

Mühendislikte Akademik Çalışmalar ve Yeni Vizyonlar

Editör: Prof. Dr. Aydın RÜŞEN



**MÜHENDİSLİKTE
AKADEMİK ÇALIŞMALAR VE
YENİ VİZYONLAR**

Editör

Prof. Dr. AYDIN RÜŞEN



Mühendislikte Akademik Çalışmalar ve Yeni Vizyonlar

Editör: Prof. Dr. AYDIN RÜŞEN

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek

Kapak ve Sayfa Tasarımı: Duvar DESIGN

Basım Tarihi: Mart 2026

Yayıncı Sertifika No: 49837

E-ISBN: 978-625-8756-14-2

© Duvar Yayınları

853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir

Tel: 0 232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com

duvarkitabevi@gmail.com

İÇİNDEKİLER

1. Bölüm	1
Yük hücreleri için OIML R60 Göre Yükleme Testlerinin İncelenmesi Bülent AYDEMİR	
2. Bölüm	20
Karadeniz, Ege ve Akdeniz Bölgesinde 2024 Yılında Meydana Gelen Deniz Kazalarının Risk Analizi Çalışması Serdar ŞİPAL, Hakan DİLİPAK	
3. Bölüm	63
AA6082-T6 Alüminyum Alaşımının Frezelemesinde Çoklu İşlem Parametrelerinin Titreşim, Üzerindeki Etkilerinin İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi Ahmet Murat PINAR, Ömer İLHAN	
4. Bölüm	78
Türkiye’de Yapı Sağlığı İzleme Sistemlerinin Bütüncül Değerlendirmesi: İleri Algılama Teknolojileri, Akıllı Hasar Tespit Algoritmaları ve Yaşam Döngüsü Yönetimi Nusret BOZKURT, Orhan DURAK	
5. Bölüm	104
Sürdürülebilir Gelecek: Akıllı Sistemler ve Yeşil Bina Teknolojileri Sinerjisi Nusret BOZKURT, Saffet SOYUGÜZEL	

1. Bölüm

Yük hücreleri için OIML R60 Göre Yükleme Testlerinin İncelenmesi

Bülent AYDEMİR¹

ÖZET

Yük hücresi veya diğer bilinen ismi ile loadcelllerin yasal metroloji alanında performans testleri OIML R60 dokümanında tanımlanan gerekliliklere göre gerçekleştirilir. OIML R60 dokümanı 3 farklı kısımdan oluşur ve oldukça detaylı olarak hazırlanmıştır. Yük hücresi üreticileri bir yük hücresinin performansını belirlemek veya daha da iyileştirmek istediğinde bu testlere ihtiyaç duyar. Ülkemizde bu alanda makale çalışmalarının olmadığı görülmüştür. Bu çalışma ile kullanıcılara OIML R60 dokümanına göre yükleme testleri, sürünme ve barometrik basınç testleri örneklerle açıklanarak bu alanda çalışma yapacak kişilere rehber bir çalışma olması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yük hücresi, Loadcell, OIML R60

¹ Prof.Dr., Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Müh. Böl., DÜBİT Laboratuvarı, Düzce, TÜRKİYE, bulentaydemir@duzce.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6848-2681

1. GİRİŞ

Yasal metroloji alanında kullanılan yük hücrelerinin performans testleri OIML R60 dokümanında tanımlanmıştır. OIML R60 dokümanı yük hücreleri veya loadcelller için yasal düzenlemeler kapsamındaki metrolojik ve teknik gereksinimleri, metrolojik kontroller ve performans testlerini ile rapor formatını tanımlayan bir yapıdadır. 2021 yılında yayınlanan güncel versiyonunda OIML R60-1, R60-2, R60-3 şeklinde 3 bölüme ayrılmıştır. Temel olarak OIML R60 dokümanı yasal metrolojik kontrole tabi cihazlarda veya sistemlerde kullanılan yük hücreleri için performans gereksinimlerini ve testlerini belirler. OIML R 60 kapsamındaki test prosedürleri, tüm yük hücrelerine olabildiğince geniş bir şekilde uygulanacak şekilde oluşturulmuştur. Bu prosedürler yalnızca yük hücrelerinin test edilmesi için tanımlanmıştır. Yük hücrelerini içeren komple sistemlerin test edilmesini bu dokümanın amacı değildir.

Yük hücrelerinin veya kuvvet ölçümlerinde kullanılan cihazların performans ölçümleri için ISO 376, ASTM E74 ve DKD R 3-3 dokümanları da kullanılmaktadır. Ancak bu dokümanlar kuvvet ölçümünde kullanılan sensörlerin kalibrasyonu ve izlenebilirliğinin sağlanmasını amaçlamıştır. OIML R60 dokümanı ise yasal metroloji alanında ölçümlerde kullanılan yük hücrelerinin performanslarının belirlenmesini amaçlar. Farklı amaçlar için kullanılan dokümanlarının birbiri ile örtüşmesi beklenmemelidir.

Bu çalışmada, OIML R60 dokümanına göre yük hücrelerine uygulanan yükleme testleri ele alınacaktır. Yük hücreleri için yükleme testleri OIML R60-2 dokümanına ve raporlama bilgileri ise OIML R60-3 dokümanına uygun şekilde açıklanmıştır. Bu çalışmada, yük hücreleri için yükleme testlerinin uygulanmasını kolaylaştırmak ve konuya açıklık getirebilmesi üzerine odaklanılmıştır.

