

T.C.
İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DİJİTAL ALTYAPI SİSTEMLERİNDE İKLİM ADAPTASYON AÇIĞININ
TERMODİNAMİK EŞİK KAVRAMI İLE FİYATLANDIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seyedarash AGHILI

2300001851

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Proje Yönetimi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet Nurettin UĞURAL

ARALIK 2025

T.C.
İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DİJİTAL ALTYAPI SİSTEMLERİNDE İKLİM ADAPTASYON AÇIĞININ
TERMODİNAMİK EŞİK KAVRAMI İLE FİYATLANDIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seyedarash AGHILI

2300001851

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Proje Yönetimi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet Nurettin UĞURAL

Jüri Üyeleri: Prof. Dr. F. Heyecan GİRİTLİ

Dr. Öğretim Üyesi Ahmet TUZ

ARALIK 2025

ÖNSÖZ

Bu tezin tamamlanması, uzun ve zorlu bir akademik yolculuğun ürünüdür. Bu süreçte yanımda olan, desteklerini ve inançlarını benden esirgemeyen değerli insanlara teşekkürü bir borç bilirim.

En başta, bilgi ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan, sabrı ve yol göstericiliği ile bu çalışmanın bilimsel bir temele oturmasını sağlayan değerli danışmanım Doç. Dr. Mehmet Nurettin Uğural'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Vizyonu, bu tezin her aşamasına ilham vermiştir.

Hayatımın her anında olduğu gibi, bu süreçte de en büyük destekçim olan sevgili eşime sonsuz teşekkür ederim. Sevgin, sabrın ve anlayışın, en zor anlarda bile bana güç verdi. Bu başarı, en az benim kadar senindir.

Hayatıma neşe ve anlam katan canım çocuklarım İliya ve Elena; sizin varlığınız, bu yoğun çalışmanın yorgunluğunu unutturan en büyük motivasyon kaynağımdı. Bu çalışma, aynı zamanda sizlere daha iyi bir gelecek sunma arzumun bir eseridir.

Eğitim hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, İran'daki değerli aileme minnettarım. Onların eğitime olan inancı ve teşviki, bugünlere gelmemdeki en önemli itici güç olmuştur.

Bu vesileyle, akademik temellerimi attığım 2004 yılında Tebriz Azad Üniversitesi Mimarlık Mühendisliği bölümünden mezun olmamı sağlayan değerli hocalarımı da saygıyla anmak isterim. Onların kattığı vizyon, yıllar sonra bile bana ilham vermeye devam etmektedir.

Aralık 2025

Seyedarash Aghili

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER	II
KISALTMALAR.....	IV
TABLO LİSTESİ.....	VI
ŞEKİL LİSTESİ	VII
SİMGE LİSTESİ	VIII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT.....	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI: ADAPTASYON AÇIĞININ TEORİK TEMELLERİ	5
2.1. Geleneksel İklim Riski Değerlendirmesindeki Ayrıntı Eksikliği: Makrodan Mikroya Geçişin Zorunluluğu	5
2.2. Doğrusal Olmayan Arızanın Termodinamik Temeli: 'Termodinamik Makas Etkisi' ve Matematiksel Tanımı	6
2.3. Dijital Altyapı: Fiziksel ve Finansal Riskin Kesişim Noktası	8
2.4."Adaptasyon Açığı" Kavramı: Risk Sinyalinden Yükümlülük Fiyatlandırmasına	9
3. YÖNTEM	10
3.1. Araştırma Tasarımı ve Metodolojik Çerçeve.....	10
3.2. Modelleme Parametreleri ve Veri Kaynakları.....	12
3.2.1. Analiz Arketipi: Tier III Veri Merkezi Modeli.....	13
3.2.2. İklim Verisi Seçimi ve Stres Testi Senaryosu.....	15
3.3. Simülasyon ve Analiz Prosedürleri.....	18
3.3.1. Simülasyon Motoru ve İş Akışı	18
3.3.2. Veri Analizi: Adaptasyon Açığının Nicelleştirilmesi....	19
3.3.3. Maliyet Modeli ve Finansal Nicelleştirme	21
4. BULGULAR.....	24
4.1. Enerji Verimliliği ve Fiziksel Dayanıklılık Arasındaki İlişki	24
4.2."Termodinamik Eşik": Termodinamik Arızanın Gerçek Zamanlı Görselleştirilmesi	26

4.3. Adaptasyon Açığı: Yapısal Yükümlülüğün Nicelleştirilmesi.....	28
4.4. Çok Boyutlu Duyarlılık Analizi	30
4.5. Hizmet Sırasındaki Performans Düşüşünün Büyütücü Etkisi	31
5. TARTIŞMA.....	33
5.1. Termodinamik Riskin Yanlış Fiyatlandırılması	33
5.2. Değerleme için Yeni Bir Taslak: Adaptasyon Açığının Entegrasyonu	35
5.3. Daha Geniş Çıkarımlar: Özel Sorumluluktan Kamu Yetkisine ..	37
6. SONUÇ	39
KAYNAKÇA	41



KISALTMALAR

YDA (LCA)	: Yaşam Döngüsü Analizi (Life Cycle Assessment)
ÇÜB (EPD)	: Çevresel Ürün Beyanı (Environmental Product Declaration)
LEED	: Sürdürülebilirlik Sertifikası (Leadership in Energy and Environmental Design)
USGBC	: ABD’de Yeşil Bina Konseyi (U.S. Green Building Council)
BREEAM	: Sürdürülebilirlik Sertifikası (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)
BRE	: İngiltere’de Bina Araştırma Kurumu (Building Research Establishment)
GWP	: Küresel Isınma (Global Warming Potential)
IESVE	: Entegre Çevresel Çözümler Sanal Ortamı (Integrated Environmental Solutions Virtual Environment)
GHG	: Sera Gazı (Greenhouse Gas)
YSA	: Yapay Sinir Ağları
MIVES	: Sürdürülebilirliği değerlendirmek için çok kriterli karar verme yaklaşımıdır.
CASBEE	: Bina Çevresel Verimliliği için Kapsamlı Değerlendirme (Comprehensive Assessment for Building Environmental Efficiency)
SBTool	: Sürdürülebilir Yapı Aracı (Sustainable Building Tool)
ACA	: Havalimanı Karbon Akreditasyonu (Airport Carbon Accreditation)
ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilatı (International Organization for Standardization)
EN	: Avrupa Normları (European Norm)
AMI	: Gelişmiş Ölçüm Altyapısı (Advanced Metering Infrastructure)
ASHRAE	: Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneği (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)
CapEx	: Sermaye Harcaması (Capital Expenditure)

CMIP6	: Birleşik Model Karşılaştırma Projesi Faz 6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)
CRPS	: Sürekli Sıralı Olasılık Skoru (Continuous Ranked Probability Score)
EKAP	: Elektronik Kamu Alımları Platformu (Electronic Public Procurement Platform)
ERA5-Land	: ECMWF Yeniden Analiz v5-Kara (ECMWF Reanalysis v5-Land)
ESG	: Çevresel, Sosyal ve Yönetişim (Environmental, Social, and Governance)
GCM	: Küresel İklim Modeli (Global Climate Model)
HVAC	: Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme (Heating, Ventilation, and Air Conditioning)
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü (International Organization for Standardization)
LEED	: Enerji ve Çevresel Tasarımda Liderlik (Leadership in Energy and Environmental Design)
MEP	: Mekanik, Elektrik ve Tesisat (Mechanical, Electrical, and Plumbing)
OpEx	: İşletme Giderleri (Operating Expenditure)
PPI	: Üretici Fiyat Endeksi (Producer Price Index)
PPP	: Satın Alma Gücü Paritesi (Purchasing Power Parity)
SSP	: Paylaşılan Sosyoekonomik Yol (Shared Socioeconomic Pathway)
Tmax	: Maksimum Sıcaklık (Maximum Temperature)
UKCP	: Birleşik Krallık İklim Projeksiyonları (UK Climate Projections)

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1. Veri Merkezi Arketipi- Tam Spesifikasyonlar.....	13
Tablo 2. Ofis Arketipleri için İç Isı Kazanımının İstatistiksel Doğrulaması.....	15
Tablo 3. İç Isı Kazanımlarının Doluluk Oranına Göre Normalizasyonu.....	15
Tablo 4. Ampirik CRPS'ye Göre GCM Topluluğu Seçimi (Çalışma Bölgesi)	16
Tablo 5. İklim Değişikliği Sinyal Koruması için Yöntem Karşılaştırması.....	17
Tablo 6. Mühendislik Tasarım Koşullarının Evrimi (İstanbul).....	18
Tablo 7. Temsili Ekipman Performans Düşüşü (Derating) Katsayıları.....	19
Tablo 8. Türetilmiş Ölçeklendirme Üslerinin (β) Yayınlanmış Literatürle Karşılaştırılması	21
Tablo 9. Maliyet Modeli için Kullanılan Kamu İhalesi Verilerinin Özeti.....	22
Tablo 10. Adaptasyon Açığı Priminin Maliyet Yapısı Varsayımlarına Duyarlılığı...23	
Tablo 11. Tier III Uyumluluk İhlali Noktasındaki Sistem Durumu.....28	
Tablo 12. Adaptasyon Açığı Priminin Maliyet Yapısı Varsayımlarına Duyarlılığı ..31	
Tablo 13. İklim Riski Değerlendirme Çerçevesinin Karşılaştırılması.....	36

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. Kavramsal Model – Termodinamik Eşik Operasyonel Yükümlülükten Sermaye Yükümlülüğüne Geçiş İçin Gerekli Bir Paradigma Değişimidir.....	3
Şekil 2. Adaptasyon Açığının Fiyatlandırma Ana Çerçevesi.....	12
Şekil 3. Verimlilik ve Dayanıklılığın Birbirinden Ayrışması.....	25
Şekil 4. 'Termodinamik Eşik' – Termodinamik Arızanın Gerçek Zamanlı Görselleştirilmesi	26
Şekil 5. Adaptasyon Açığının Farklı İklim Senaryoları Arasındaki Sağlamlığı	29



SİMGE LİSTESİ

N+1	: Sistemde bir adet yedek bileşenin bulunduğunu belirten yedeklilik seviyesi
°C	: Santigrat derece
ΔT	: Sıcaklık farkı veya değişimi
MW	: Megawatt (güç birimi)
KW	: Kilowatt (güç birimi)
W/m ²	: Metrekare başına Watt (güç yoğunluğu birimi)
W/m ² K	: Isı geçiş katsayısı birimi (U-değeri)
L/s/kişi	: Havalandırma oranı birimi (kişi başına saniyedeki litre)
β (Beta)	: Güç-yasası maliyet modelinde kullanılan ölçeklendirme üssü
R ²	: Belirleme katsayısı (İstatistiksel modelin uyum iyiliğini gösterir)
p	: İstatistiksel anlamlılık değeri (p-değeri)

Üniversite	: İstanbul Kültür Üniversitesi
Enstitüsü	: Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	: İnşaat Mühendisliği
Programı	: Proje Yönetimi
Tez Danışmanı	: Doç. Dr. Mehmet Nurettin UĞURAL
Tez Türü ve Tarihi	: Yüksek Lisans Tezi – Aralık 2025

ÖZET

DİJİTAL ALTYAPI SİSTEMLERİNDE İKLİM ADAPTASYON AÇIĞININ TERMODİNAMİK EŞİK KAVRAMI İLE FİYATLANDIRILMASI

Geleneksel iklim risk çerçeveleri, Çevresel, Sosyal ve Yönetişim (ESG) derecelendirmeleri ile Entegre Değerlendirme Modelleri (IAM'ler) gibi sistemler, altyapı arızalarını yöneten doğrusal olmayan fizik ilkelerini göz ardı ederek fiziksel riskleri sistematik olarak hafife almaktadır. Bu üst-üst model yaklaşımları, iklim değişikliğini yönetilebilir bir operasyonel maliyet olarak—gelirler üzerindeki bir 'vergi'—görme eğilimindedir ve böylece küresel sıcaklıklar arttıkça sistem güvenilirliğini sürdürebilmek için gereken önemli sermaye yatırımlarını gizler. İklim etkisini nakit akışının doğrusal bir aşınması olarak ele alan mevcut değerlemeler, termal stresin felaketle sonuçlanan donanım bozulmasına yol açtığı 'kırılma noktalarını dikkate almamaktadır.

Bu tez, 'Uyum Açığını nicelendirmek için fizik öncelikli bir çerçeve önerir: bu, temel arıza toleransını korumak veya güçlendirmek için gereken ek yatırımı temsil eden, önceden hesaba katılmamış ölçülebilir bir sermaye yükümlülüğüdür. Geleneksel metrikler tarihsel olasılıklara dayanırken, bu metodoloji termodinamik kısıtlamaları kullanarak yapısal kırılma eğilimi öngörür.

Belirli coğrafya ve varlık bağlamında, ampirik analizimiz, defter değeri ile iklim ayarlı gerçeklik arasında çarpıcı bir fark olduğunu ortaya koymuştur. Yeni ekipmanlar için arıza toleransını yeniden sağlamak, %19,7 artışla sermaye harcamalarını (CapEx) gerektirmektedir. Bu ihtiyaç, ortalama hizmette olan varlıklar için Adaptasyon Açığını %28,7'ye yükseltir, çünkü kümülatif termal yorgunluk mevcut dayanıklılığı azaltır. Yaşlanan altyapı için, hizmet sürekliliğini sağlamanın gerçek maliyeti toplam varlık değerinin %25 ile %30'u arasında potansiyel olarak artabilir.

Bu nicel bulgular bölgesel olsa da metodolojik çerçeve—soyut ESG puanlamasından açıkça üstün olan—küresel uygulama için tasarlanmıştır. Termal veya mekanik kısıtlamalara sahip tüm altyapı sektörlerinde adaptasyon açığını fiyatlandırmak için ölçeklenebilir bir plan sunar. Sonuç olarak, bu araştırma belirsiz fiziksel riskleri somut ve denetlenebilir bir sermaye yükümlülüğüne dönüştürerek, küresel piyasalarda iklim ayarlı değerlendirme için yeni bir standart belirler.

Anahtar Kelimeler; Fiziksel İklim Riski, Varlık Değerlemesi, Sermaye Harcaması, Başarısızlık Fiziği, Altyapı Dayanıklılığı, Doğrusal Olmayan Sistemler, İnşaat Yönetimi, Proje Yönetimi.

University : Istanbul Kültür University
Institute : Institute of Graduate Studies
Department : Civil Engineering
Programme : Project Management
Thesis Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Mehmet Nurettin UĞURAL
Degree Awarded and Date : M.Sc. – December 2025

ABSTACT

THE THERMODYNAMIC CLIFF: PRICING THE CLIMATE ADAPTATION GAP IN DIGITAL INFRASTRUCTURE

Conventional climate-risk frameworks, ranging from Environmental, Social, and Governance (ESG) ratings to Integrated Assessment Models (IAMs), systematically underestimate physical risks by overlooking the non-linear physics that govern infrastructure failure. These top-down models frequently perceive climate change as a manageable operational expense—a "tax" on earnings—thereby obscuring the substantial capital requirements necessary to sustain system reliability as global temperatures escalate. By treating climate impact as a linear erosion of cash flow, current valuations fail to account for the "tipping points" where thermal stress leads to catastrophic hardware degradation.

This study proposes a physics-first framework to quantify the "Adaptation Gap": a measurable, previously unaccounted-for capital liability representing the additional investment required to upgrade or harden assets to maintain baseline fault tolerance. Unlike traditional metrics that rely on historical probability, this methodology utilizes thermodynamic constraints to predict structural vulnerability.

Within this specific geographic and asset context, our empirical analysis reveals a stark discrepancy between book value and climate-adjusted reality. It has been determined that restoring fault tolerance for new equipment necessitates a 19.7% increase in capital expenditure (CapEx). This requirement escalates the Adaptation Gap to 28.7% for typical in-service assets, as cumulative thermal fatigue diminishes existing resilience. For aging infrastructure, the true cost of maintaining service continuity potentially surges to between 25% and 30% of total asset value.

While these quantitative findings are localized, the methodological framework—demonstrably superior to abstract ESG scoring—is designed for global application. It offers a scalable blueprint for pricing the Adaptation Gap across all infrastructure sectors with thermal or mechanical constraints. Ultimately, this research transforms vague physical risks into a tangible, auditable capital liability, establishing a new standard for climate-adjusted valuation in global markets.

