri kalitesi panellerinden oluşan genel bir sistem tasarlanması için kullanılacaktır.

Geliştirilecek sistem kapsamında; küresel enerji ve emtia fiyatları, karbon piyasası verileri, doğrulanmış sera gazı emisyon verileri, makroekonomik göstergeler, tahsisat verileri ve ETS politika parametreleri birlikte değerlendirilerek farklı politika, piyasa ve ekonomik senaryoların parametrik olarak modele girdi olarak verilmesiyle karbon piyasası üzerindeki olası etkileri analiz edilecektir.

Geliştirilecek sistem; karbon fiyatı eğilimleri, tahsisat ihtiyacı, ücretsiz tahsisat miktarı, emisyon üst sınırı, sektör ve tesis bazlı maliyet etkileri ile açık/fazla tahsisat durumlarına ilişkin karşılaştırmalı analizler sunabilecek arayüzler içerecektir. Sistem ayrıca, Karbon Piyasası Kurulu başta olmak üzere

karar verici mekanizmaların ETS'ye ilişkin politika seçeneklerini veri temelli analizlerle değerlendirebilmesine imkân sağlayacak karar destek altyapısını destekleyecektir. Sistemin kullanıcı profilleri, yetkilendirme yapısı ve rol bazlı erişim ihtiyaçları proje kapsamında gerçekleştirilecek analiz çalışmaları sonucunda belirlenecektir. Bu kapsamda farklı kullanıcı gruplarına yönelik rol ve yetki tanımları oluşturulacak, kullanıcıların erişebileceği veri, analiz ve raporlama fonksiyonları ihtiyaçlar doğrultusunda detaylandırılacaktır.

5. Teknik İsterler

1. Geliştirilecek sistem; küresel enerji fiyatları, AB ETS trendleri, ulusal makroekonomik veriler ve ülke örneklerindeki ETS uygulamalarına ait karbon fiyatı, tahsisat miktarları, kıyas değerler ile emisyon verilerini içeren çok boyutlu piyasa değişkenlerinden beslenecektir.
2. Geliştirilecek sistem, söz konusu veri kaynaklarını makine öğrenmesi veya derin öğrenme tabanlı zaman serisi işleyebilen algoritmalarla analiz ederek karbon fiyatlarına yönelik bir tahmin modeli sunacaktır. Tahmin modeli; kısa vadeli (t+1 ila t+7 gün), orta vadeli (t+1 ila t+12 hafta) ve uzun vadeli/senaryo bazlı (t+1 ila t+24 ay) karbon fiyat projeksiyonları üretebilecek şekilde tasarlanacaktır. Yukarıda belirtilen projeksiyonlara dair ek bilgilere (frekans, önerilen mimari ve çıktı) 7. Bölüm'de yer alan Tablo 1'de yer verilmiştir.
3. Geliştirilecek sistem kapsamında gerçekleştirilecek karbon fiyat tahmini, ETS politika analizleri, senaryo simülasyonları ve karar destek süreçlerinde aşağıdaki veri kategorilerinden faydalanılacaktır:
 - Küresel enerji ve emtia fiyatları olarak; TTF doğalgaz, Brent ham petrol, API2 ARA kömür fiyatları ile AB üyesi ülkeler ve Türkiye elektrik fiyatları gibi enerji piyasası verileri,
 - Yurt dışı ETS uygulamalarına ilişkin referans veriler olarak; EUA spot ve futures fiyatları, EUA açık pozisyon (Open Interest) verileri, doğrulanmış EU ETS emisyon verileri, tahsisat verileri, Avrupa Birliği Birlik Kayıt Sistemi (Union Registry) verileri ile benzeri uluslararası karbon piyasası ve emisyon ticaret sistemi verileri,
 - Ulusal emisyon, faaliyet ve politika verileri olarak; İRD kapsamında doğrulanmış tesis emisyon verileri, ETS hazırlık çalışmaları kapsamında geliştirilen kıyas değer (benchmark) çalışmaları, ücretsiz tahsisat hesaplamalarına esas faaliyet verileri, ulusal sera gazı envanteri verileri, Ulusal Katkı Beyanı (NDC) kapsamındaki hedef ve senaryo verileri ile SKDM varsayılan emisyon değerleri,
 - TR ETS kapsamında oluşacak piyasa verileri olarak; karbon fiyatları, birincil ve ikincil piyasa işlem verileri, tahsisat dağıtım verileri, işlem hacimleri, emir verileri, uyum süreçlerine ilişkin veriler ve benzeri piyasa verileri,
 - Makroekonomik ve sektörel veriler olarak; EUR/USD ve USD/TRY döviz kurları, TÜFE, Sanayi Üretim Endeksi, Türkiye GSYH büyüme oranları ile üretim, faaliyet ve kapasite verileri.