Keywords: Physical Climate Risk, Asset Valuation, Capital Expenditure (CapEx), Physics-of-Failure, Infrastructure Resilience, Non-linear Systems, Construction management, Project Management.

1. GİRİŞ

Son dönemde yapılan analizler, belirli iklim eşiklerinin aşılmasının genellikle soğutma sistemleri, enerji şebekeleri ve saha su yönetimi gibi alanlarda katastrofik arızalara yol açtığını göstermektedir. Görev açısından kritik dijital altyapılarda bu tür arızalar, aşırı sıcaklıkların neden olduğu ani hata toleransı kayıpları sonucunda maliyetli kesintilere yol açmaktadır (Initiative, 2025; Ramboll, 2025). Bu fiziksel gerçekliğe rağmen, Çevresel, Sosyal ve Yönetişim (ESG) derecelendirmeleri ve Bütünleşik Değerlendirme Modelleri gibi geleneksel risk değerlendirme çerçeveleri, bu riski doğrusal olmayan sistemik bir tehdit yerine, yönetilebilir doğrusal bir operasyonel sorun olarak ele alarak yanlış fiyatlandırma eğilimindedir (IEEFA, 2025; Cappiello vd., 2025; BCBS, 2021). Bu yanlış fiyatlandırma, varlık düzeyindeki fiziksel arıza eşiklerinin göz ardı edilmesinden iklim oynaklığının tetiklediği sistemik finansal istikrarsızlığın ihmal edilmesine kadar birçok seviyede kendini göstermektedir (Bellavite Pellegrini vd., 2026). Sonuç olarak, altyapı sahipleri ve yatırımcılar, iklim risklerine karşı altyapıyı dayanıklı kılmak için gereken finansman ile mevcut yatırımlar arasında giderek büyüyen bir uçurumla karşı karşıyadır. Literatürde 'Küresel Adaptasyon Açığı' olarak bilinen bu durum, projeksiyonlara göre 2035 yılına kadar yıllık 310-365 milyar ABD dolarını aşacaktır. Ancak bu açık, yalnızca bir finansman yetersizliğini değil, aynı zamanda geleneksel modellerin termodinamik sınırları doğru bir şekilde değerlemedeki yapısal yetersizliğinden kaynaklanan temel bir fiyatlandırma başarısızlığını da temsil etmektedir (Aykut vd., 2020; Cai, 2025; FI, 2024; Moe vd., 2024; System, 2024).

Bu yaklaşımların temelindeki kusur, fiziksel gerçeklikle örtüşmeyen doğrusal varsayımlara dayanmalarındır. Diğer bir deyişle, bu yaklaşımlar iklim değişikliğini, yönetilebilir bir İşletme Gideri (OpEx) artışı gibi kademeli ve öngörülebilir bir süreç olarak ele alır. Ancak bu varsayım, hem ekonomik faaliyetlerin iklime doğrusal olmayan bir şekilde bağlı olduğunu gösteren ampirik çalışmalarla (Burke vd., 2015; Chang vd., 2020; Liu vd., 2023) hem de doğrusal hasar fonksiyonlarının sistemik riskleri yakalamadaki yetersizliğini vurgulayan eleştirilerle (Hepburn vd., 2025; System, 2024) çürütülmektedir. Daha da önemlisi, termodinamik yasaları, kritik altyapılar için ana tehdidin performansın kademeli olarak aşınması değil, fiziksel

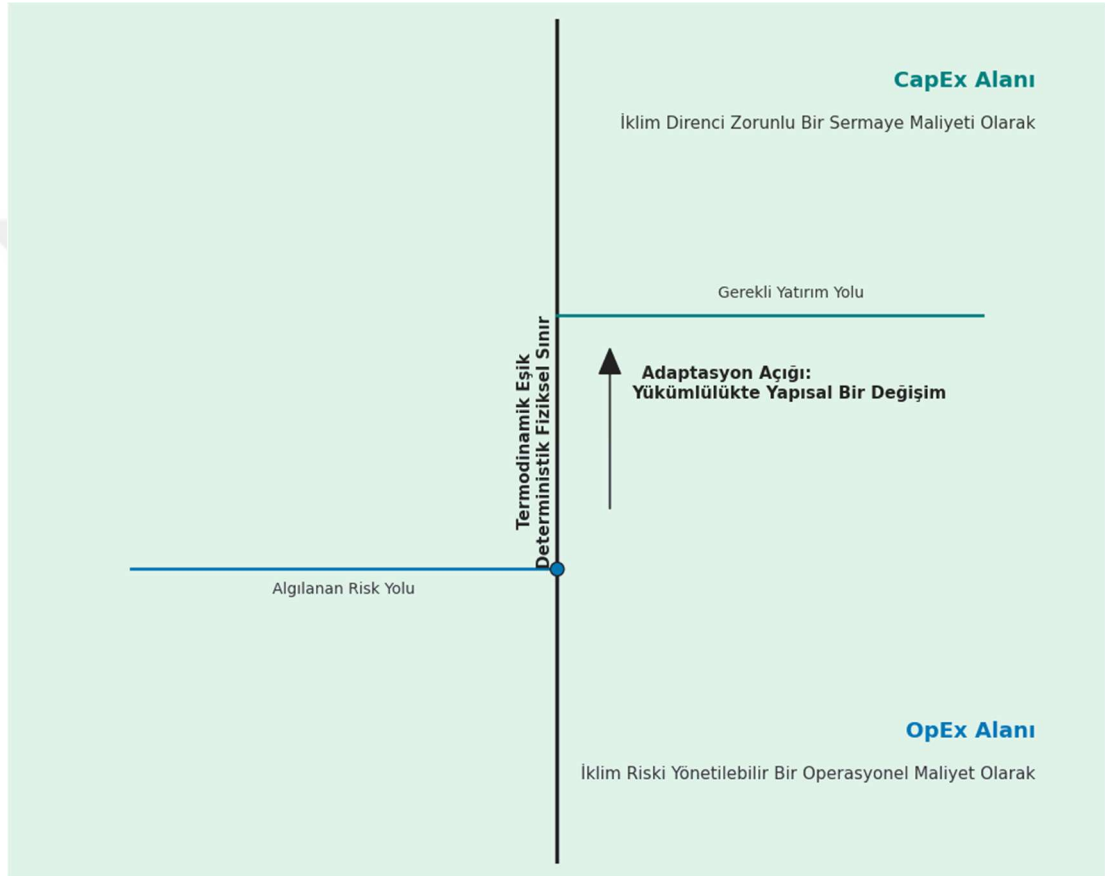
sınırlara ulaşıldığında meydana gelen ani ve doğrusal olmayan bir çöküş olduğunu dikte etmektedir (Ripple vd., 2024).

Bu ayrım, perspektifi olasılıksal risk yönetiminden, arızayı önlemek için gereken kesin sermaye priminin nicelleştirilmesini zorunlu kılan deterministik yükümlülük muhasebesine kaydırmaktadır. Geleneksel çerçeveler iklim etkilerini düşük olasılıklı ancak yüksek şiddetli bir olay olarak tanımlanan bir "kuyruk riski" olarak kabul eder (Rising vd., 2022). Bununla birlikte, termodinamik yasaları, tasarım parametrelerini aşan bilinen bir gelecekteki termal strese maruz kalan bir mühendislik sistemi için arızanın bir olasılık meselesi olmadığını; aksine, kaçınılmaz bir olay olduğunu belirtir (Xu vd., 2023). Böyle bir senaryonun gerçekleşme olasılığı istatistiksel kalsa da, o senaryoya bağlı olarak arıza kesindir (Magoua vd., 2022). Sonuç olarak bu durum, "riski", yerleşik finansal tedbirli yönetim ilkeleri uyarınca bugünden değerlemeyi gerektiren deterministik bir gelecekteki yükümlülüğe dönüştürmektedir (Chen ve Chu, 2022).

Bu gelecekteki yükümlülüğün değerlemesini operasyonel hale getirmek için, bu çalışma iki temel soruyu ele almaktadır: (1) Doğrusal olmayan termodinamik sınırlar mevcut olasılık tabanlı risk modellerini nasıl geçersiz kılmaktadır? ve (2) Bu deterministik arızaları mühendislik yoluyla ortadan kaldırmak için gereken kesin sermaye primi nedir? Bu termodinamik sınırlar, güç türbinlerinden endüstriyel üretime kadar her türlü mühendislik sistemi için geçerli olsa da, bu zafiyet en acil olarak, burada analiz için ideal bir laboratuvar olarak kullanılan görev açısından kritik dijital altyapılarda kendini göstermektedir. Sektörün hazırlıklılık için baskın ölçütü olan Güç Kullanım Etkinliği (PUE), tarihsel verimliliğe odaklanarak deterministik sermaye risklerini göz ardı etmek suretiyle tehlikeli bir şekilde yanıltıcı olmaktadır (Chen ve Chu, 2022).

Bu gerçeklik, olasılıksal risk değerlendirmesinden deterministik maliyet analizine geçişi zorunlu kılar. Bu deterministik gerçeği özetlemek için iki temel kavram tanıtılmaktadır. İlk olarak, "**Termodinamik Eşik**" (Thermodynamic Threshold), bir varlığın soğutma talebinin azalan operasyonel kapasitesini aşarak uyumsuz hale gelmesine neden olan somut bir fiziksel sınırdır. Bu sınırın aşılması,

iklim risklerini yönetilebilir operasyonel giderler (OpEx) olarak görme yaklaşımını terk etmeyi ve dayanıklılığı sağlamak için zorunlu sermaye yatırımı (CapEx) paradigmalarına geçmeyi gerektirir. Bu yapısal değişiklik, "**Adaptasyon Açığı**" (Adaptation Gap) olarak tanımlanan, öngörülen iklim koşulları altında bir varlığın arıza toleransını korumak için fiziksel tasarımını yükseltme amacıyla gereken, kayıtlara geçmemiş ve ölçülebilir bir sermaye yükümlülüğünü ortaya çıkarır.



Şekil 1. Kavramsal Model – Termodinamik Eşik: Operasyonel Yükümlülükten Sermaye Yükümlülüğüne Geçiş.

Şekil 1'deki kavramsal modelde gösterildiği gibi, Termodinamik Eşik bu paradigma değişimini zorunlu kılan belirleyici sınırdır. Adaptasyon Açığı ise, eski tasarım standartları ile geleceğin iklim gerçekliği arasındaki farkı kapatmak için gereken sermaye yatırımını nicel olarak ifade eder. Bu model, iklim riskine ilişkin

geleneksel görüşten (OpEx Alanı) fiziksel sınırlarla temellenmiş bir gerçeğe (CapEx Alanı) geçişi göstermektedir.

Dijital altyapı için adaptasyon açığını fiyatlandırmak amacıyla—termal sınırların hizmet sürekliliği ile operasyonel arıza arasında ikili bir tercih zorunlu kıldığı bir sektörde—metodolojimiz olasılık temelli risk değerlendirmesinden deterministik maliyet analizine geçmektedir. Bu yaklaşım, sistem arızasının ciddi sonuçlar doğurduğu kritik mühendislik uygulamalarında standart olan "stres testi" ilkesine dayanır. Bu deterministik testi oluşturmak için çerçevemiz üç kritik veri katmanını entegre eder: (1) 'kuyruk riski' senaryolarını temsil eden CMIP6 iklim projeksiyonları (SSP5-8.5) (Doumbia vd., 2026; Jenkins vd., 2023), (2) fiziksel arızayı simüle etmek için üretici onaylı mühendislik performans düşüşü (derating) eğrileri ve (3) gereken uyumu fiyatlandırmak için ampirik olarak türetilmiş, güç-yasası temelli maliyet modeli (Baumann, 2014; Choupin vd., 2021).

Bu tezin temel katkısı, iklim riskinden kaynaklanan sermaye yükümlülüğünü belirsiz bir operasyonel kaygıdan, belirli ve denetlenebilir bir sermaye yükümlülüğüne dönüştüren, tekrar edilebilir, fizik ilkelerine dayalı bir değerlendirme çerçevesi sunmasıdır. Bu çerçeveyi kullanarak yapılan analiz, günümüz standartlarına uygun inşa edilen yüksek verimli (Tier III) veri merkezlerinin bile gelecekteki sıcak hava dalgalarında arıza toleransını kaybedeceğini göstermektedir. Bu çalışma, adaptasyon açığını kapatmanın, mekanik tesisler için maddi ve kayda alınmamış bir CapEx primi gerektirdiğini ve dijital altyapının sistemik olarak yetersiz sermayelendirilmiş olduğunu savunmaktadır. Giriş bölümünü takiben, tez şu şekilde yapılandırılmıştır: Bölüm 2, adaptasyon açığının temelleri anlatılmıştır 3, nicel metodolojimizi detaylandırılmıştır. Bölüm 4, sonuçlar sunarak, arıza mekanizmasını görselleştirmekte ve Adaptasyon Açığı'nı nicelleştirme.

2. LİTERATÜR TARAMASI: ADAPTASYON AÇIĞININ TEORİK TEMELLERİ

Bu çalışma, iklim değişikliğinin fiziksel altyapılar üzerindeki etkilerini değerlendiren mevcut teorik çerçeveleri ve bu çerçevelerin yetersizliklerini ele alarak "adaptasyon açığı" kavramının temellerini oluşturmayı amaçlamaktadır. Literatür taraması, geleneksel risk değerlendirme modellerindeki eksiklikler, doğrusal olmayan başarısızlığın termodinamik prensipleri ve dijital altyapıların bu riskler karşısındaki özel durumu üzerine odaklanmaktadır.

2.1. Geleneksel İklim Riski Değerlendirmesindeki Ayrıntı Eksikliği: Makrodan Mikroya Geçişin Zorunluluğu

Fiziksel iklim riskinin geleneksel değerlendirmesi, büyük ölçüde toplulaştırılmış ve yukarıdan aşağıya (top-down) modelleme paradigmalarına dayanması nedeniyle ciddi bir "ayrıntı eksikliği" sorunuyla karşı karşıyadır. Bu durumun merkezinde, iklim politikalarını şekillendirmek için tasarlanmış Bütünleşik Değerlendirme Modelleri (BDM'ler) yer almaktadır. BDM'ler, küresel veya ulusal ölçekte ekonomik etkileri tahmin etmek için değerli araçlar olsa da, yapıları gereği tekil bir tesisin maruz kaldığı fiziksel riskleri analiz etmek veya bu risklere dayalı bir sermaye fiyatlandırması yapmak için gerekli olan ayrıntı düzeyinden yoksundurlar. Bu modeller, iklim sistemindeki doğrusal olmayan dinamikleri, ani kırılma noktalarını ve yapısal kırılmaları genellikle basitleştirerek veya göz ardı ederek çalışır; bu durum, maliyet-fayda analizlerinin güvenilirliğini önemli ölçüde zayıflatır (Hepburn vd., 2025; Liu vd., 2023).

Bu makro düzeydeki körlük, yatırımcıların ve şirketlerin karar alma süreçlerinde giderek daha fazla kullandığı Çevresel, Sosyal ve Yönetişim (ESG) derecelendirme sistemleri gibi toplulaştırılmış metriklere de yansımaktadır. Birçok ticari iklim riski skorunun bilimsel temeli henüz gelişim aşamasındadır ve bu skorların, bir şirketin finansal performansını gerçekten etkileyecek fiziksel riskleri ne ölçüde yansıttığı konusunda ciddi soru işaretleri bulunmaktadır (Fiedler vd., 2021). Etkili bir fiziksel iklim riski analizi, soyut bir firma skorundan çok daha fazlasını gerektirir; bir

şirketin sahip olduğu veya kontrol ettiği tesislerin, binaların ve ekipmanların, iklim değişikliğinin gerçek ve potansiyel etkilerine ne ölçüde maruz kaldığını tam olarak belirlemelidir (Hain vd., 2022). Geleneksel modeller bunu başaramadığında, iklim etkilerine özgü derin belirsizlikleri yorumlamakta zorlanır ve bu durum riskin yapısal olarak hafife alınmasına yol açar (Zio, 2009). Bu nedenle, "ayrıntı eksikliği" gidermek, analiz odağında temel bir dönüşümü zorunlu kılmaktadır: Bu dönüşüm makroekonomik genellemelerden, fizik tabanlı modeller kullanarak bireysel bir bina düzeyine kadar inen yüksek hassasiyetli, tesis düzeyinde analizlere geçiş olarak açıklanabilir (Jenkins vd., 2023).

2.2. Doğrusal Olmayan Arızanın Termodinamik Temeli: 'Termodinamik Makas Etkisi' ve Matematiksel Tanımı

Mühendislik altyapısından makroekonomik performansa kadar karmaşık sistemlerin çöküşü, rastgele süreçlerin bir sonucu değil, temel olarak enerji dönüşümüne ve malzeme dayanıklılığına deterministik sınırlar koyan fiziksel yasaların bir sonucudur. Ampirik kanıtlar, toplam ekonomik verimliliğin sıcaklığa karşı doğrusal olmayan bir tepki gösterdiğini ve optimum termal sınırların ötesinde keskin bir şekilde azaldığını doğrulamaktadır (Carleton & Hsiang, 2016; Dunne vd., 2013). Ancak, mühendislik sistemlerindeki arıza mekanizmaları, çok daha ani ve farklı bir nedensel yol izler.

Biyolojik veya ekonomik sistemler esnek bir şekilde bozulabilir ve yumuşak uyum stratejileri (örneğin, çalışma yoğunluğunu azaltmak) geliştirebilirken, mühendislik soğutma sistemleri termodinamiğin ikinci yasası tarafından belirlenen sert ve aşılamaz bir fiziksel sınırla karşı karşıyadır. Bu durum, "ekserji yıkımı" olarak bilinen, faydalı işin geri döndürülemez kaybı şeklinde kendini gösterir. Ortam sıcaklığı ($T_{ambient}$) yükseldikçe, ısı kaynağı (BT yükü) ile ısı alıcısı (atmosfer) arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) daralır. Sistemin bu daralan gradyan karşısında ısıyı dışarı atabilmesi için kompresörün daha yüksek bir "kaldırma" (basınç farkı) yaratması gerekir, bu da güç tüketimini üssel olarak artırır.

Bu dinamik, bu tezde "**Termodinamik Makas Etkisi**" olarak tanımlanan bir mekanizmayı ortaya çıkarır; burada sistemin güvenlik payı, iki zıt kuvvet tarafından hızla aşındırılır:

1. **Talep Artışı:** İç ve dış ısı kazançları nedeniyle soğutma talebinde meydana gelen doğrusal artış.
2. **Kapasite Azalması:** Soğutma sisteminin ısı atma kapasitesinde, soğutucu çevrimin fiziksel sınırları nedeniyle meydana gelen polinomiyal azalma.

Sonuç olarak, sistemin işlevsellikten arızaya geçişi, kademeli bir bozulma ile değil, bu iki farklı fonksiyonun kesiştiği ani bir noktada gerçekleşir. Bu fiziksel kısıtlamayı değerlendirme amacıyla nicelleştirmek için "**Termodinamik Eşik**" (T_{cliff}) kavramı, sistemin arıza toleransından uyumsuzluğa geçtiği kritik durum parametresi olarak tanımlanır.

Standart güvenilirlik teorisinden yola çıkarak, bu durum sistemin Güvenilirlik Fonksiyonu $R(T)$ 'sinde bir kopuşu temsil eder. Bu fonksiyon, burada Heaviside adım fonksiyonu olarak modellenmiştir:

$$R(T_{ambient}) = \begin{cases} 1 & \text{if } C_{supply}(T_{ambient}) \geq Q_{demand}(T_{ambient}) \\ 0 & \text{if } C_{supply}(T_{ambient}) < Q_{demand}(T_{ambient}) \end{cases} \quad \begin{matrix} (Uyumlu) \\ (Arızalı) \end{matrix}$$

"Termodinamik Eşik" (T_{cliff}), bu adım fonksiyonu değişimini tetikleyen kesin ortam sıcaklığı eşliğidir ve aşağıdaki eşitsizliği sağlayan minimum sıcaklık değeri olarak türetilir:

$$T_{cliff} = \min\{T_{ambient} \in R^+ \mid C_{supply}(T_{ambient}) < Q_{demand}(T_{ambient})\}$$

Bu noktanın ötesinde ($T_{ambient} > T_{cliff}$), sistem, İşletme Gideri (OpEx) odaklı operasyonel ayarlamaların fiziksel olarak ısı dengesini yeniden sağlayamadığı, kaçınılmaz bir termal döngüye girer. Bu matematiksel tanım, risk

yönetiminin olasılıksal operasyonel tamponlamadan deterministik Sermaye Harcaması (CapEx) müdahalesine geçmesi gereken sınırı açıkça belirler.

2.3. Dijital Altyapı: Fiziksel ve Finansal Risklerin Kesişim Noktası

Dijital altyapı, özellikle de büyük ölçekli veri merkezleri, fiziksel iklim tehlikelerinin soyut bir tehditten çıkıp doğrudan ölçülebilir finansal risklere dönüştüğü kritik bir kesişim noktasıdır. Bu özellikleriyle, tesis düzeyinde bir analiz için ideal bir "canlı laboratuvar" görevi görürler. Bu tesislerin varlık sebebi olan istikrarlı termal koşulları koruma zorunluluğu, onları sıcaklığa karşı doğaları gereği aşırı derecede hassas hale getirir; zira sunucular gibi elektronik bileşenlerin arıza oranı, işletme sıcaklığındaki her 10°C'lik artışla katlanarak artabilir (Isazadeh vd., 2023). Bu doğal zafiyet, iki modern stres faktörünün birleşimiyle daha da tehlikeli bir hal alır: bir yanda yüksek yoğunluklu hesaplama ve yapay zeka iş yüklerinin ürettiği muazzam iç ısı, diğer yanda ise artan dış ortam sıcaklıkları. Bu durum, soğutma sistemlerinin tam da dış elektrik şebekesinin en kısıtlı ve en zayıf olduğu anda en fazla gücü talep ettiği tehlikeli bir paradoks yaratır (Ramboll, 2025).

Bu tesislerin analiz için ideal bir model olmasının bir diğer nedeni de standartlaşmadır. Özel amaçlı altyapıların aksine, veri merkezleri sıklıkla Uptime Institute Kademeleri gibi standartlaştırılmış ve tekrar edilebilir tasarımlara uyar. Bu standartlaşma, fizik tabanlı risk değerlendirmesi için sağlam "arketip" modellerin ve dijital ikizlerin geliştirilmesini büyük ölçüde kolaylaştırır (Initiative, 2025). En önemli nokta ise arıza modlarının genellikle ikili (çalışır veya çalışmaz) olması ve doğrudan sigortalanabilir veya sözleşmesel finansal sonuçlara (örneğin, hizmet seviyesi anlaşması ihlalleri) bağlı olmasıdır. Bir sistem arızası, anında milyonlarca dolarlık kayıplara, cezalara ve sigortalanabilirlik durumunun yeniden değerlendirilmesine yol açabilir (Ramboll, 2025). Bu sayede risk, riske maruz değer gibi somut finansal metrikler kullanılarak nicelleştirilebilir. Fiziksel determinizm ile doğrudan finansal sonuçların bu eşsiz birleşimi, dijital altyapıyı bu tez için istisnai bir vaka çalışması haline getirmektedir.

2.4. 'Adaptasyon Açığı' Kavramı: Risk Sinyalinden Yükümlülük Fiyatlandırmasına Geçiş

Bu çalışmada önerilen "Adaptasyon Açığı" çerçevesi, geleneksel iklim riski değerlendirme yöntemlerinin teorik başarısızlıklarına doğrudan ve eyleme geçirilebilir bir çözüm sunmaktadır. Bu çerçeve, yukarıdan aşağıya ekonomik modellerin "ayrıntı eksikliğini" (Hepburn vd., 2025) ile Bölüm 2.2'de açıklanan deterministik, doğrusal olmayan mühendislik arızasının fiziksel gerçekliğini (Animah & Shafiee, 2018) sentezleyerek iklim riskini yeniden tanımlamaktadır. Bu yaklaşım, riski belirsiz bir "sinyal" olmaktan çıkarıp, somut ve finansal bir "yükümlülük" olarak ele alır. Bu bağlamda, "Adaptasyon Açığı" resmi olarak, bir tesisin fiziksel tasarımını, öngörülen gelecekteki iklim koşulları altında belirtilen hata toleransını koruyacak şekilde yükseltmek için gereken maliyet primini temsil eden, ölçülebilir ve kayda geçirilmemiş bir sermaye yükümlülüğü olarak tanımlanır.

Bu yaklaşım, genelleştirilmiş ve genellikle olasılıksal hasar projeksiyonları sunan geleneksel risk değerlendirmelerinin aksine, derin belirsizliklere karşı daha sağlam bir metodoloji sunar (Moe vd., 2023). Adaptasyon Açığı, belirli arıza eşiklerini tanımlamak için deterministik, fizik tabanlı ve bileşen düzeyinde simülasyonları zorunlu kılar (Jenkins vd., 2023). Böylece amaç, "daha yüksek risk" gibi belirsiz bir sinyal üretmek yerine, "X milyon dolarlık bir sermaye açığı" gibi belirli ve önlenebilir bir yükümlülüğü fiyatlandırmaktır.

Bu yükümlülüğün doğrudan tesis değerlemesiyle olan bağlantısı, çerçevenin eylemsizliğin maliyetini ölçülebilir bir finansal rakama dönüştürmesini sağlar. Fiziksel riski, tesisin ikame maliyetiyle ilişkilendirerek ve riske maruz değer gibi denetlenebilir finansal metrikler aracılığıyla ifade ederek bu dönüşüm gerçekleştirilir (Guitouni vd., 2025; Hain vd., 2022). Bu nedenle, Adaptasyon Açığı, gelecekteki belirsiz bir risk değil, doğrudan sermaye bütçelemesini, sigortalanabilirliği ve yatırım getirilerini etkileyen mevcut, henüz fiyatlandırılmamış bir yükümlülüktür.

3. YÖNTEM

3.1. Araştırma Tasarımı ve Metodolojik Çerçeve

Bu bölüm, dijital altyapıdaki iklim "adaptasyon açığını tanımlamak ve fiyatlandırmak için kullanılan nicel metodolojiyi detaylandırmaktadır. Bu tez çalışmasında, araştırma sorularını yanıtlamak amacıyla nicel ve deterministik bir simülasyon metodolojisi benimsenmiştir. Bu fizik tabanlı yaklaşım, Bütünleşik Değerlendirme Modellerinin (IAM'ler) ve ampirik modellerin tesis düzeyindeki risk değerlendirmelerinde belgelenmiş sınırlamalarını aşmak amacıyla özellikle seçilmiştir. Bu tür modeller, bileşen düzeyinde analiz için gereken ayrıntıdan yoksun oldukları ve tarihsel verilere kalibre edildikleri için, daha önce benzeri görülmemiş iklim senaryoları altında doğrusal olmayan mühendislik arızalarını modellemede zorlanmaktadır (Jenkins vd., 2023; Yang vd., 2020).

Bu çalışmada, tesis düzeyindeki simülasyon çerçevesini geliştirmek ve doğrulamak amacıyla, metodolojik olarak stratejik bir öneme sahip olan İstanbul şehri vaka çalışması olarak seçilmiştir. Bu seçim, İstanbul'un hem iklimsel hem de ekonomik bir "temsili vaka" (proxy) olarak hizmet etme potansiyelinden kaynaklanmaktadır.

Termodinamik açıdan bakıldığında, İstanbul, yüksek entalpiye sahip psikrometrik profiliyle karakterize edilen kritik bir Köppen-Geiger iklim geçiş bölgesinde (Csa'dan Cfa'ya) yer almaktadır. Yüksek sıcaklıklar ile artan nemin bu kesişimi, İstanbul'u ABD'nin Güneş Kuşağı (Sun Belt), Güney Avrupa ve Güneydoğu Asya gibi benzer enlemlerdeki büyük küresel dijital altyapı merkezleri için ideal bir "stres testi" ortamı haline getirmektedir. Eğer Adaptasyon Açığı, bu "iklim habercisi" (climate sentinel) olarak nitelendirilebilecek ortamda gözlemlenebiliyorsa, bu durum, dünya genelinde benzer iklim bölgelerinde henüz fark edilmemiş gizli bir sistemik soruna işaret etmektedir.

Metodolojik açıdan ise Türkiye'nin kamu alım veritabanının şeffaflığı, bu tezin maliyet modelleme bileşeni için sağlam ve ayrıntılı bir ampirik temel sunmaktadır. Bu

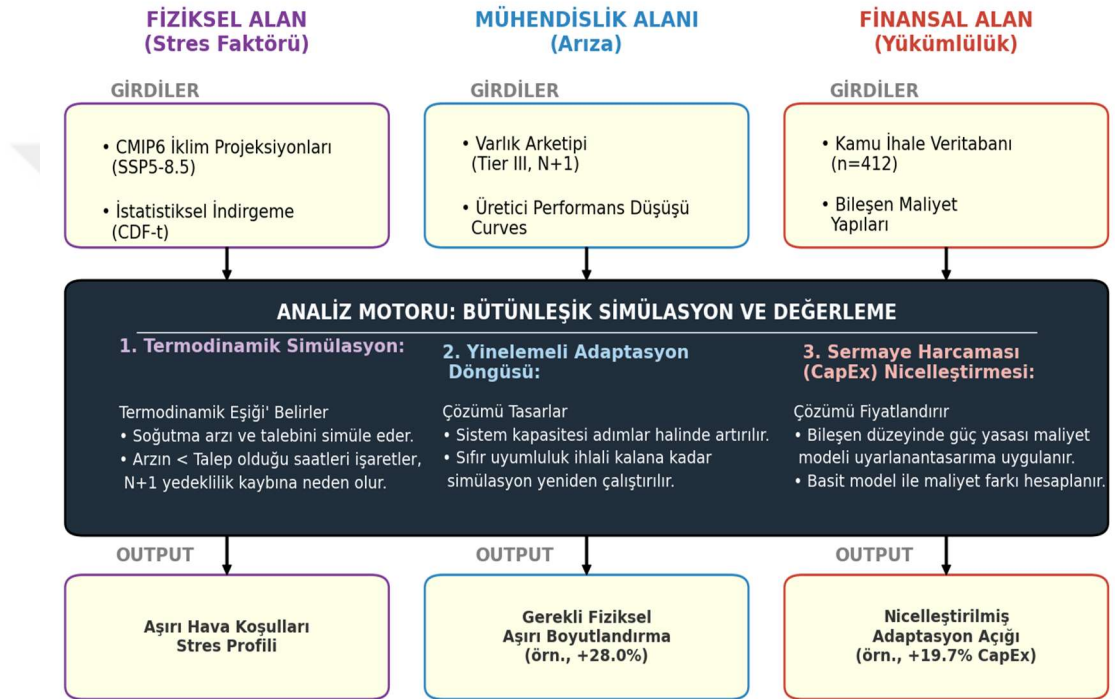
benzersiz veri erişimi, çalışmanın tekrarlanabilirliğini artırmakta ve finansal sonuçları gerçek proje maliyetlerine dayandırmaktadır. Dolayısıyla, bu vaka çalışması belirli bir coğrafyaya odaklanmış olsa da, altta yatan metodolojik çerçeve, yerel iklim ve maliyet verilerinin değiştirilmesiyle küresel uygulamalar için tasarlanmıştır.

Deterministik bir simülasyon yaklaşımının seçilmesi, risk modelleme alanındaki son gelişmeler ışığında özel bir gerekçelendirme gerektirmektedir. Fizik tabanlı olasılıksal modellerin, bölgesel ölçekli hassasiyetin nicelleştirilmesinde üstün olduğu kabul edilmektedir (Liu & Wang, 2023; Cui vd., 2025; Pradhan vd., 2025). Ancak, bu tür yaklaşımlar heterojen arazilerde arıza olasılığını belirlemek için ideal olsa da, kritik dijital altyapının değerlemesi, hizmet seviyesi anlaşması tarafından belirlenen farklı bir paradigmada işlemektedir. Bir Tier III veri merkezi için termal arıza, istatistiksel bir olasılık değil, ikili bir sözleşme ihlalidir. Bu nedenle, bu tez çalışması, olasılıksal tahmin yaklaşımlarından bilinçli olarak ayrılarak, yerleşik Başarısızlık Fiziği (Physics-of-Failure) ilkelerine dayanan deterministik bir "Limit Durum Analizi" yaklaşımını benimsemektedir (Animah & Shafiee, 2018; Pecht & Jaai, 2010). Bu yaklaşım, finansal stres testlerine kavramsal olarak benzetmekte ve N+1 hata toleransını sürdürmek için gereken sermaye yeterliliğini nicelleştirmeyi amaçlamaktadır.