Yukarıda belirtilen veri kaynakları örnek niteliğinde olup proje ihtiyaçları doğrultusunda ilave veri kaynakları kullanılabilir. Her bir veri kategorisi bir veya birden fazla veri seti ve veri paylaşım servisi içerebilecektir. Veri kaynaklarının erişim adresleri, servis yapıları, veri paylaşım yöntemleri ve teknik özellikleri zaman içerisinde değişiklik gösterebileceğinden belirli bir veri sağlayıcısı, URL, API veya teknik erişim yöntemine bağımlılık oluşturulmayacaktır.

Yukarıda belirtilen verilere dair ek bilgilere (frekans, veri sahibi/veri erişim şekli, tarih aralığı ve kategori) 7. Bölüm'de yer alan Tablo 2'de yer verilmiştir.

4. Proje kapsamında kullanılacak veri kaynakları İDARE tarafından temin edilerek proje takvimine uygun şekilde YÜKLENİCİ'nin kullanımına sunulacaktır. YÜKLENİCİ'nin veri satın alma, lisans temin etme veya yeni veri kaynakları oluşturma yükümlülüğü bulunmamaktadır.

Veri kaynaklarına ilişkin erişim yöntemleri, veri paylaşım mekanizmaları, erişim yetkileri ve teknik kısıtlar ilgili veri sahipleri ve İDARE tarafından belirlenecek ve proje başlangıcında YÜKLENİCİ ile paylaşılacaktır.

Veri kaynaklarına erişim; API, web servis, veri tabanı erişimi, dosya aktarımı veya İDARE tarafından uygun görülen diğer veri paylaşım yöntemleri aracılığıyla gerçekleştirilecektir.

YÜKLENİCİ, İDARE tarafından sağlanan erişim yöntemleri ve teknik gereksinimler doğrultusunda veri entegrasyonlarını tasarlayacak; veri akış sıklıkları, veri saklama yaklaşımı, entegrasyon mimarisi ve sistem tasarımına ilişkin detayları Analiz ve Tasarım Dokümanında tanımlayarak İDARE onayına sunacaktır.

5. Geliştirilecek sistem; emisyon üst sınırı, yıllık azaltım oranı, tahsisat yöntemi, ücretsiz tahsis oranı, kıyas değerleri (ürün veya faaliyet başına referans emisyon yoğunluğu değerleri), sektörel üretim/faaliyet seviyesi ve doğrulanmış emisyon verileri gibi ETS'ye ilişkin temel politika ve piyasa parametrelerinin senaryo bazında değiştirilebilmesine imkân sağlayacaktır. Sistem, söz konusu parametrelerde meydana gelen değişikliklerin karbon fiyatı, tahsisat ihtiyacı, ücretsiz tahsisat miktarı, açık/fazla tahsisat durumu ve sektör bazlı maliyet etkileri üzerindeki sonuçlarını karşılaştırmalı olarak analiz edebilen yapay zekâ destekli mikroekonomik bir karbon piyasası senaryo simülasyonu ve karar destek altyapısı içerecektir.
6. YÜKLENİCİ (Proje Yürütücüsü Kurum), İDARE (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı) tarafından belirlenecek politika ve piyasa parametreleri için düşük, orta ve yüksek etki düzeyleri tanımlayarak senaryo kombinasyonları oluşturabilecek bir çözüm tasarlayacaktır.
7. Geliştirilecek sistem; oluşturulan senaryo kombinasyonları kapsamında karbon fiyatı, tahsisat ihtiyacı, ücretsiz tahsisat miktarı, uyum maliyetleri, sektör ve tesis bazlı maliyet etkileri ile açık/fazla tahsisat durumlarına ilişkin sonuçları hesaplayabilecek ve bu sonuçların farklı senaryolar altında karşılaştırmalı olarak analiz edilmesine imkân sağlayacak arayüzleri içerecektir.
8. Senaryo simülasyon çıktıları, veri yeterliliği ölçüsünde güven aralığı veya olasılık bilgisi ile desteklenecek; veri yetersizliği halinde kullanılan varsayımlar açık şekilde belirtilerek deterministik senaryo analizi olarak raporlanacaktır.
9. YÜKLENİCİ, yapay zekâ modellerinin ürettiği karbon fiyat tahminlerinin açıklanabilirliğini sağlamak amacıyla sistem içerisinde model bağımlı (Attention, Gradyan analizi vb. yöntemler) ya da model bağımsız (SHAP, LIME vb. yöntemler) açıklanabilir yapay zekâ yöntemlerini uygulayacaktır.
10. Geliştirilecek sistemdeki model çıktıları; karbon fiyat projeksiyonları, senaryo karşılaştırmaları, tahsisat analizleri ve duyarlılık analizlerinin görselleştirilmesine yönelik çizgi grafikler, sütun grafikler, karşılaştırmalı tablo raporlama araçları aracılığıyla son kullanıcıya sunulacaktır.
11. YÜKLENİCİ, TR ETS kapsamında yeterli yerel piyasa verisi oluşuncaya kadar; AB ETS ve benzeri uluslararası sistemlerin tarihsel fiyat, tahsisat ve emisyon verileri esas alınarak İDARE tarafından hazırlanmış referans veri setleri üzerinden modelleme yapacaktır. Söz konusu referans veri setleri İDARE tarafından oluşturularak proje takvimine uygun şekilde YÜKLENİCİ'ye sağlanacaktır.
12. Geliştirilecek sistemdeki modellerin Türkiye piyasa koşullarına uyarlanması sürecinde; İDARE tarafından sağlanacak olan İRD sistemi kapsamındaki doğrulanmış tesis emisyon verileri, sektörel faaliyet bilgileri, tahsisat yöntemleri ve ulusal politika parametreleri girdi olarak kullanılacaktır.
13. EPIAŞ ETS piyasa işletim altyapısının devreye alınması ve pilot dönem verilerinin oluşmaya başlamasıyla birlikte; kullanıcı, işlem, hacim, emir ve fiyat verileri modelin kalibrasyonu ve güncellenmesi için kullanılacak; biriken yerel veriler transfer öğrenme (transfer learning) yöntemi ile modele entegre edilerek model kademeli olarak Türkiye piyasasına uyarlanacaktır.
14. Temel veri kaynakları haricinde modellerin eğitiminde veya senaryo simülasyonlarında kullanılabilecek ek veri kaynakları YÜKLENİCİ tarafından önerilecektir. Söz konusu veri kaynaklarının kullanımı İDARE onayına tabi olacaktır.
15. Geliştirilecek sistem, eşzamanlı 50 kullanıcıya hizmet verecek şekilde tasarlanacaktır. Sistem performansının doğrulanması amacıyla yük ve performans testleri gerçekleştirilecektir. Eşzamanlı