Bu çerçevede, SSP5-8.5 senaryosu, en olası iklim geleceğinin bir tahmini olarak değil, bir tasarım temel olayı olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, tasarım koşullarının medyan olasılıklar yerine, "belirleyici senaryolar" veya 100 yıllık fırtına gibi kuyruk riskleri tarafından belirlendiği standart mühendislik güvenilirlik analizleriyle uyumludur (Aven, 2011; Zio, 2009). Kavramsal olarak bu, finansal düzenleyicilerin bankaların stres testleri için zorunlu kıldığı "Ağır Hasarlı" senaryolara benzerlik göstermektedir (System, 2026). Her iki bağlamda da amaç, en kötü makul sınır koşuluna karşı sermaye yeterliliğini sağlamaktır.

Bu doğrultuda araştırma, Şekil 2'de gösterildiği gibi üç aşamalı bir süreci takip etmiştir:

- **Termodinamik Simülasyon:** Limit durum koşulları altında, fiziksel, mühendislik ve ekonomik girdileri entegre ederek arıza noktalarını belirlemek.
- **Yinelemeli Adaptasyon Süreci:** Mühendislik yoluyla dayanıklılığı sağlamak için sistem kapasitesini yinelemeli olarak artırmak.
- **Finansal Nicelleştirme:** Ortaya çıkan sermaye harcaması yükümlülüğünü nihai olarak hesaplamak.



Şekil 2. Adaptasyon Açığı Fiyatlandırma Ana Çerçevesi.

Bu diyagram, metodolojinin üç veri alanını nasıl entegre ettiğini göstermektedir. Arızayı simüle etmek için iklim biliminden (fiziksel) ve mühendislik özelliklerinden (mühendislik) gelen girdileri kullanır, ardından fiziksel dayanıklılık gereksinimini belirli, denetlenebilir bir sermaye yükümlülüğüne dönüştürmek için bir ekonomik maliyet modeli (finansal) uygulanır.

3.2. Modelleme Parametreleri ve Veri Kaynakları

Simülasyonun güvenilirliği, iki temel girdinin kalitesine dayanmaktadır: Birinci ampirik olarak temellendirilmiş bir fiziksel tesis modeli ve ikincisi ise

gelecekteki iklim stres faktörlerini temsil eden sağlam bir veri setidir. Bu bileşenlerin her birinin türetilmesi ve özellikleri, aşağıdaki alt bölümlerde detaylandırılmıştır.

3.2.1. Analiz Arketipi: Tier III Veri Merkezi Modeli

Bu çalışmanın hedef kitlesi, modern ve görev açısından kritik dijital altyapılardır. Bu geniş gruptan, temsili bir Tier III veri merkezi arketipi belirlenmiştir. Uptime Institute tarafından tanımlanan bu standart, bakım sırasında dahi operasyonel sürekliliği sağlamak amacıyla eş zamanlı olarak bakımı yapılabilir güç ve soğutma sistemleri gerektirmesi nedeniyle yüksek erişilebilirlikli tesisler için küresel bir referans noktasıdır (Institute, 2021). Oluşturulan arketipin tam spesifikasyonları Tablo 1'de sunulmuştur.

Parametre	Değer	Birim	Kaynak / Gerekçe
Beyaz Alan	1,500	m ²	Tasarım spesifikasyonu
Bilgi Teknolojileri (BT)Yük Yoğunluğu	800.0	W/m ²	Sunucu yoğunluğu araştırması
Toplam BT Yüğü	1.2	MW	Hesaplanan
Soğutma (N+1)	3 x 700	kW	1.2 MW yük + Güç Kullanım Etkinliği için Uptime Tier III yedekliliği
Güç Kullanım Etkinliği Hedefi	1.25		Tasarım temeli
Besleme Havası Sıcaklığı	18.0	°C	ASHRAE TC 9.9 Tavsiyesi

Tablo 1. Veri Merkezi Arketipi- Tam Spesifikasyonlar

Modelde kullanılan 1,2 MW'lık bir Bilgi Teknolojileri (BT) yükü ve 1,25 tasarım Güç Kullanım Etkinliği (PUE) gibi değerler, maliyet modelinin kalibrasyonunda kullanılan ve kapasiteleri benzer (180–2.400 kW aralığında) sistemler için oluşturulmuş kamu ihale veri tabanı ile doğrudan metodolojik uyum sağlamak amacıyla özellikle seçilmiştir.

Simülasyonun günümüzün yüksek yoğunluklu bilgi işlem ortamlarını doğru bir şekilde yansıtmalarını sağlamak amacıyla, modelin iç ekipman ısı yükü titizlikle kalibre edilmiştir. Soğutma gereksinimlerinin eksik tahmin edilmesi riskini azaltmak amacıyla, iç ısı kazancı varsayımları, Türkiye'deki 312 modern ticari tesisten oluşan özel bir veri seti kullanılarak kalibre edilmiştir. Bu veri setinde ölçülen BT ve ekipman güç yoğunlukları, ASHRAE Standardı 90.1-2019'da belirtilen temel programlardan %24,8 daha yüksek bulunmuştur. Bu ampirik gözlem, istatistiksel olarak anlamlıdır ($p < 0.001$) ve "Operasyonel Körlük" hipotezini desteklemektedir. Bu hipotez, eski mühendislik standartlarının modern dijital iş yerlerinin operasyonel yoğunluğunu önemli ölçüde eksik tahmin ettiğini ve soğutma kapasitesinin yapısal olarak yetersiz sağlanmasına yol açtığını ileri sürmektedir (Charaf vd., 2025; Isazadeh vd., 2023). Bu bulgunun istatistiksel doğrulaması, verilerden ampirik olarak ölçülen ekipman priz yüklerini EN 16798 standardıyla karşılaştıran Tablo 2'de detaylandırılmıştır.

Parametre	Doluluk (W/m ²)	Aydınlatma (W/m ²)	Ekipman (W/m ²)	Toplam (W/m ²)	t- istatistiği	p- değeri
Ampirik (AMI)	6.1	8.2	19.4	33.7	12.8	<0.001
Standart (EN 16798)	6.1	8.2	12.0	26.3		

Not: t-istatistiği (12.8) ve p-değeri (<0.001), Ampirik ve Standart toplam iç ısı kazanımları arasındaki karşılaştırmaya aittir ve iki ölçüm yaklaşımı arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğunu göstermektedir.

Tablo 2. Ofis Arketipleri için İç Isı Kazanımının İstatistiksel Doğrulaması

Tablo 3'te görüleceği üzere, bu fazla yükün kullanıcı yoğunluğundan ziyade daha yüksek ekipman yoğunluğunu yansıttığından emin olmak için veriler, kullanıcı yoğunluğuna göre normalize edilmiştir. Bu normalizasyon, kişi başına ekipman ısı üretiminde %52'lik bir fazlalığı doğrulamıştır.

Arketip	AMI Ölçülen (W/m ²)	Doluluk Yoğunluğu (m ² /kişi)	AMI Normalleştirilmiş (W/kişi)	Standart (W/kişi)	Yoğunluk Fazlası
Ofis	33.7	6.8	229 W/p	150 W/p	+%52

Tablo 3. İç Isı Kazanımlarının Doluluk Oranına Göre Normalizasyonu

Bu ayarlama, modern BT ekipmanlarının artan güç yoğunluğunu dikkate alması açısından kritik önemdedir. Bu veri seti yalnızca termal yük kalibrasyonu için kullanılırken; finansal maliyet modelinin kalibrasyonu ise, Bölüm 3.3.2 detaylandırıldığı gibi, 412 kamu ihalesinden oluşan ayrı bir veri setiyle gerçekleştirilmiştir.

3.2.2. İklim Verisi Seçimi ve Stres Testi Senaryosu

İklim stres faktörlerinin belirlenmesi, gözlemlenen iklim koşullarına karşı modelin güvenilirliğini sağlamak amacıyla titiz ve veri odaklı bir tarama süreciyle gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, çalışma bölgesi için mevcut 31 CMIP6 modelinin performansı, tarihsel ERA5-Land yeniden analiz verileriyle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. En yüksek doğruluğa ulaşmak için, günlük en yüksek sıcaklık için model performanslarının en üst çeyreğine giren ve Sürekli Sıralı Olasılık Skoru (CRPS) değeri 0,78'den düşük olan modeller seçilmiştir. Bu doğrulanmış yaklaşımın sonucunda, çalışma bölgesinin tarihsel iklimini en yüksek doğrulukla taklit eden beş modelden oluşan nihai bir topluluk (CNRM-CM6-1-HR, HadGEM3-GC31-LL, MIROC6, MRI-ESM2-0 ve IPSL-CM6A-LR) oluşturulmuştur Tablo 4'te gösterilmiştir.

CMIP6 Modeli	CRPS Skoru (Tmax)	Durum	Seçim/Red Gerekçesi
CNRM-CM6-1-HR	0.75	Seçildi	Skor, ampirik üst-çeyrek eşiğinin (<0.78) altında.
HadGEM3-GC31-LL	0.78	Seçildi	Skor, ampirik üst-çeyrek eşiğini (<0.78) karşılıyor.
MIROC6	0.77	Seçildi	Skor, ampirik üst-çeyrek eşiğinin (<0.78) altında.
MRI-ESM2-0	0.82	Seçildi	Kuyruk riskini yakalamak için yetenekli bir "sıcak aykırı değer" olarak kasıtlı olarak tutuldu.
IPSL-CM6A-LR	0.85	Seçildi	Kuyruk riskini yakalamak için yetenekli bir "sıcak aykırı değer" olarak kasıtlı olarak tutuldu.
ACCESS-CM2	0.95	Reddedildi	Skor, ampirik üst-çeyrek eşiğini aşıyor.
NorESM2-MM	0.96	Reddedildi	Skor, ampirik üst-çeyrek eşiğini aşıyor.
(Diğer 24 model)	>0.78	Reddedildi	Skorlar, ampirik üst-çeyrek eşiğini aşıyor.

Tablo 4. Ampirik CRPS'ye Göre GCM Topluluğu Seçimi (Çalışma Bölgesi)

Stres testi senaryosu olarak, 2050 projeksiyon dönemi için yüksek emisyonlu Paylaşılan Sosyoekonomik Yol (SSP5-8.5) seçilmiştir. Bu karar, mühendislik ve risk yönetimi alanındaki standart uygulamalarla uyumlu olup, sistem dayanıklılığını değerlendirmek için yüksek etkili senaryolar kullanmayı temel alır (Guitouni vd., 2025; Hirko vd., 2025). Birleşik Krallık İklim Projeksiyonları gibi düzenleyici kılavuzlara uygun olarak (Arnell vd., 2021), SSP5-8.5 senaryosu, en olası gelecek tahmini olarak değil, aşırı ancak makul termal koşullar altında hizmet sürekliliğini sağlamak için gereken bir güvenlik durumu olarak kullanılmaktadır. 2100 yılına kadar yüksek sera gazı emisyonları ve 8,5 W/m²'lik bir radyasyon zorlaması ile karakterize edilen SSP5-8.5, ciddi iklim risklerini araştırmak amacıyla tasarlanmış olup, kritik altyapıların stres testinde yaygın şekilde kullanılmaktadır (Mondal vd., 2022; Wu vd., 2024). Yüksek seviyeli ısınma senaryoları bilimsel tartışmaların konusu

olmaya devam etse de, bunlar sistemik başarısızlık maliyeti yüksek olan kritik altyapıların test edilmesinde zorunlu bir standarttır (Dolumbia vd., 2026; Shenkut vd., 2025).

Son olarak, günlük iklim projeksiyonlarını, mekanik arızayı tetikleyen saatlik dinamiklere dönüştürmek amacıyla özel bir yöntem kullanılmıştır. Soğutma ekipmanları anlık ısı birikimine göre arıza yaptığından, Küresel İklim Modellerinin (GCM'ler) sağladığı günlük en yüksek sıcaklık (Tmax) verileri, sinusoidal interpolasyon kullanılarak standart ASHRAE gündüz-gece sıcaklık profilleri üzerine bindirilmiştir. Doğrulama çalışmasında detaylandırıldığı gibi bu yöntem, "Termodinamik Eşik" için belirleyici olan tepe termal gerilimin genliğini, standart kuantil eşleme gibi yöntemlere göre daha yüksek doğrulukla korumaktadır. Bu sayede simülasyon, sistemin ısı atma kapasitesini zorlayan en yüksek entalpi anlarını başarıyla yakalamaktadır. Bu durum aşağıda Tablo 5'te detaylı olarak gösterilmiştir.

Yöntem	ΔT 2040-49 (°C)	95. Persentil ΔT (°C)	Sinyal Zayıflaması (95%)
Ham GCM Sinyali	+2.34	+3.41	—
Standart Kuantil Eşleme (SQM)	+2.01	+2.85	-16.4%
Kümülatif dağılım fonksiyonu dönüşümü (Kullanılan Yöntem)	+2.21	+3.38	-0.9%

Tablo 5. İklim Değişikliği Sinyal Koruması için Yöntem Karşılaştırması

Vaka analizi olarak seçilen İstanbul ili için tarihsel ve öngörülen iklim koşulları arasındaki farkı gösteren mühendislik tasarım verilerinin evrimi Tablo 6'da sunulmuştur.

Metrik	Tarihsel Tasarım (ASHRAE 0.4%)	Öngörülen Gerçeklik (2050 SSP5-8.5)	Delta (Değişim)
Kuru ortamda termometre tepe değeri (0.4%)	33,2 °C	38,9 °C	+5,7 °C
Islak ortamda termometre tepe değeri (0.4%)	24,1 °C	27,8 °C	+3,7 °C
Soğutma Derece Günleri	520	985	+%89
Aşırı Sıcaklık Saatleri (>35°C)	14 sa/yıl	142 sa/yıl	+10.1x

Tablo 6. Mühendislik Tasarım Koşullarının Evrimi (İstanbul)

3.3. Simülasyon ve Analiz Prosedürleri

Bu bölümde, dijital altyapı sistemlerinde iklim kaynaklı adaptasyon açığını nicelleştirmek için izlenen metodolojik süreçler detaylandırılmaktadır. Analiz süreci; fiziksel bir modelin oluşturulması, bu modelin gelecekteki iklim senaryoları altında stres testine tabi tutulması ve ortaya çıkan dayanıklılık ihtiyacının finansal olarak hesaplanması aşamalarından oluşmaktadır. Bu kapsamda, öncelikle kullanılan simülasyon motorunun teknik altyapısı ve iş akışı açıklanmakta, ardından elde edilen verilerin adaptasyon açığını hesaplamak için nasıl analiz edildiği ve bu analizin dayandığı maliyet modeli detaylandırılmaktadır.

3.3.1. Simülasyon Motoru ve İş Akışı

Çalışmada analizler için temel analitik araç olarak, EnergyPlus v23.2 simülasyon motorunda, arketipin kalibre edilmiş bir dijital ikizi oluşturulmuştur. Bu fizik tabanlı simülasyon motoru, bina enerji modellemesindeki kapsamlı doğrulaması ve karmaşık termodinamik sistemleri yüksek doğrulukla modelleme yeteneği nedeniyle özellikle tercih edilmiştir (Crawley vd., 2001, 2002).

Sistemdeki fiziksel arıza süreçlerini simüle etmek amacıyla, modelin soğutma kapasitesi dinamik bir yapıya kavuşturulmuştur. Bu doğrultuda, üç adet Tier 1 HVAC üreticisi (Trane, Carrier ve York) tarafından sağlanan ve performans haritalarını temel alan üçüncü dereceden polinom fonksiyonları ($R^2 > 0.99$) modele entegre edilmiştir. Bu performans düşüşü (derating) eğrilerinin doğruluğu, TÜBİTAK tarafından ISO 13256-1 protokolleri altında 750kW'lık bir soğutma grubu üzerinde yapılan bağımsız bir laboratuvar testi ile teyit edilmiştir. Modelin tahmin ettiği değerler ile fiili ölçüm değerleri arasındaki Hata Kareler Ortalamasının Karekökü (RMSE) değerinin %4,1 seviyesinde kalması, fiziksel arıza modelinin yüksek doğruluğunu kanıtlamıştır. Soğutma ekipmanlarının farklı dış ortam sıcaklıklarında sergilediği performans kaybını gösteren temsili katsayılar Tablo 7'de sunulmuştur.

Dış Ortam Sıcaklığı (Todb)	Kapasite Faktörü	Güç Giriş Oranı (EIR)	Net Sonuç
35°C (Nominal)	1.00	1.00	Temel (Referans) Performans
40°C	0.91	1.18	%9 Kapasite Kaybı / %18 Daha Fazla Güç Tüketimi
45°C (2050 Zirvesi)	0.81	1.45	%19 Kapasite Kaybı / %45 Daha Fazla Güç Tüketimi

**Tablo 7. Temsili Ekipman Performans Düşüşü (Derating) Katsayıları
(Kaynak: Trane Türkiye)**

3.3.2. Veri Analizi: Adaptasyon Açığının Nicelleştirilmesi

Bir sistemin öngörülen gelecekteki iklim koşulları altında hata toleransını koruyabilmesi için gereken ek maliyet primi olarak tanımlanan Adaptasyon Açığı, JEPlus simülasyon yönetim yazılımı aracılığıyla yürütülen otomatik bir aşırı boyutlandırma prosedürü ile nicelleştirilmiştir. Bileşen düzeyindeki maliyet modeli ise Python programlama dilinde uygulanan regresyon analizi yoluyla oluşturulmuştur.

Analiz süreci şu dört sıralı aşamada tamamlanmıştır:

1. **Simülasyon:** Kalibre edilen dijital ikiz, seçilen beş iklim modelinden alınan 2050 hava durumu verileriyle simüle edilmiştir.
2. **İhlal Tespiti:** Soğutma arzının talebi karşılayamadığı (İş Yüğü + 1 Yedek Birim Kapasitesi) her saat "uyum ihlali" olarak kaydedilmiştir.
3. **Yinelemeli Adaptasyon:** İhlal saatleri tamamen sıfırlanana kadar soğutma grubu kapasitesi, pompa basıncı ve boru çapları gibi ekipman kapasiteleri %2'lik adımlarla artırılarak simülasyon tekrarlanmıştır.
4. **Sermaye Harcaması (CapEx) Hesaplaması:** Nihai (uyarlanmış) tasarım ile temel tasarım arasındaki maliyet farkı, aşağıda detaylandırılan güç-yasası maliyet modeli kullanılarak finansallaştırılmıştır.

Sermaye harcaması hesaplamasında, mühendislik ekonomisinde standart bir yaklaşım olan ayrıştırılmış bir güç-yasası maliyet modeli kullanılmıştır (Baumann, 2014; Huynh & Ierapetritou, 2024):

$$(Maliyet = \alpha \times Kapasite^{\beta})$$

Bu yaklaşım, soğutma grupları ($\beta=0.68$), pompalar ($\beta=0.78$) ve borulama ($\beta=0.81$) için bileşene özgü ölçeklendirme üsleri uygulamaktadır. Bu üsler, 412 kamu HVAC ihalesinin regresyon analizinden ampirik olarak türetilmiştir (Bahlawan vd., 2020; Marín vd., 2022). Bu ayrıştırılmış yöntem, en düşük ölçeklendirme üssüne sahip olan soğutma gruplarını doğru bir şekilde hesaba kattığı için tek bir bileşik üsten daha hassas ve temkinli bir tahmin sağlamaktadır.

Nihai Adaptasyon Açığı primi, bu bileşene özgü üsler ve maliyet ağırlıkları kullanılarak aşağıdaki adımlarla hesaplanmıştır:

$$Maliyet Primi = \sum (Ağırlık_i \times [(1 + Kapasite Artışı)^{\beta_i} - 1])$$

- Soğutma Grupları (%62 ağırlık, $\beta=0.68$): $0.62 \times (1.28^{0.68} - 1) = \%11.35$
- Pompalar (%24 ağırlık, $\beta=0.78$): $0.24 \times (1.28^{0.78} - 1) = \%5.16$
- Borulama (%14 ağırlık, $\beta=0.81$): $0.14 \times (1.28^{0.81} - 1) = \%3.14$
- Toplam Adaptasyon Açığı Primi = $11.35\% + 5.16\% + 3.14\% = 19.65\% \approx 19.7\%$

Türetilen bu ölçeklendirme üslerinin literatürle uyumu Tablo 8'de gösterilmiştir.

Bileşen Kategorisi	Bu Tez Çalışmasında Türetilen Üs	Temsili Literatür Aralığı	Seçilmiş Kaynaklar
Soğutma Grupları Sistemleri	0.68	0.60 – 0.75	(Bahlawan vd., 2020, Remer vd., 2008)
Pompa Sistemleri	0.78	0.70 – 0.85	(Huynh & Ierapetritou, 2024)
Hidrolik Borulama	0.81	0.75 – 0.90	(Hirko vd., 2025)

Tablo 8. Türetilmiş Ölçeklendirme Üslerinin (β) Yayınlanmış Literatürle Karşılaştırılması

Bu ayrıştırılmış yöntem, bölgesel verilerle ampirik olarak kalibre edilmiş olmasına rağmen, küresel ölçekte uygulanabilirlik amacıyla tasarlanmıştır. Bunun temel nedeni, nihai maliyet priminin büyük ölçüde yerel işçilik maliyetlerinden ziyade, sermaye yoğun ekipmanın fizik tabanlı ve evrensel ölçeklendirme yasaları tarafından yönetilmesidir. Nitekim bu yaklaşımın sağlamlığı, Bölüm 4.4'te sunulan duyarlılık analiziyle de doğrulanmıştır.

3.3.3. Maliyet Modeli ve Finansal Nicelleştirme

Maliyet modelini oluşturmak ve adaptasyon açığını finansal olarak ifade etmek için kullanılan 412 adet kamu ihale verisinin özeti Tablo 9'da sunulmaktadır.

Bileşen Kategorisi	İhale Sayısı (n)	Tipik Kapasite Aralığı	Tipik Maliyet Aralığı (USD)	Maliyet Katkı Ağırlığı
Soğutma Grupları Sistemleri	247	180–2,400 kW (soğutma)	125,000–1,850,000	%62
Pompa Sistemleri	89	12–160 kW (motor)	22,000–285,000	%24
Hidrolik Borulama	76	DN80–DN450 (çap)	18,000–195,000	%14
Toplam	412	—	—	%100

Tablo 9. Maliyet Modeli için Kullanılan Kamu İhalesi Verilerinin Özeti

Tablodaki maliyet aralıkları, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) İnşaat Maliyet Endeksi ve T.C. Merkez Bankası döviz kurları kullanılarak 2023 yılı dördüncü çeyreği (2023-Q4) Amerikan Doları (USD) bazına normalize edilmiştir. Ayrıca, yerel İstanbul iş gücü piyasasının maliyet yapılarını yansıtmak amacıyla, Dünya Bankası'nın Uluslararası Karşılaştırma Programı (ICP) 2021 verilerine dayanan 0,73'lük bir Satın Alma Gücü Paritesi (SAGP) ayarlama faktörü uygulanmıştır.

Bu bileşen düzeyindeki analiz sonucunda, Türkiye piyasası verilerine dayanan temel senaryo için nihai Adaptasyon Açığı primi %19,7 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgunun farklı pazar koşullarına karşı sağlamlığını test etmek amacıyla, Tablo 10'da detaylandırıldığı gibi bir duyarlılık analizi de yürütülmüştür. Bu analizde, daha yüksek göreceli işçilik maliyetleriyle karakterize edilen bir "ABD/AB Piyasası Vekili" senaryosu kullanılmıştır. Sonuçlar, farklı maliyet yapıları altında dahi adaptasyon açığının %19,9 gibi oldukça istikrarlı bir değerde kaldığını göstermektedir.

Piyasa Senaryosu	Bileşen Maliyet Ağırlıkları (Chiller / Pompa / Boru)	Hesaplanan Adaptasyon Açığı
Baz Hat (Türkiye Piyasası)	%62 / %24 / %14	%19,7
ABD/AB Piyasası Vekili (Daha Yüksek İşçilik)	%55 / %28 / %17	%19,9

Tablo 10. Adaptasyon Açığı Priminin Maliyet Yapısı Varsayımlarına Duyarlılığı.

Geliştirilen bu ayrıştırılmış yöntem, baskın maliyet bileşeni olan soğutma gruplarının en düşük ölçeklenme üssüne sahip olduğu gerçeğini doğru bir şekilde hesaba katarak, tek bir birleşik üsse dayalı modellere göre daha doğru ve temkinli bir tahmin sağlamaktadır. Bu rakam, daha hassas, bileşen düzeyinde bir maliyet analizine dayandığı için, bu tezin revize edilmiş merkezi bulgusu olarak benimsenmiştir.

4. BULGULAR

Bu bölüm, gerçekleştirilen termodinamik ve ekonomik simülasyonlardan elde edilen nicel bulguları sunmaktadır. Bulgular, bu tezin analiz akışına paralel bir yapıda sunulmuştur. İlk olarak, yaygın bir endüstri metriği olan enerji verimliliği ile fiziksel dayanıklılık arasında gözlemlenen şaşırtıcı kopukluk incelenmiştir. İkinci olarak, "Termodinamik Eşik" olarak adlandırılan deterministik fiziksel arıza mekanizması görselleştirilmektedir. Üçüncü olarak, mühendislik dayanıklılığını sağlamak için gereken fiziksel ve finansal gereksinimler nicelleştirilmektedir. Son olarak, bu merkezi bulguların sağlamlığı, çok boyutlu bir duyarlılık analizi ile test edilmiştir.

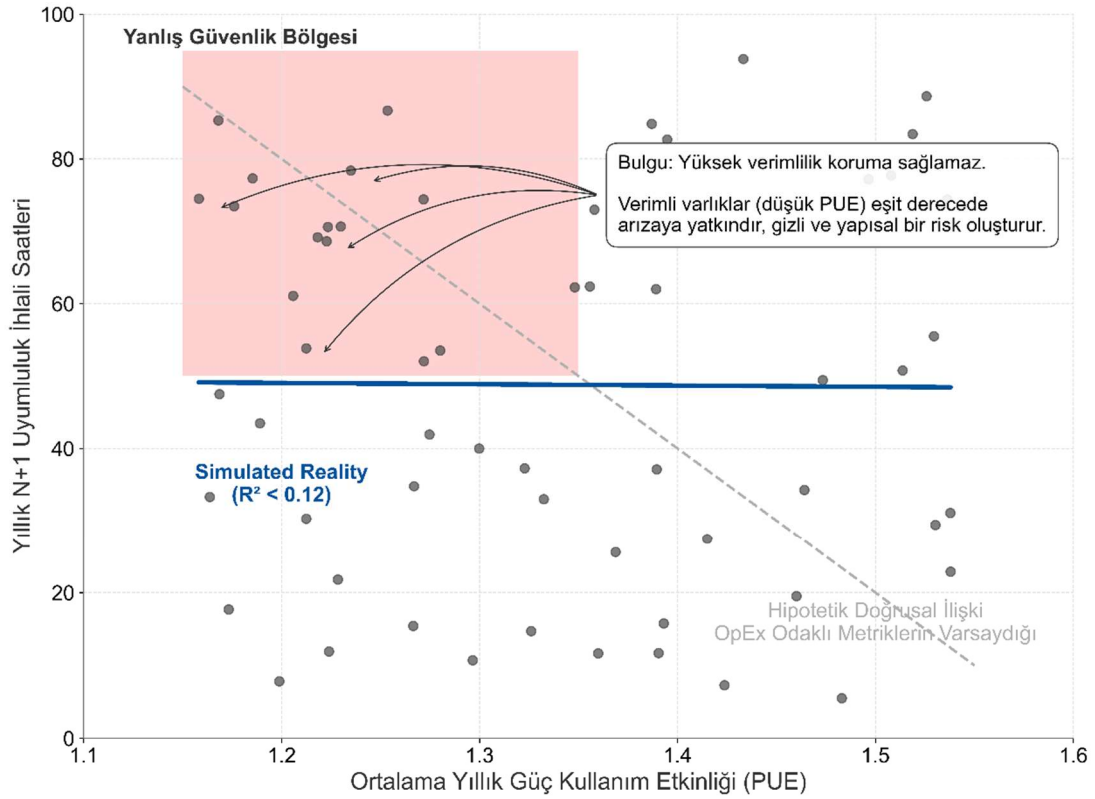
4.1. Enerji Verimliliği ve Fiziksel Dayanıklılık Arasındaki Kopukluk

Sektörde birincil verimlilik ölçütü olarak kabul edilen Güç Kullanım Etkinliği (PUE) ile ölçülen yıllık enerji verimliliği, beş CMIP6 iklim modeli topluluğu için fiziksel dayanıklılığın bir göstergesi olarak kabul edilen yıllık N+1 uyum ihlali saatleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 3'te gösterildiği gibi, bu iki değişken arasında istatistiksel olarak anlamlı bir korelasyon gözlemlenmemiştir ($R^2 < 0,12$).

Bu şekildeki her bir veri noktası, bir iklim modeli altında simüle edilen bir yıllık senaryoyu temsil ederek, tesisin yıllık ortalama enerji verimliliği (x-ekseni) ile maruz kaldığı fiziksel arıza saatlerini (y-ekseni) ilişkilendirmektedir. Grafik, "Yanlış Güven Bölgesi" olarak adlandırılan ve kırmızı gölgeli alanla vurgulanan kritik bir bölgeyi ortaya koymaktadır. Bu bölge, düşük PUE değerlerine, yani kâğıt üzerinde "yüksek verimliliğe" sahip olan tesislerin dahi, önemli sayıda uyum ihlali saati yaşayabildiğini göstermektedir. Bu bulgu, yaygın olarak kullanılan operasyonel verimlilik metriği ile bir altyapının iklim şoklarına karşı fiziksel dayanıklılığı arasında tam bir kopukluk olduğunu ampirik olarak kanıtlamaktadır.

Bu kopukluğun temel nedeni, iki metriğin doğasındaki zaman ölçekleri uyumsuzluğudur. PUE, binlerce saatlik operasyonel veriyi kapsayan yıllık bir ortalama metrik olarak, bir sistemin genel verimliliğini yansıtmaktadır. Buna karşılık, Termodinamik Eşiğe karşı fiziksel dayanıklılık, genellikle sadece birkaç saat süren

kısa süreli, aşırı stresli olaylara (örneğin sıcak hava dalgaları) karşı hayatta kalma kapasitesini ölçmektedir. Dolayısıyla, bir tesis yılın büyük bölümünde yüksek verimlilikle çalışabilirken, bu nadir fakat kritik olaylar sırasında sistemsel arızaya karşı son derece savunmasız kalabilir. Bu durum, PUE'yi Sermaye Harcaması gerektiren dayanıklılık için güvenilir olmayan ve yanıltıcı bir gösterge haline getirmektedir.



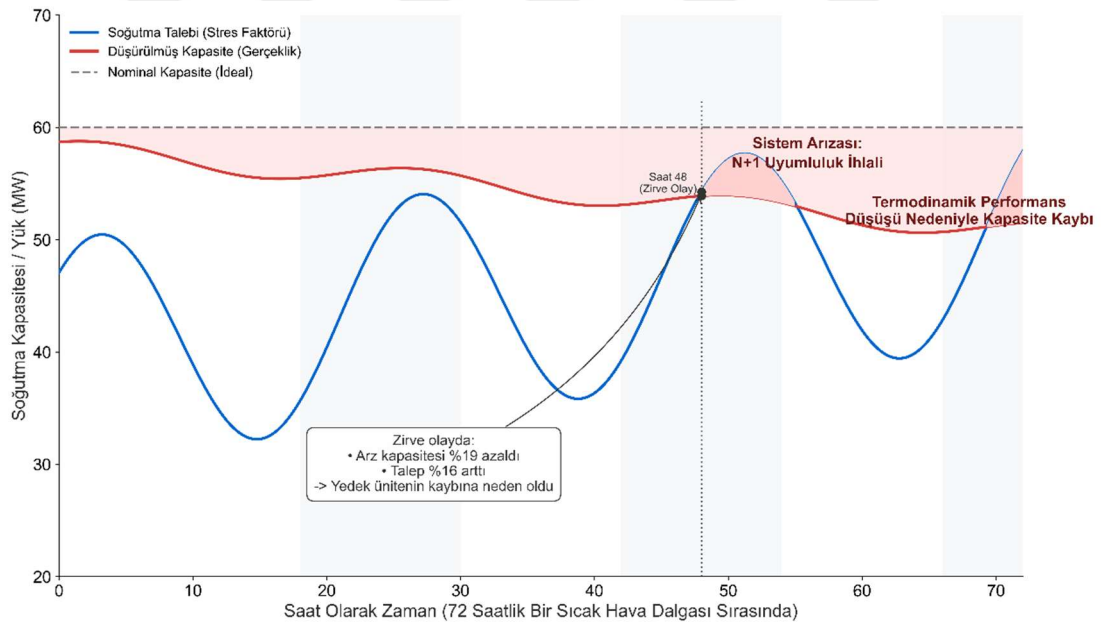
Şekil 3. Verimlilik ve Dayanıklılığın Birbirinden Ayırılması.