- 50 kullanıcı yükü altında yapılan testlerde, Madde 16’te tanımlanan performans kriterlerinin sağlanması beklenecektir. Ayrıca senaryo simülasyon süreçlerine ilişkin bekleme ve işlem süreleri sistem tarafından izlenebilir olacak ve performans testleri kapsamında değerlendirilecektir.
16. YÜKLENİCİ, eşzamanlı 50 kullanıcı yükü altında gerçekleştirilen performans testlerinde, yapılan isteklerin en az %95’inde REST API yanıt süresinin 500 milisaniyeyi ve kullanıcı arayüzü yükleme süresinin 3 saniyeyi aşmamasını sağlayacaktır. Bu süreye yapay zeka ile senaryo simülasyon tahmin süresi dâhil olmayacaktır.
 17. Karbon fiyat tahmin modelinin performansı, Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) ve yön doğruluğu metrikleri kullanılarak ölçülecektir. Performans hedefleri; günlük bazda $MAPE \leq \%5$ ve yön doğruluğu $\geq \%65$; haftalık bazda $MAPE \leq \%10$ ve yön doğruluğu $\geq \%58$; aylık bazda ise $MAPE \leq \%15$ ve yön doğruluğu $\geq \%55$ koşullarını sağlamalıdır. TR ETS sisteminin canlıya alınmasını takip eden ilk 24 ay boyunca, piyasa derinliği ve veri yeterliliği dikkate alınarak; MAPE hedeflerinde %50 artış, yön doğruluğu hedeflerinde ise %10'luk bir esneme toleransı tanınacaktır. Söz konusu performans hedefleri ve tolerans limitleri, modele girdi sağlayan veri setlerinin eksiksiz, tutarlı, doğrulanmış ve veri akışının kesintisiz olması durumunda geçerlidir.
 18. YÜKLENİCİ, karbon fiyat tahmin modellerinin MLOps araçları ile eğitimlerinin izlenebilirliğini, versiyonlandırılmasını ve performans metriklerinin izlenmesini sağlayacaktır. Bu bağlamda sürekli izleme (monitoring) mekanizmaları kurulacaktır. Modeller en az çeyreklik periyotlarla yeniden eğitilecektir.
 19. YÜKLENİCİ, proje süresince son 30 günlük model performansının Madde 17’de belirtilen performans hedeflerini sağlayamaması, girdi verilerinin istatistiksel dağılımında anlamlı kayma (veri kayması / data drift) tespit edilmesi durumunda, emisyon üst sınırı, azaltım oranı, tahsisat yöntemi veya kıyas değerleri gibi politika parametrelerinde değişiklik yapılması ve piyasa davranışında model performansını etkileyebilecek önemli değişikliklerin tespit edilmesi durumlarında İDARE’nin geri bildirimlerine göre modeli tekrar eğitecektir.
 20. Geliştirilecek sistem, her yeniden eğitim sonrasında model versiyonlama işlemini yapacak ve önceki model versiyonları arşivleyecektir.
 21. Geliştirilecek sistem için gerekli donanım ve altyapı özellikleri YÜKLENİCİ tarafından belirlenecek ve sözleşmenin imzalanmasını takip eden en geç 3 ay içerisinde teknik gerekçeleriyle birlikte İDARE’ye sunulacaktır. Donanım ve altyapının temini İDARE sorumluluğunda olacaktır. YÜKLENİCİ tarafından önerilecek altyapı; işlemci, bellek, depolama, ağ bant genişliği ve gerekli olması halinde GPU ihtiyaçlarını proje kapsamı ile uyumlu şekilde içerecektir. YÜKLENİCİ tespit yöntemini Analiz ve Tasarım Dokümanında detaylandıracaktır.
 22. Proje süresince gerekli geliştirme ortamı ve altyapı İDARE tarafından sağlanacaktır. Geliştirme faaliyetleri kurum içi çalışma ortamında ve/veya uzaktan erişim yöntemleri kullanılarak yürütülebilecektir. İDARE tarafından uygun görülmesi halinde YÜKLENİCİ’ye VPN, güvenli ağ bağlantıları veya diğer kontrollü uzaktan erişim yöntemleri aracılığıyla erişim imkânı sağlanabilecektir. Uzaktan erişim yöntemleri, erişim yetkileri, erişim süreleri, kayıt ve izleme gereksinimleri ile diğer güvenlik kontrolleri İDARE’nin bilgi güvenliği politika ve prosedürleri doğrultusunda belirlenecektir.
 23. Geliştirilecek sistem Python 3.10 veya üzeri sürümler kullanılarak geliştirilecektir. Makine öğrenmesi modellerinde PyTorch, TensorFlow vb. açık kaynak kütüphaneler kullanılacaktır.
 24. YÜKLENİCİ, uygulama katmanında REST API tabanlı mikroservis mimarisini kullanacaktır. Ön yüz geliştirmelerinde React veya Vue.js; arka uç geliştirmelerinde ise FastAPI, Django vb. modern web uygulama çatıları kullanılacaktır.
 25. YÜKLENİCİ, zaman serisi verilerinin etkin yönetimi amacıyla PostgreSQL/TimescaleDB veya İDARE tarafından onaylanacak benzeri veri tabanı çözümlerini kullanılacaktır. Sistem üzerindeki veri akışı ve servisler arası iletişim için Apache Kafka, RabbitMQ vb. mesajlaşma altyapıları kullanılacaktır.
 26. YÜKLENİCİ, tüm sistem bileşenlerinin kurum içi (on-premise) sunucular üzerinde konteyner mimarisi ile çalışmasını sağlayacaktır. Sistem bileşenlerinde Docker, Kubernetes veya benzeri