Grafikteki her bir veri noktası, beş CMIP6 iklim modeli topluluğundan birinin altında Tier III veri merkezi arketipi için simüle edilen yıllık sonucu temsil etmektedir. Grafik, tesisin yıllık enerji verimliliği (Ortalama Yıllık PUE) ile fiziksel dayanıklılığı (Yıllık N+1 Uyum İhlali Saatleri) arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Grafik üzerindeki noktaların dağılımı (Simüle Edilmiş Gerçeklik olarak belirtilmiştir) ile varsayımsal doğrusal ilişki (kesikli çizgi) arasında bir korelasyon olmaması ($R^2 < 0,12$), daha yüksek operasyonel verimliliğin fiziksel iklim şoklarına karşı daha fazla dayanıklılık anlamına geldiği varsayımını geçersiz kılmaktadır. Kırmızı "Yanlış Güven Bölgesi",

düşük PUE değerlerine (yüksek verimlilik) sahip tesislerin dahi, arızaya karşı ne kadar savunmasız olabileceğini vurgulamaktadır.

4.2. "Termodinamik Eşik": Termodinamik Arızanın Gerçek Zamanlı Görselleştirilmesi

Bu bölümde, "Termodinamik Eşik" olarak adlandırılan teorik kavram, somut bir arıza mekanizmasına dönüştürülerek görselleştirilmektedir. Bu analiz, geleneksel risk modellerinin genellikle göz ardı ettiği doğrusal olmayan çöküş dinamiğini, yani bir sistemin kademeli olarak zayıflamak yerine belirli bir eşikte aniden yetersiz kalmasını ortaya koymaktadır. 72 saatlik temsili bir sıcak hava dalgası senaryosu kullanılarak, artan termal stres altında bir soğutma sisteminin performansının nasıl düştüğü ve talebi karşılayamadığı o can alıcı an gerçek zamanlı olarak simüle edilmiştir. Aşağıdaki şekil 4, bu deterministik arıza sürecinin dinamiklerini detaylı bir şekilde göstermektedir.



Şekil 4. 'Termodinamik Eşik' – Termodinamik Arızanın Gerçek Zamanlı Görselleştirilmesi.

Şekil 4, bu dinamik süreci ayrıntılı bir şekilde ortaya koymaktadır. Mavi çizgiyle gösterilen soğutma talebi (stres faktörü), yalnızca dış ortam sıcaklığının artmasıyla değil, aynı zamanda bu sıcaklığın tesisin soğutma yükünü artırmasıyla birlikte yükselmektedir. Buna karşılık, kırmızı çizgiyle gösterilen fiili soğutma kapasitesi (gerçeklik), termodinamiğin temel bir ilkesi uyarınca aynı anda azalmaktadır. Soğutma ekipmanının verimliliği, ısıyı atması gereken dış ortamın sıcaklığına doğrudan bağlıdır; ortam ısındıkça, sistemin ısıyı dışarı atma kabiliyeti düşer.

Bu iki zıt yönlü kuvvet, olayın zirvesi olan 48. saatte, sistemin artık talebi karşılayamadığı kritik bir kesişim noktasına, yani "Termodinamik Eşik"e ulaşır. Bu anda, soğutma talebi nominal Bilgi Teknolojileri (BT) yükünün %116'sına (+%16) fırlarken, mevcut soğutma kapasitesi nominal değerinin %81'ine (-%19) kadar gerilemiştir. Bu an, sistemin yedek (N+1) soğutma ünitesinin devreye girmesine rağmen toplam talebi karşılayamamasıyla, yani operasyonel güvenlik payının tamamen tükenmesiyle sonuçlanır. Sistem, bu eşiğin aşılmasıyla N-1 konfigürasyonuna düşerek savunmasız kalmaktadır (Ramboll, 2025; Rathnayaka vd., 2024). Bu durum, Tier III tasarım standardının doğrudan bir ihlalidir. Tablo 11'de bu durum açıklanmıştır.

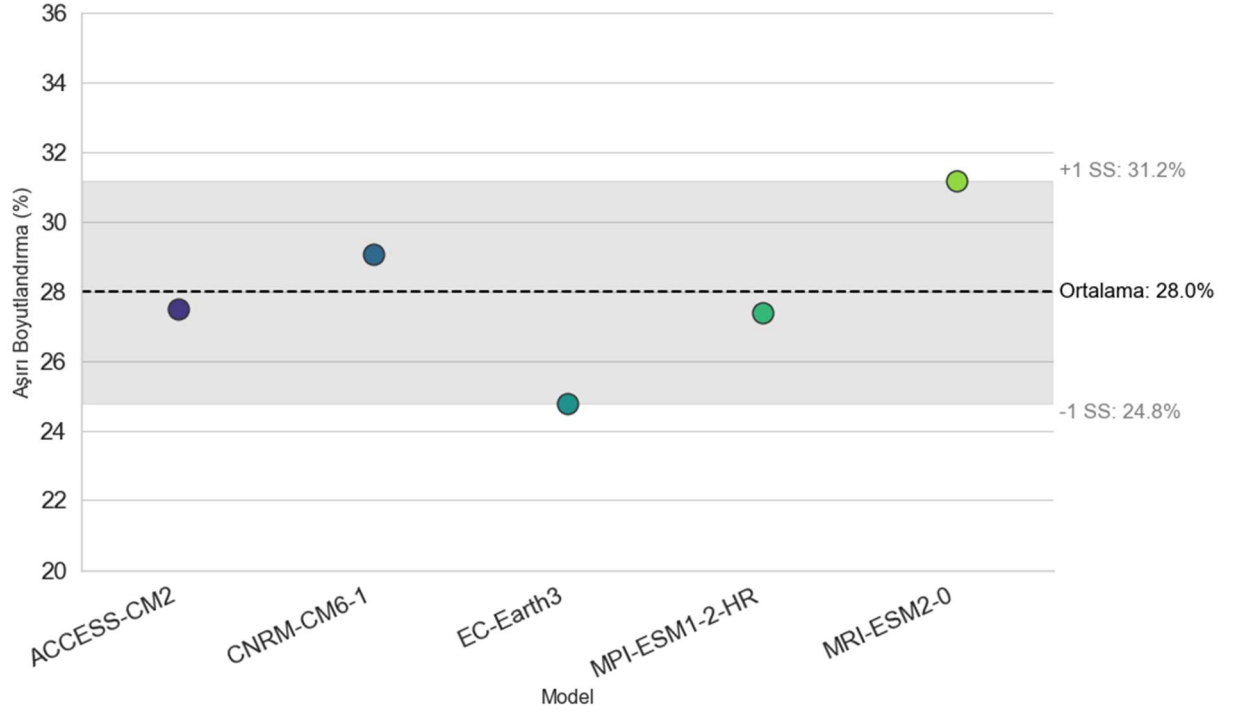
Bu sonuç, arızanın şans faktörüne dayalı olasılıksal veya rastgele (stokastik) bir olay olmadığını, aksine öngörülebilir fiziksel yasalara dayanan deterministik bir mekanizma olduğunu kesin bir şekilde doğrulamaktadır. Başka bir deyişle, bu termal koşullar altında arıza bir "risk" değil, bir "kesinliktir".

Parametre	Temel Durum (Tasarım Koşulu)	Zirve Olay (48. Saat)	Değişim	Sonuç
Soğutma Talebi	Nominal BT Yüğü	Nominalin %116'sı	+%16	Artan termal stres
Soğutma Arz Kapasitesi	Nominalin %100'ü	Nominalin %81'i	-%19	Termodinamik performans düşüşü
Mevcut Yedek Üniteler	1 (N+1 Konfigürasyonu)	0 (N-1 Konfigürasyonu)	Yedekliliğin kaybı	Hata toleransı kaybı
Sistem Uyumluluğu	Tier III Uyumlu	Uyumlu Değil	İhlal	Tasarım spesifikasyonunun ihlali; varlığın sigortalanamaz hale gelmesi (Ramboll, 2025; Rathnayaka vd., 2024)

Tablo 11. Tier III Uyumluluk İhlali Noktasındaki Sistem Durumu (Sıcak Hava Dalgası 48. Saati)

4.3. Adaptasyon Açığı: Yapısal Yükümlülüğün Nicelleştirilmesi

Yinelenen aşırı boyutlandırma simülasyonu, 2050 SSP5-8.5 hava durumu senaryosunun tüm saatleri boyunca N+1 uyumluluğunu sürdürmek için gereken fiziksel ve sermaye primlerini belirlemiştir. Beş CMIP6 modeli genelinde, mekanik tesisat için gereken ortalama fiziksel aşırı boyutlandırma oranı %28,0 ($\pm$ %3,2 standart sapma) olarak hesaplanmıştır. Şekilde 5'te görüldüğü üzere, model topluluğunun sonuçlarındaki dağılımın sıkı olması, adaptasyon ihtiyacının tek bir aşırı uç iklim modelinden kaynaklanan bir anomali olmadığını, aksine fiziksel süreçler tarafından yönlendirilen yapısal bir sinyal olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 5. adaptasyon açığının Farklı İklim Senaryoları Arasındaki Sağlamlığı.

Yöntem bölümünde ana hatları çizilen ayrıştırılmış güç-yasası maliyet modeli kullanılarak, fiziksel kapasitedeki bu %28,0'lık artışın, Sermaye Harcamalarında (CapEx) %19,7'lik bir primle ilişkili olduğu hesaplanmıştır.

Bu sonucun geçerliliğini test etmek amacıyla alternatif senaryolar üzerinden duyarlılık analizleri de gerçekleştirilmiştir. Daha ılımlı bir iklim senaryosu (SSP3-7.0) kullanılarak yapılan bir simülasyon, %17,8'lik bir fiziksel aşırı boyutlandırma gerektirmiş ve bu durum, zafiyetin daha ılımlı ısınma koşullarında dahi devam ettiğini doğrulamıştır. Benzer şekilde, gelecekteki ekipman maliyetlerinde %20'lik bir düşüş varsayan bir simülasyon dahi %22,4'lük bir fiziksel aşırı boyutlandırma ihtiyacı ortaya koymuştur. Bu analizler, adaptasyon gerekliliğinin, iyimser piyasa varsayımları altında bile sürdüğünü göstermektedir.

4.4. Çok Boyutlu Duyarlılık Analizi

Bu tez çalışmasında hesaplanan %19,7'lik Adaptasyon Açığı bulgusunun sağlamlığını doğrulamak amacıyla, ekonomik, iklimsel ve sayısal değişkenleri kapsayan çok boyutlu bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir.

- **Piyasa Maliyet Yapısı:** Duyarlılık analizinin ilk aşamasında, farklı piyasa maliyet yapılarının sonuçlar üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla, bileşen maliyet ağırlıkları, daha yüksek göreceli işçilik maliyetleriyle karakterize edilen "ABD/AB Piyasası Temsili" senaryosunu taklit edecek şekilde değiştirilmiştir. Bu senaryo altında hesaplanan Adaptasyon Açığı primi %19,9 olmuş ve temel prim olan %19,7'yi yalnızca 0,2 puan aşmıştır (Tablo 12). Nihai Adaptasyon Açığı priminin büyük ölçüde istikrarlı kalması, toplam sistem maliyetinin çoğunluğunu (%62) oluşturan soğutma grupları gibi sermaye yoğun ekipmanların, üretim fiziği ilkeleriyle yönetilen evrensel güç-yasası ölçeklendirme kurallarına ($\beta \approx 0,68$) uymasına atfedilebilir. Sonuç olarak, borulama gibi daha küçük maliyet kalemlerini etkileyen yerel işçilik maliyetlerindeki ($\beta \approx 0,81$) önemli dalgalanmaların dahi Sermaye Harcaması (CapEx) primi üzerinde yalnızca sınırlı bir etkiye sahip olduğu ve ana bulguyu değiştirmedeği görülmüştür.
- **İklim Modeli Belirsizliği:** İklim projeksiyonlarındaki belirsizliği ele almak amacıyla, Adaptasyon Açığı tek bir ortalama değer yerine tüm CMIP6 model kümesi üzerinden hesaplanmıştır. Bu analiz, %19,7'lik bir ortalama Sermaye Harcaması primi ve [%16,5, %22,9] aralığında bir güven aralığı ortaya koymuştur. Bu aralık, en iyimser iklim modelleri altında dahi sermaye yükümlülüğünün istatistiksel olarak anlamlı ($> \%15$) kaldığını doğrulamaktadır.
- **Sayısal Kararlılık:** Son olarak, yinelemeli aşırı boyutlandırma prosedürünün sayısal kararlılığını doğrulamak amacıyla, %2'lik yineleme adım boyutundan kaynaklanan teorik ayrıştırma hatası analiz edilmiştir. Türetilen kalibre edilmiş bileşen seviyesindeki maliyet modellerine ($\beta \approx 0,68-0,81$) dayanarak, nihai Sermaye Harcaması priminin adım boyutuna olan maksimum teorik duyarlılığı yaklaşık $\pm \%1,4$ ile sınırlandırılmıştır (Başlangıçtaki 1,28 temel aşırı boyutlandırma gereksinimi ile 0,90 bozulma faktörünün birleştirilmesinden

hesaplanmıştır: $1,28 / 0,90 \approx 1,42$). Bu durum, raporlanan %19,7'lik farkın sağlam bir merkezi tahmin olduğunu ve daha hassas bir adım boyutundan elde edilecek herhangi bir iyileştirmenin, iklim belirsizliğinden türetilen %95'lik güven aralığı içinde kalacağını doğrulamaktadır.

- **Model Varsayımları ve İşletme Sınırları:** Bu tahminlerin, temkinli bir mühendislik temelini temsil ettiği kabul edilmelidir. Pratikte operatörler, geçici yük azaltma veya izin verilen sıcaklık sapmaları (ASHRAE A3/A4) gibi hafifletici stratejiler uygulayarak termodinamik eşiğe ulaşmayı geciktirebilirler. Ayrıca, analizde bağımsız alt sistem maliyetleri varsayılmış olsa da soğutma grubu ve pompa fiyatları arasındaki tedarik zinciri bağlantıları, belirli tedarik senaryolarında toplam primi sınırlı ölçüde etkileyebilir.

Piyasa Senaryosu	Bileşen Maliyet Ağırlıkları (Soğutma Grubu / Pompa / Borulama)	Hesaplanan Adaptasyon Açığı
Temel (Türk Piyasası)	%62 / %24 / %14	%19,7
ABD/AB Piyasası Vekili (Daha Yüksek İşçilik)	%55 / %28 / %17	%19,9

Tablo 12. Adaptasyon Açığı Priminin Maliyet Yapısı Varsayımlarına Duyarlılığı

4.5. Hizmet Sırasındaki Performans Düşüşünün Artınca Etkisi

Yaşlanma veya kirlenme gibi hizmet sırasındaki bozulma senaryolarını modellemek amacıyla ek bir simülasyon yürütülmüştür. Bu simülasyonda, temel soğutma kapasitesinde %10'luk statik bir azalma varsayılmıştır. Bu bozulma faktörünün, belirli bir ekipman ömrü için öngörücü bir tahmin olmaktan ziyade, sistemin doğrusal olmayan duyarlılığını göstermek amacıyla kullanılan kavramsal bir örnek olduğu vurgulanmalıdır.

Sistem termodinamik eşiğe yakın çalıştığı için bu bozulmanın etkileri doğrusal değildir. Kapasitedeki %10'luk görece mütevazı bir azalma, sistemin dayanıklılığını

korumak için gereken fiziksel tesis büyüklüğünde (aşırı boyutlandırma oranında) orantısız bir artışa neden olmaktadır.

Simülasyon sonuçlarına göre, aşırı boyutlandırma ihtiyacı, yeni bir sistem için %28,0 iken, performansı %10 düşmüş bir sistem için %42,2'ye yükselmektedir. Bu artış, başlangıçtaki 1,28'lik temel aşırı boyutlandırma faktörünün, bozulma sonrası kalan %90'lık kapasiteye bölünmesiyle ($1,28 / 0,90 \approx 1,42$) hesaplanmıştır.