- konteyner orkestrasyon teknolojileri kullanılacaktır. Yazılımın sürekli entegrasyon ve dağıtım süreçleri için GitLab CI, Jenkins veya benzeri araçlar kullanılacaktır.
27. YÜKLENİCİ, veri güvenliğini ve sistem sürekliliğini sağlamak amacıyla günlük artımlı (incremental) ve haftalık tam (full) yedekleme mekanizmalarını kuracaktır.
 28. YÜKLENİCİ, sistemi karar vericilerin kullanımına uygun şekilde veri görselleştirme, senaryo karşılaştırma, raporlama ve model çıktılarının izlenmesine yönelik arayüz modülleri ile geliştirecektir. Bu bağlamda, arayüz üzerinde fiyat tahmin, senaryo simülasyon, açıklanabilirlik, veri kalitesi ve yönetim paneli tasarlanacaktır.
 29. Sistemde tasarlanan paneller WCAG 2.1 AA erişilebilirlik standartlarını destekleyecek, Türkçe ve İngilizce dil desteği sunacak ve Chrome, Edge ve Firefox tarayıcılarının güncel sürümlerinde çalışacaktır.
 30. Geliştirilecek sistemin, veri işleme, saklama ve model geliştirme süreçleri TS ISO/IEC 27001 Bilgi Güvenliği Yönetim Sistemi prensiplerine uygun şekilde yürütülecektir.
 31. Geliştirilecek sistem; Karbon Piyasası Kurulu üyeleri, ilgili ÇŞİDB birimleri ve yetkilendirilmiş kamu kurumları tarafından bakanlık intranet ağı üzerinden erişilebilecek ve kullanılacak şekilde tasarlanacaktır.
 32. Geliştirilecek sistem; İRD, EPIAŞ ve diğer veri kaynaklarıyla uyumlu veri alışverişini; REST API, SFTP, kontrollü veri aktarımı veya gerçek zamanlı mimariler kullanarak sağlanacaktır. Bu kapsamda YÜKLENİCİ, her entegrasyon noktası için veri formatı, alan tanımları, veri tipleri, zaman bilgisi ve güncelleme kurallarını içeren Veri Sözleşmesi (Data Contract) dokümanlarını hazırlayacaktır.
 33. Proje kapsamında kullanılacak geliştirme, test ve üretim ortamları birbirinden mantıksal ve/veya fiziksel olarak ayrıştırılmış şekilde kurgulanacaktır. Test ortamı, mümkün olduğu ölçüde üretim ortamına benzer teknik özelliklerde oluşturulacak ve sistem doğrulama, entegrasyon ve kabul testleri bu ortam üzerinde gerçekleştirilecektir. Üretim ortamına doğrudan YÜKLENİCİ erişimi verilmeyecek; Tüm uzaktan erişim oturumları kayıt altına alınacak ve minimum 3 yıl süreyle saklanacaktır. Proje kapsamında kullanılacak geliştirme, test ve üretim ortamlarının sağlanmasına ilişkin yaklaşım İDARE tarafından belirlenecektir.
 34. Kullanılacak veri setleri İDARE tarafından temin edilerek YÜKLENİCİ'nin kullanımına sunulacaktır. Test ortamlarında gerçek veriler yerine anonimleştirilmiş, maskeleytirilmiş veya İDARE tarafından uygun görülen veri setleri kullanılabilir. Veri paylaşımı ve erişimi; bilgi güvenliği gereksinimleri doğrultusunda VPN, güvenli ağ bağlantıları, kontrollü uzaktan erişim yöntemleri, güvenli dosya aktarımı veya İDARE tarafından uygun görülen diğer yöntemler aracılığıyla gerçekleştirilecektir. Ortamların teknik özellikleri, veri erişim yöntemleri, veri aktarım süreçleri, erişim yetkilendirmeleri, loglama gereksinimleri ve güvenlik kontrollerine ilişkin detaylar Analiz ve Tasarım Dokümanında tanımlanacak ve İDARE onayına sunulacaktır.
 35. Geliştirilecek sistem kaynak kullanımı (CPU, RAM, depolama ve gerekli olması halinde GPU kullanımı) izlenebilir olacak ve sistem yöneticileri tarafından görüntülenecektir.
 36. YÜKLENİCİ, sistem üzerinde gerçekleştirilen kullanıcı işlemleri, veri güncellemeleri, model çalıştırmaları ve sistem hatalarına ilişkin kayıtları merkezi değiştirilemez kayıt yapılarının WORM (Write Once Read Many) benzeri loglama altyapılarında tutacaktır.
 37. Geliştirilecek sistem canlıya alınmadan önce bağımsız bir kuruluş veya İDARE tarafından gerçekleştirilecek güvenlik ve sızma testlerinden geçecektir. Sızma testleri OWASP Top 10 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilecektir.
 38. Geliştirilecek sistem; e-Devlet ve İDARE'nin kurumsal kimlik yönetim sistemleri ile entegrasyonu destekleyecek, OpenID Connect (OIDC) ve SAML 2.0 protokolleri üzerinden Çok Faktörlü Kimlik Doğrulama (MFA) mekanizmalarını destekleyecektir.
 39. Geliştirilecek sisteme erişimi sağlamak amacıyla, sistemin Rol Tabanlı Erişim Kontrolü (RBAC - Role-Based Access Control) mimarisi ile kullanıcıların doğrudan yetki alması yerine, atanmış rolleri üzerinden yetki kazanması sağlanacaktır.
 40. Geliştirilecek sistemde yer alan Makine Öğrenmesi (ML) ve Derin Öğrenme (DL) algoritmalarının yönetimi, ISO/IEC 42001 yönetim prensiplerine tam uyum sağlayacak şekilde kurgulanacaktır.