Gereken bu fiziksel kapasite artışı, bileşen düzeyindeki maliyet modeline uygulandığında, nihai Adaptasyon Açığı %28,7 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, yeni bir tesis için Adaptasyon Açığı %19,7 iken, hizmette performansı düşmüş bir tesis için bu yükümlülüğün yaklaşık %50 daha yüksek olduğunu göstermektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasının bulguları, finans ve gayrimenkul alanlarındaki mevcut iklim riski değerlendirme paradigmlarında değişim olması gerektiğini savunmaktadır. Mühendislik güvenilirliğini sürdürmek için %19,7'lik deterministik bir Sermaye Harcaması (CapEx) primi gerektiğini göstererek, elde edilen bulgular tartışmayı olasılıksal "risk"ten yapısal "maliyet"e kaydırmaktadır. Bu "Adaptasyon Açığı", tezde üç temel perspektifte yorumlanmaktadır: (1) termodinamik riskin yanlış fiyatlandırılması, (2) altyapı değerlemesi üzerindeki doğrudan etkileri ve (3) yeni kamu politikalarına duyulan acil ihtiyaç.

5.1. Termodinamik Riskin Yanlış Fiyatlandırılması

Düşük Güç Kullanım Etkinliği (PUE) değerlerinin termodinamik arızayı engellemediği yönündeki temel bulgumuz, mevcut risk değerlendirme yaklaşımlarında kritik bir hatayı ortaya koymaktadır. Bu bulgu, iklim politikalarını yönlendiren üst düzey ekonomik modellerin varsayımlarıyla çelişmektedir. Bressan vd. (2024) ve Vogl vd. (2025) tarafından yapılan eleştirilerle uyumlu olarak, bu çalışmadan elde edilen bulgular, tesis düzeyinde ayrıntıdan yoksun olan Bütünleşik Değerlendirme Modellerinin (IAM'ler) kritik altyapıların doğrusal olmayan arıza noktalarını yakalamakta yetersiz olduğunu göstermektedir. Bu yetersizlik yalnızca fiziksel arızayla sınırlı değildir; güncel ekonometrik kanıtlar, sıcaklık şoklarının finansal sistem aracılığıyla yayılarak sistemik riski artırdığını ve bunun, üst düzey modellerin yakalayamadığı doğrusal olmayan bir finansal kanal olduğunu ortaya koymaktadır (Bellavite Pellegrini vd., 2026). Mevcut ESG çerçeveleri ise verimlilik metriklerine odaklanarak iklim maruziyetini, daha yüksek enerji faturalarıyla ilişkili bir İşletme Gideri (OpEx) sorunu olarak ele almaktadır. Analizimiz, bu görüşün tehlikeli derecede eksik olduğunu ortaya koymaktadır. Kritik altyapılar için ana tehdit, marjinal bir işletme gideri artışı değil, hizmet seviyesi ihlallerine ve zorunlu sermaye harcamalarına yol açan sermaye ekipmanının fonksiyon kaybıdır.

"Termodinamik Eşik", bir sermaye harcaması olayıdır. Bu eşik, bir tesisin, ne kadar verimli olursa olsun, artık mevcut olmayan bir iklim için tasarlandığı için

fiziksel olarak eskidiği noktayı işaret eder. Bu zafiyet, Charaf vd. (2025) ve Isazadeh vd. (2023) tarafından belgelendiği gibi, artan veri merkezi güç yoğunluklarının iç ısı yüklerini artırmasıyla daha da kötüleşmektedir. Bu nedenle, %19,7'lik prim yalnızca gelecekteki bir riski değil, aynı zamanda mevcut ve kayda geçirilmemiş bir yükümlülüğü temsil etmektedir. Bu, güncel olmayan iklim verilerine dayalı bir tasarım kusurunu düzeltmenin maliyetidir. Genellikle bir veri merkezinin toplam inşaat bütçesinin %15-20'sini oluşturan mekanik sistemler üzerindeki bu %19,7'lik prim, toplam proje maliyetinde %3-4'lük önemli bir artışa dönüşerek yatırım getirilerini doğrudan etkilemektedir (Marx, 2024). Bu gözlem, küresel dijital altyapının büyük bir bölümünün, kâğıt üzerinde "yeşil" görünmesine rağmen, beklenen finansal amortismanından çok önce gelecekteki iklim koşulları tarafından işlevsiz hale getirilerek fiziksel olarak "önceden karaya oturmuş" (pre-stranded) olduğunu göstermektedir.

Bu değerlendirme farkının sürmesinin birkaç sistemik nedeni bulunmaktadır. Birincisi, bilgi siloları, bileşen düzeyindeki fiziksel eşikleri anlayan mühendisler ile bu ayrıntıdan yoksun değerlendirme modelleri kullanan finansal analistler arasında yapısal bir kopukluk yaratmaktadır. İkincisi, kurumsal teşvikler yanlış hizalanmıştır; finansal piyasalar genellikle uzun vadeli sermaye harcaması dayanıklılığı yerine, PUE gibi metriklerle ödüllendirilen kısa vadeli İşletme Gideri verimliliğini önceliklendirmektedir. Son olarak, IAM'ler ve birçok ESG derecelendirme sistemi de dahil olmak üzere mevcut risk çerçevelerinin kendisi, ayrıntı eksikliği nedeniyle riskin somutlaştığı doğrusal olmayan, bileşen düzeyindeki arıza noktalarını yakalamakta yetersiz kalmaktadır. Ayrıca, hizmet içi performans düşüşü, adaptasyon açığını yeni sistemler için %19,7'den, mevcut sistemler için daha gerçekçi bir tahmin olan %28,7'ye yükseltmektedir. Bu kanıtlar, yeni bir sistem için yükümlülüğün %19,7 olmasına rağmen, yaşanan bir tesis için fiili, hesaba katılmamış yükümlülüğün muhtemelen %25-30 aralığında, yani önemli ölçüde daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Bu sistemik yanlış fiyatlandırma, karmaşık ve doğrusal olmayan Sermaye Harcaması tehditlerini görmezden gelerek yönetilebilir, doğrusal operasyonel metriklere odaklanan kurumsal ve davranışsal bir eğilim olan "Operasyonel Körlük"

olguyla sürdürülmektedir. Bu olgu, birbiriyle kesişen üç güç tarafından yönlendirilmektedir. Birincisi, PUE gibi kurumsal olarak yerleşmiş metriklere dayanan Yol Bağımlılığı (Path Dependency), operasyonel verimlilik üzerinde dar bir odaklanma yaratır. İkinci, bu durum, altyapı geliştiricilerinin başlangıç inşaat maliyetlerini minimize ederek uzun vadeli fiziksel yükümlülüğü gelecekteki sahiplere ve operatörlere devretmeye teşvik edildiği "Temsilci-Vekil Problemi" (Principal-Agent Problem) tarafından daha da kötüleştirilmektedir. Son olarak bu sorunlar, karar vericilerin doğrusal işletme gideri optimizasyonunun aşinalığını, uzun vadeli sermaye harcaması risklerini fiyatlandırmanın karmaşıklığına tercih etmesiyle Bilişsel Önyargılar (Cognitive Biases) tarafından pekiştirilir. Bu güçler bir araya gelerek, sistemik fiziksel risklerin ihmal edilmesini kurumsallaştıran ve kendini güçlendiren bir döngü yaratır. Bu dinamik, yakın zamanda Londra ve Teksas'taki büyük veri merkezlerinin, yüksek verimlilik derecelerine rağmen kesintiye uğramasıyla gözlemlenmiş ve İşletme Gideri odaklı metriklerin, Sermaye Harcaması dayanıklılığı için zayıf bir gösterge olduğunu kanıtlamıştır (Austin, 2022; Swinhoe, 2022)

5.2. Değerleme için Yeni Bir Taslak: Adaptasyon Açığının Entegrasyonu

Adaptasyon açığının nicelleştirilmesi, geleneksel altyapı değerlendirme prosedürlerine sorunsuz bir şekilde entegre edilebilecek, eyleme geçirilebilir ve fizik temelli bir metrik sunmaktadır. Bu tezde yapılan araştırma, fiziksel bir performans eşliğini belirli bir finansal yükümlülüğe dönüştürerek fizik tabanlı altyapı modellemesi çağrısını (Cai, 2025; Jenkins vd., 2023; Yang vd., 2020) iletirmektedir. Temel önerimiz, değerlendirme uzmanlarının ve yatırım analistlerinin yenileme maliyeti (RC) metodolojisini değiştirmeleridir. Mevcut yenileme maliyeti yaklaşımı, bir tesisi "modern bir eşdeğeri" ile değiştirme maliyetine göre değerlendirir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, "modern eşdeğer" kavramının kendisinin, tarihsel iklim verilerine dayanıyorsa eskimiş olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, yüksek ısınma senaryosuna dayalı bir prim hesaplamak, esaslı bir düzeltici önlemdir. Bu yöntem, kritik sistemler için yerleşik risk yönetimi ilkeleriyle (Gupta & Gregg, 2012; Sabzpoosh Saravi vd., 2024) ve yüksek emisyon senaryolarını dayanıklılık ölçütü olarak kullanan Birleşik Krallık İklim Projeksiyonları (UKCP) gibi düzenleyici çerçevelerle uyumludur (Arnell vd., 2021).

Bu fizik-öncelikli çerçevenin pratik üstünlüğü, geleneksel risk değerlendirme araçlarının ürettiği soyut çıktılarla keskin bir tezat oluşturan özgüllüğü ve eyleme geçirilebilirliğinde yatmaktadır. Tablo 13, geleneksel araçların finansal riskin somutlaştığı spesifik, doğrusal olmayan arıza noktalarını doğru bir şekilde fiyatlandırmada yetersiz olduğunu göstermektedir.

Metrik	Adaptasyon Açığı Çerçevesi	Tipik ESG Derecelendirme Aracı	Bütünleşik Değerlendirme Modeli
Çıktı	Deterministik bir finansal değer (ör. 10 M'lık bir varlıkta 1.97 M'lık yükümlülük).	Nitel bir skor veya sıralama (ör. "Yüksek Fiziksel Risk", "B" derecesi).	Toplulaştırılmış, bölgesel bir ekonomik kayıp (ör. 2050'ye kadar -X% GSYİH).
Ayrıntı Düzeyi	Bileşen düzeyi (fiziksel arıza noktası).	Şirket düzeyi (politika ve portföy maruziyeti).	Makroekonomik (ulusal veya küresel ölçek).
Eyleme Geçirilebilirlik	Doğrudan: Sermaye Harcaması bütçelemesi ni, varlık değerlemesini (Net Aktif Değer/İndirgenmiş Nakit Akımları) ve mühendislik tasarımını bilgilendirir.	Dolaylı/Belirsiz: Portföy taraması için sinyal; varlık düzeyinde sermaye tahsisini bilgilendirmez.	Politika Düzeyinde: Üst düzey politikaları (ör. karbon fiyatlandırması) bilgilendirir; varlık değerlemesi için eyleme geçirilemez.

Tablo 13. İklim Riski Değerlendirme Çerçevelerinin Karşılaştırılması

Tablo 13'te görüleceği üzere, geleneksel araçlar finansal riskin ortaya çıktığı belirli, doğrusal olmayan arıza noktalarını doğru şekilde fiyatlayamamaktadır. Çerçevemiz, soyut bir fiziksel riski kesin ve denetlenebilir bir Sermaye Harcaması yükümlülüğüne dönüştürmektedir. Bu nitelikselden niceliksel fiyatlamaya geçiş, gerçek tesislerin durağan olmayan iklim koşullarında doğru değerlendirilmesi için hayati önem taşımaktadır. Bu nedenle, çalışma sonucunda dört aşamalı iklim düzeltmeli değerlendirme metodolojisi önerilmektedir. Bu yaklaşım iki temel varsayıma dayanır: (1) standart yenileme maliyeti (RC), benzer ve aynı özellikteki ürünler için mevcut piyasa maliyetlerine dayanır ve (2) 'Fiziksel Prim' duruma bağlıdır. Temkinli

direnç planlaması için, yüksek etkili SSP5-8.5 senaryosundan elde edilen prim kullanılmaktadır. İlk olarak, İklim düzeltmeli yenileme maliyeti, mekanik, elektrik ve sıhhi tesisat (MEP) sistemleri için standart yenileme maliyeti (RC) hesaplanarak belirlenmelidir (Choupin vd., 2021; Hamdy vd., 2013). Ardından, bu standart yenileme maliyetine fiziksel prim (örneğin, +19,7%) uygulanmakta ve böylece dayanıklı, geleceğe hazır bir tesisin gerçek, iklime uyumlu maliyeti ortaya çıkarılmaktadır. İklim düzeltmeli yenileme maliyeti ile standart yenileme maliyeti arasındaki fark olarak tanımlanan adaptasyon açığı, ertelenmiş bir yükümlülük olarak tanımlar. Bu tutar, tesisin güncel değerinden düşülmesi gereken bir sermaye harcaması tutarı göstermektedir. Bu metodoloji, soyut bir fiziksel riski, değerlendirme raporu içinde belirli ve denetlenebilir bir kalem haline getirmektedir. Bu, standart değerlendirme prosedürlerine entegre edilmesi amaçlanan kavramsal bir çerçeve olarak sunulmaktadır. Ancak, yaygın benimsenmesi, finansal veya değerlendirme standart belirleyici kurumların düzenleyici rehberliğiyle kolaylaştırılabilecektir. Bu yaklaşım, iklim biliminin finansal özenle doğrudan entegre edilmesine pratik bir yöntem sağlamakta ve böylece kredi-değer oranı hesaplamaları ve sigorta değerlendirmeleri gibi alanları etkilemektedir (Cameron & Raman, 2005; Elnashai, 2002).

5.3. Daha Geniş Çıkarımlar: Özel Sorumluluktan Kamu Yetkisine

Bu değerlendirme çerçevesi özel sermaye için önemli bir araç olsa da adaptasyon açığının sistemik doğası, piyasa güçlerinin tek başına kritik altyapının dayanıklılığını sağlamak için yetersiz kaldığını göstermektedir. Dijital hizmetlerin sürekliliği, ekonomik ve sosyal istikrarın temel bir unsurudur. Mevcut mühendislik kodlarına göre inşa edilen varlıkların zaten "önceden kısıtlanmış" olması kabulü, bu standartların yeterliliğine karşı bir tez oluşturmaktadır,

Bu sorumluluğun kabulü, sermaye piyasaları üzerinde önemli etkiler yaratabilecektir. Tüm sektör genelinde adaptasyon açığının kabulü, altyapı varlıklarının sistemik bir yeniden değerlendirmesini tetikleyebilecek ve dayanıklı ile kırılgan portföyleri ayırt edebilecektir. Yüksek ısınma yaşayan bölgelerde, bu fiyatlandırılmamış sorumluluk, yetersiz standartlara göre inşa edilen yeni gelişmelerin iş kesintilerine karşı sigortalanamaz hale gelmesine ve dolayısıyla yatırım yapılamaz

olmasına neden olabilecektir (Gupta & Gregg, 2012; Sabzpoosh Saravi vd., 2024). Bu tür özel sermaye tarafından yönlendirilen piyasa bozulması, mevcut kamu standartlarının yetersizliğini ortaya koymaktadır. Bu ölçülebilir özel sorumluluğun varlığı, ulusal yapı kodları ve altyapı dayanıklılık standartlarıyla ilgili kamu politikalarının yeniden değerlendirilmesini gerektirmektedir. Ayrıca, düzenleyicilerin kritik altyapı varlıkları için adaptasyon açığının açıklanmasını talep etmeleri, yatırımcılara finansal raporlarda şu anda bulunmayan, karar verme açısından faydalı ve ileriye dönük bilgileri sunma konusunda güçlü bir gerekçe sağlamaktadır. Yöneticiler ve firma sahipleri için, bu öngörülebilir sorumluluğu ihmal etmek, yakında görev ihlali olarak kabul edilebileceği ve iklimle ilgili yasal ve düzenleyici risklerin yeni bir boyutunu ortaya çıkarabileceği düşünmemize neden olabilmektedir. Ancak, kamu açısından önümüzde, ulusal yapı kodlarının revize edilmesi, mühendislik tasarımı için bölgesel iklim projeksiyonlarının standart hale getirilmesi ve sektör direncinin aşılması gibi önemli uygulama zorlukları bulunmaktadır.

6. SONUÇ

Bu tez çalışması, fiziksel iklim riskini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan doğrusal ve verimlilik odaklı çerçevelerin kritik altyapılar için yetersiz olduğunu göstermektedir. Çalışmada yüksek doğrulukla iklim bilimi ile deterministik mühendislik ve maliyet modellemesini entegre edilerek, aşırı sıcaklıklardan kaynaklanan temel finansal tehdidin işletme gideri (OpEx) değil, sermaye harcaması (CapEx) niteliğinde olduğu ortaya konulmuştur. Yeni bir veri merkezinin hata toleransını sürdürmek, %19,7'lik (%95 Güven Aralığı: %16,5–%22,9) bir Adaptasyon Açığı primi gerektirmekte; bu oran eskiyen tesisler için %28,7'ye kadar yükselmektedir. Bu durum, yatırımcıların ve operatörlerin bilançolarında önemli ve fiyatlandırılmamış bir yükümlülüğü temsil etmektedir

Bu tezin temel teorik ve pratik katkısı, soyut fiziksel riskleri somut ve denetlenebilir bir Sermaye Harcaması yükümlülüğüne dönüştürmesidir. Bu yaklaşım, öngörülen planlamaları olasılık temelli risk değerlendirmesinden deterministik sınır analizine taşımakta ve iklim-düzeltilmeli değerlendirme için yeni bir standart oluşturulmasına yönelik bir yol haritası sunmaktadır.

Bu çalışmada, fizik-öncelikli bir çerçeve oluştururken, çeşitli sınırlılıkları bulunmaktadır.

- Birincisi, türetilen %19,7'lik prim, büyük ölçüde tek bir Tier III prototipine dayalı olarak, İstanbul'u temsil eden nemli subtropikal bir iklimdeki soğutmalı su mimarileri için geçerlidir; bu oranın, farklı iklimler ve teknolojiler için ek bir doğrulama yapılmadan genellenmesi gerekir.
- İkincisi, ampirik maliyet modelinin küresel genellenebilirliği, Türkiye dışındaki bölgesel verilerle yapılacak kalibrasyonlarla artırılmalıdır.
- Üçüncüsü, sayısal arıza eşikleri sabit bir Bilgi Teknolojileri (BT) yük profiline dayandığından, operasyonel yoğunluktaki değişiklikler bu sonuçları etkileyebilir ve daha fazla araştırma gerektirebilir.

- Son olarak, gelecekteki çalışmalar, "kullanım sırasındaki" performans düşüşünü daha yüksek doğrulukla simüle etmek için dinamik bozulma modellerini entegre etmelidir.

Bu araştırmanın nihai sonucu, iklim finansmanına yönelik kesin bir yönlendirme sunmaktadır: "Termodinamik Eşik" yönetilmesi gereken bir risk değil, fiyatlandırılması gereken fiziksel bir sınırdır. Bu sınırı kabul ederek, finansal topluluk, reaktif bir risk yönetiminden proaktif, fizik temelli ve ileriye dönük bir değerlendirme anlayışına geçiş yapabilir.



KAYNAKÇA

- Animah, I., & Shafiee, M. (2018). Condition assessment, remaining useful life prediction and life extension decision making for offshore oil and gas assets. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 53, 17-28. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.04.030>
- Arnell, N. W., Kay, A. L., Freeman, A., Rudd, A. C., & Lowe, J. A. (2021). Changing climate risk in the UK: A multi-sectoral analysis using policy-relevant indicators. *Climate Risk Management*, 31, 100265. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100265>
- Austin, F. (2022). Texas power grid under high demand as heatwave strains data centers. Retrieved November 24, 2025 from <https://www.fox7austin.com/news/texas-power-grid-winter-readiness>
- Aven, T. (2011). *Misconceptions of Risk*. Wiley. https://books.google.com/books?id=a_MB_wuTr-AC
- Aykut, S. C., d'Amico, E., Klenke, J., & Schenuit, F. (2020). The accountant, the admonisher, and the animator: Global climate governance in transition. Center for Sustainable Science Research Working Paper No. <https://doi.org/10.25592/css-wp-001>
- Bahlawan, H., Poganietz, W.-R., Spina, P. R., & Venturini, M. (2020). Cradle-to-gate life cycle assessment of energy systems for residential applications by accounting for scaling effects. *Applied Thermal Engineering*, 171, 115062. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115062>
- Baumann, C. T. (2014). Cost-to-Capacity method: Applications and considerations. *M&TS J*, 30(1), 49-56.
- Bellavite Pellegrini, C., Pellegrini, L., & Vismara, S. (2026). Climate change and systemic risk: Evidence from financial intermediaries. *Technological Forecasting and Social Change*, 222, 124408. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2025.124408>
- Bressan, G., Duranovic, A., Monasterolo, I., & Battiston, S. (2024). Asset-level assessment of climate physical risk matters for adaptation finance. *Nat Commun*, 15(1), 5371. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48820-1>
- Cai, Y. (2025). Modeling Uncertainty in Integrated Assessment Models. arXiv preprint arXiv:2511.00378. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.00378>
- Cameron, I. T., & Raman, R. (2005). *Process Systems Risk Management*. Academic Press. https://books.google.com/books?id=K_Jjr599zIMC
- Cappiello, L., Ferrucci, G., Maddaloni, A., & Veggente, V. (2025). From words to deeds—incorporating climate risks into sovereign credit ratings. European Central Bank (ECB). Retrieved November 24, 2025 from

- Carleton, T. A., & Hsiang, S. M. (2016). Social and economic impacts of climate. *Science*, 353(6304), aad9837. <https://doi.org/doi:10.1126/science.aad9837>
- Charaf, H., Maalouly, M., Chehade, A., Al Moussawi, H., Moussa, T., Polidori, G., & Maalouf, C. (2025). Passive hydraulic cooling: a CDU-free solution for data center efficiency. *Applied Thermal Engineering*, 280, 128116. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128116>
- Chen, B., & Chu, L. (2022). Decoupling the double jeopardy of climate risk and fiscal risk: A perspective of infrastructure investment. *Climate Risk Management*, 37, 100448. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100448>
- Choupin, O., Henriksen, M., Etemad-Shahidi, A., & Tomlinson, R. (2021). Breaking-Down and Parameterising Wave Energy Converter Costs Using the CapEx and Similitude Methods. *Energies*, 14(4), 902. <https://doi.org/10.3390/en14040902>
- Crawley, D., Lawrie, L., Winkelmann, F., Buhl, W., Pedersen, C., Strand, R., Liesen, R., Fisher, D., Witte, M., Henninger, R., Glazer, J., & Shirey, D. (2002). *EnergyPlus: New, Capable, and Linked (Vol. 21)*.
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J., & Glazer, J. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319-331. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(00)00114-6)
- Crawley, D. B., & Pederson, C. (2001). Software tools for building envelopes: EnergyPlus: New, capable and linked. *Conference Proceedings for ASTM, Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII: Integration of Building Envelopes*,
- Cui, H.-Z., Tong, B., Wang, T., Dou, J., & Ji, J. (2025). A hybrid data-driven approach for rainfall-induced landslide susceptibility mapping: Physically-based probabilistic model with convolutional neural network. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17(8), 4933-4951. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.08.005>
- Doumbia, C., Rousseau, A. N., Baraer, M., & Savary, S. (2026). Assessing climate change impact on glacier runoff in the Upper Yukon Watershed: A Comparative study of CMIP5 and CMIP6 projections. *Journal of Hydrology*, 664, 134398. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134398>
- Dunne, J. P., Stouffer, R. J., & John, J. G. (2013). Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming. *Nature Climate Change*, 3(6), 563-566. <https://doi.org/10.1038/nclimate1827>
- Elnashai, A. S. (2002). A very brief history of earthquake engineering with emphasis on developments in and from the British Isles. *Chaos, Solitons & Fractals*, 13(5), 967-972. [https://doi.org/10.1016/s0960-0779\(01\)00107-2](https://doi.org/10.1016/s0960-0779(01)00107-2)
- Fiedler, T., Pitman, A. J., Mackenzie, K., Wood, N., Jakob, C., & Perkins-Kirkpatrick, S. E. (2021). Business risk and the emergence of climate analytics. *Nature Climate Change*, 11(2), 87-94. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00984-6>

- Guitouni, A., Khorshidvand, B., Larimi, N. G., Boukhtouta, A., & Qasrawi, Y. (2025). Supply chain serviceability under climate change with application in the Arctic. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 139, 104591. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104591>
- Gupta, R., & Gregg, M. (2012). Using UK climate change projections to adapt existing English homes for a warming climate. *Building and Environment*, 55, 20-42. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.014>
- Hain, L. I., Kölbel, J. F., & Leippold, M. (2022). Let's get physical: Comparing metrics of physical climate risk. *Finance Research Letters*, 46, 102406. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2021.102406>
- Hamdy, M., Hasan, A., & Siren, K. (2013). A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010. *Energy and Buildings*, 56, 189-203. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.023>
- Hepburn, C., Ives, M. C., Loni, S., Mealy, P., Barbrook-Johnson, P., Farmer, J. D., Stern, N., & Stiglitz, J. (2025). Economic models and frameworks to guide climate policy. *Oxford Review of Economic Policy*. <https://doi.org/10.1093/oxrep/graf020>
- Hirko, D. B., Du Plessis, J. A., & Bosman, A. (2025). Using machine learning and satellite data to analyse climate change in the Upper Awash Sub-basin, Ethiopia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 141, 104137. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.104137>
- Huynh, D., & Ierapetritou, M. (2024). Biorefinery superstructure optimization under carbon pricing policies using stochastic programming. *Applied Energy*, 376, 124283. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124283>
- Initiative, C. D. (2025). Global Data Centre Physical Climate Risk and Adaptation Report. <https://xdi.systems>
- Institute, U. (2021). Tier Standard: Topology. Retrieved November 24, 2025 from <https://uptimeinstitute.com/tiers>
- Isazadeh, A., Ziviani, D., & Claridge, D. E. (2023). Thermal management in legacy air-cooled data centers: An overview and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 113707. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113707>
- Jenkins, L. T., Creed, M. J., Tarbali, K., Muthusamy, M., Trogrlić, R. Š., Phillips, J. C., Watson, C. S., Sinclair, H. D., Galasso, C., & McCloskey, J. (2023). Physics-based simulations of multiple natural hazards for risk-sensitive planning and decision making in expanding urban regions. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 84, 103338. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103338>
- Liu, X., & Wang, Y. (2023). Probabilistic hazard analysis of rainfall-induced landslides at a specific slope considering rainfall uncertainty and soil spatial variability. *Computers and Geotechnics*, 162, 105706. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105706>

Liu, Y., Cai, W., Lin, X., Li, Z., & Zhang, Y. (2023). Nonlinear El Nino impacts on the global economy under climate change. *Nat Commun*, 14(1), 5887. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41551-9>

Magoua, J. J., Wang, F., & Li, N. (2022). High level architecture-based framework for modeling interdependent critical infrastructure systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 118, 102529. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2022.102529>

Marín, O. A., Kraslawski, A., & Cisternas, L. A. (2022). Estimating processing cost for the recovery of valuable elements from mine tailings using dimensional analysis. *Minerals Engineering*, 184, 107629. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107629>

Marx, G. (2024). Cost of Data Center. BlueCap Economic Advisors. Retrieved November 24, 2025 from <https://www.bluecapeconomicadvisors.com/post/cost-of-datacenter#:~:text=When%20considering%20data%20centers%2C%20which,of%20the%20overall%20construction%20budget>

Moe, S. J., Brix, K. V., Landis, W. G., Stauber, J. L., Carriger, J. F., Hader, J. D., Kunimitsu, T., Mentzel, S., Nathan, R., Noyes, P. D., Oldenkamp, R., Rohr, J. R., van den Brink, P. J., Verheyen, J., & Benestad, R. E. (2023). Integrating climate model projections into environmental risk assessment: A probabilistic modeling approach. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 20(2), 367-383. <https://doi.org/10.1002/ieam.4879>

Mondal, S. K., Huang, J., Wang, Y., Su, B., Kundzewicz, Z. W., Jiang, S., Zhai, J., Chen, Z., Jing, C., & Jiang, T. (2022). Changes in extreme precipitation across South Asia for each 0.5 °C of warming from 1.5 °C to 3.0°C above pre-industrial levels. *Atmospheric Research*, 266, 105961. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105961>

Pecht, M., & Jaai, R. (2010). A prognostics and health management roadmap for information and electronics-rich systems. *Microelectronics Reliability*, 50(3), 317-323. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2010.01.006>

Pradhan, A. M. S., Ghimire, P., Shrestha, S., Lee, J.-S., Lee, J.-H., & Park, H.-J. (2025). Extreme gradient boosting with Shapley Additive Explanations for landslide susceptibility at slope unit and hydrological response unit scales. *Geoscience Frontiers*, 16(4), 102081. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsf.2025.102081>

Ramboll. (2025). Safeguarding Data Centers in an Era of Climate Risk. <https://www.ramboll.com>

Rathnayaka, B., Robert, D., Adikariwattage, V., Siriwardana, C., Meegahapola, L., Setunge, S., & Amaratunga, D. (2024). A unified framework for evaluating the resilience of critical infrastructure: Delphi survey approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 110, 104598. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104598>

Remer, L., Kleidman, R., Levy, R., Kaufman, Y., Tanré, D., Mattoo, S., Martins, V., Ichoku, C., Koren, I., Yu, H., & Holben, B. (2008). Global aerosol climatology from

MODIS satellite sensors. *Journal of Geophysical Research*, 113. <https://doi.org/10.1029/2007JD009661>

Ripple, W. J., Wolf, C., Gregg, J. W., Rockström, J., Mann, M. E., Oreskes, N., Lenton, T. M., Rahmstorf, S., Newsome, T. M., Xu, C., Svenning, J.-C., Pereira, C.

Rising, J. A., Taylor, C., Ives, M. C., & Ward, R. E. T. (2022). Challenges and innovations in the economic evaluation of the risks of climate change. *Ecological Economics*, 197, 107437. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107437>

Sabzpoosh Saravi, V., Kalantar, M., & Anvari-Moghaddam, A. (2024). A cooperative resilience-oriented planning framework for integrated distribution energy systems and multi-carrier energy microgrids considering energy trading. *Sustainable Cities and Society*, 100, 105039. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105039>

Shenkut, A., Alemayehu, G., Tesfaye, K., Getnet, M., Alemayehu, Y., & Mamo, G. (2025). Analysis of Observed and Projected Climate Change and Trends in Extreme Rainfall and Temperature in the Tana and North Gojjam Sub-basins, Upper Blue Nile Basin, Northwestern Ethiopia. *Environmental and Sustainability Indicators*, 28, 100904. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100904>

Swinhoe, D. (2022). Google's London data center outage during heatwave caused by simultaneous failure of multiple redundant cooling systems. Retrieved November 24, 2025 from <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/googles-london-data-center-outage-during-heatwave-caused-by-simultaneous-failure-of-multiple-redundant-cooling-systems/>

System, B. o. G. o. t. F. R. (2026). Dodd-Frank Act Stress Tests 2026. Board of Governors of the Federal Reserve System. Retrieved November 24, 2025 from <https://www.federalreserve.gov/supervisionreg/dfa-stress-tests-2026.htm>

Vogl, M., Kojić, M., & Schlüter, S. (2025). Decrypting the triad of climate policies, macroeconomic interdependencies and quantitative modelling: A literature review on quantifying climate risks. *Regional Science Policy & Practice*, 17(11), 100229. <https://doi.org/10.1016/j.rspp.2025.100229>

Wu, S., Zhou, X., Reynolds, J., Yamazaki, D., Yin, J., & Li, X. (2024). Climate change and urban sprawl: Unveiling the escalating flood risks in river deltas with a deep dive into the GBM river delta. *Sci Total Environ*, 947, 174703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174703>

Xu, Y., Kohtz, S., Boakye, J., Gardoni, P., & Wang, P. (2023). Physics-informed machine learning for reliability and systems safety applications: State of the art and challenges. *Reliability Engineering & System Safety*, 230, 108900. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108900>

Yang, H., Dobbie, S., Ramirez-Villegas, J., Chen, B., Qiu, S., Ghosh, S., & Challinor, A. (2020). South India projected to be susceptible to high future groundnut failure rates for future climate change and geo-engineered scenarios. *Sci Total Environ*, 747, 141240. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141240>

Zio, E. (2009). Reliability engineering: Old problems and new challenges. Reliability Engineering & System Safety, 94(2), 125-141.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2008.06.002>