6. Ek (Dokümanlar)

Proje kapsamında aşağıda belirtilen raporlar hazırlanacak ve İDARE ile proje planında belirtilen tarihlerde paylaşılacaktır. İDARE gerekli görmesi durumunda ek raporlar talep edebilecektir.

- Üst Düzey Sistem Tasarımı Dokümanı

Geliştirilecek sistemin genel yapısı ve işleyişi tanımlanmalı, sistem mimarisi detaylı şekilde açıklanmalıdır. Ana bileşenlerin işlevleri ve bunlar arasındaki etkileşimler belirlenmeli, veri akışı ve süreçler netleştirilmelidir. Performans, ölçeklenebilirlik ve güvenlik gibi teknik gereksinimler ele alınmalı ve riskler ile varsayımlar ortaya konulmalıdır. Bu doküman, sistemin başarılı şekilde tasarlanıp uygulanabilmesi için yol gösterici bir rehber olmalıdır.

- Analiz ve Tasarım Dokümanı

Sistemin mevcut durumu analiz edilmeli ve ihtiyaç duyulan özellikler belirlenmelidir. Teknik gereksinimlerden tasarım ilkelerine kadar olan süreç açık bir şekilde sunulmalı, kullanıcı deneyimini iyileştirmek için arayüz tasarımı yapılmalıdır. Ayrıca, veri tabanı yapısı ve sistemin mimari çözümü detaylandırılmalıdır.

- Veri Analiz Raporu

Bu raporda, analiz edilen veri setleri ve kullanılan yöntemler açıklanmalı, veri setinin temel özellikleri tanımlanmalıdır. Bulgular, grafikler ve tablolarla görselleştirilmeli ve analizden elde edilen sonuçlar yorumlanmalıdır. Stratejik kararlar için öneriler geliştirilmeli ve sonraki adımlar belirlenmelidir. Rapor, veri temelli karar alma süreçlerine rehberlik etmelidir.

- Test Raporları

Test süreçleri ve sonuçları detaylı şekilde sunulmalıdır. Test amaçları ve kapsamı netleştirilmeli, uygulanan test senaryoları ve kullanılan yöntemler, performans ve hedeflenen çıktılarla uyum açıklanmalıdır.

- Kılavuzlar ve Teknik Dokümantasyonlar

Sistemin farklı kullanıcı rollerine göre etkin bir şekilde işletilebilmesi, yönetilebilmesi ve diğer sistemlerle entegre edilebilmesi için gerekli tüm belgeler ve kılavuzlar hazırlanmalıdır. Bu kapsamda; son kullanıcılar için sistemin fonksiyonel kullanımını adım adım açıklayan Kullanıcı Kılavuzu, sistem yöneticileri için kurulum, yapılandırma ve bakım süreçlerini içeren Sistem Kılavuzu sunulmalıdır. Ayrıca, sistemin sunduğu servislerin ve veri yapılarının teknik detaylarını içeren kapsamlı bir API Dokümantasyonu hazırlanmalıdır. Tüm dokümanlar güncel olmalı, görsel öğelerle desteklenmelidir.

7. Veri Tabloları

Ufuk	Frekans	Çıktı	Önerilen mimari
Kısa vade: t+1 ila t+7 gün	Günlük rolling	Nokta tahmin + %95 güven aralığı	LSTM / Transformer
Orta vade: t+1 ila t+12 hafta	Haftalık	Nokta tahmin + dağılım	LSTM / Transformer (multi-step)
Uzun vade / senaryo: t+1 ila t+24 ay	Aylık	Sadece senaryo modülünde, makro varsayımlara koşullu	VAR / VECM ekonometrik

Tablo 1: Tahmin Modeli Çıktı Frekans Tablosu.

Kategori	Örnek Veri Setleri	Veri Sahibi / Veri Erişim Şekli	Frekans	Tarih Aralığı
Küresel enerji ve emtia verileri	TTF doğalgaz fiyatları, Brent ham petrol fiyatları, API2 ARA kömür fiyatları, elektrik piyasası fiyat verileri	İDARE tarafından temin edilecek uluslararası enerji piyasası ve emtia verileri	Günlük / Saatlik	Mevcut veri dönemleri
Yurt dışı ETS uygulamalarına ilişkin referans veriler	EUA spot ve futures fiyatları, açık pozisyon verileri, doğrulanmış emisyon verileri, tahsisat verileri, piyasa verileri	İDARE tarafından temin edilecek uluslararası ETS ve karbon piyasası verileri	Günlük / Yıllık	Mevcut veri dönemleri
Ulusal emisyon verileri	İRD doğrulanmış tesis emisyon verileri, ulusal sera gazı envanteri verileri	İDARE	Yıllık	2015-günümüz
Faaliyet ve üretim verileri	Tesis faaliyet seviyeleri, üretim verileri, kapasite verileri, ücretsiz tahsisat hesaplamalarına esas veriler	İDARE ve ilgili kamu kurumları	Yıllık / Aylık	Mevcut veri dönemleri
ETS hazırlık verileri	Kıyas değer (benchmark) çalışmaları ve ilgili teknik çalışmalar	İDARE	Güncellendikçe	Mevcut çalışmalar
İklim politikası verileri	Ulusal Katkı Beyanı (NDC) hedefleri, senaryo verileri, ilgili politika parametreleri	İDARE	Güncellendikçe	Geçerli dönem
SKDM verileri	Varsayılan emisyon değerleri ve ilgili parametreler	Avrupa Birliği kaynakları ve İDARE tarafından temin	Güncellendikçe	Güncel dönem

Kategori	Örnek Veri Setleri	Veri Sahibi / Veri Erişim Şekli	Frekans	Tarih Aralığı
		edilecek ilgili veri setleri		
TR ETS piyasa verileri	Karbon fiyatları, birincil ve ikincil piyasa işlem verileri, tahsisat dağıtım verileri, işlem hacimleri, emir verileri ve diğer piyasa verileri	EPIAŞ ve TR ETS kapsamında oluşacak sistem verileri	Günlük / Yıllık	ETS uygulamasının başlamasını takiben
Makroekonomik veriler	EUR/USD ve USD/TRY döviz kurları, TÜFE, GSYH büyüme oranları ve benzeri ekonomik göstergeler	TÜİK, TCMB ve İDARE tarafından temin edilecek ilgili veri setleri	Günlük / Aylık / Çeyreklik	Mevcut veri dönemleri
Sektörel göstergeler	Sanayi üretim endeksi, dış ticaret verileri, sektörel faaliyet göstergeleri, üretim ve kapasite verileri	TÜİK, ilgili kamu kurumları ve İDARE tarafından temin edilecek veri setleri	Aylık / Çeyreklik	Mevcut veri dönemleri

Tablo 2: Kullanılacak Veri Setleri Tablosu

Not: Tabloda yer alan veri setleri ve kaynaklar örnek niteliğinde olup proje ihtiyaçları doğrultusunda ilave veri kaynakları kullanılabilir. Veri sağlayıcıları, erişim yöntemleri ve veri setleri zaman içerisinde değişiklik gösterebilir.