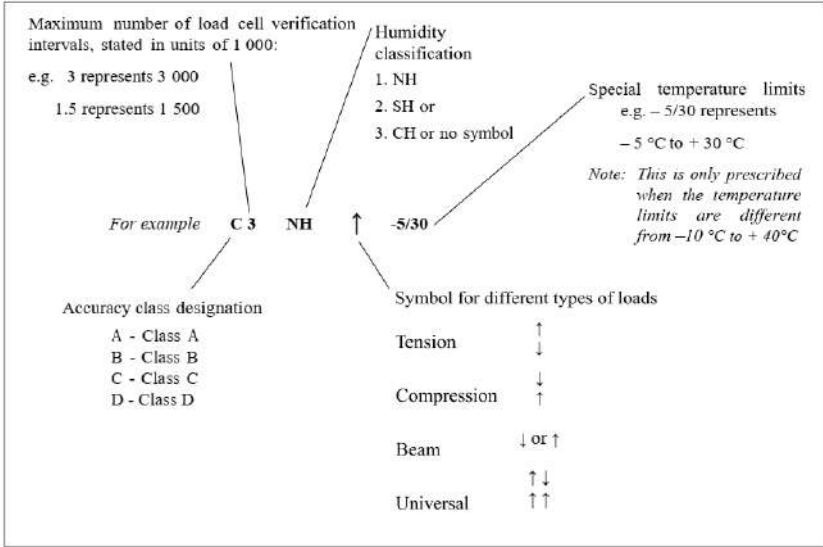
2. YÜK HÜCRELERİ TESTLERİNE YÖNELİK TANIMLAMALAR

Yasal metroloji alanında kullanılan yük hücrelerinin testlerini tanımlayan OIML R60 dokümanı uluslararası geçerli olan bir standarttır. Bu standart, yük hücrelerinin aşağıdaki performans testlerini ve test başarı kriterlerini tanımlar. Kriterler aşağıda sıralanmıştır.

- Ölçüm doğruluğu
- Tekrarlanabilirlik
- Sıcaklık değişimlerine karşı stabilite
- Sürünme (creep) davranışı
- Aşırı yük dayanımı
- Uzun süreli performans kararlılığı

OIML R60 sertifikası, yük hücrelerinin bu testlerden başarıyla geçtiğinin belgesi olarak kabul edilir.

Yük hücreleri, genel performans kapasitelerine göre A sınıfı, B sınıfı, C sınıfı ve D sınıfı olarak dört doğruluk sınıfından gruplandırılırlar.



Şekil 1. Yük hücresinin tam sınıflandırılma örneği

Yük hücreleri aşağıda tanımlanan 6 parametreye göre sınıflandırılırlar. Bunlar:

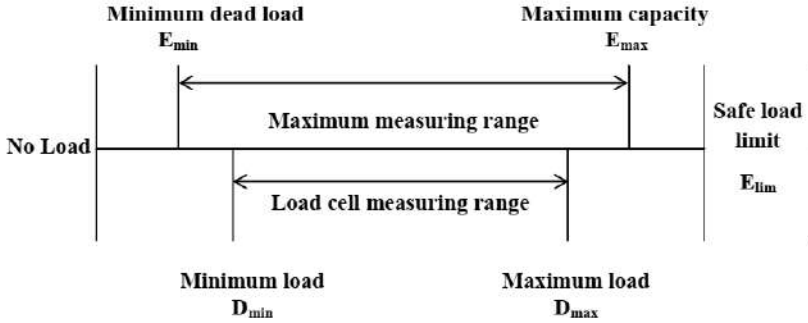
- doğruluk sınıfı tanımı
- yük hücresi doğrulama aralıklarının maksimum sayısı
- gerekirse, yükün uygulanma şekli
- uygulanabilirse, özel çalışma sıcaklığı sınırları
- uygulanabilirse, nem sembolü
- Şekil 1 de belirtilen ek karakterizasyon bilgileri

OIML R60 da yük hücreleri doğruluk seviyelerine göre sınıflandırmalarına verilebilecek en yaygın örnekler şunlardır:

- C2: Genel endüstriyel uygulamalar
- C3: Ticari ve endüstriyel tartım sistemleri (en yaygın kullanılan)
- C4: Yüksek hassasiyetli uygulamalar
- C5: Çok yüksek doğruluk gerektiren özel sistemler

Türkiye’de ticari kantar ve baskül uygulamalarında en sık kullanılan C3 sınıf yük hücreleridir.

Yük hücresi ölçüm kabiliyeti şekil 2 de verilen şekilde tanımlanır. Yük hücreleri için ölçüm aralığı ve maksimum ölçüm aralığı, güvenli yük limiti şekilde verilmiştir.



Şekil 2. Yük hücresi ölçüm kabiliyetinin tanımlamaları

Yük hücrelerinin tip değerlendirmesi için hata limitleri Tablo 1’de verilmiştir. Tip değerlendirmesinde kullanılan MPE maksimum müsaade edilen hata (maximum permissible error) Tablo 1 in sol sütununda yer alan ifadeler kullanılarak elde edilen değerler olmalıdır. Paylaştırma faktörü p_{LC} , üretici tarafından seçilecek ve beyan edilecek (0,7’den farklıysa) ve 0,3 ile 0,8 aralığında veya bu değerlere eşit olmalıdır. Genel olarak 0,7 olarak kullanılır. Tablo 1 de verilen "m", uygulanan yük tarafından oluşturulan kuvveti temsil eden (kütle cinsinden ifade edilen) değerdir. “v” ifadesi ise yük hücresinin doğruluk sınıflandırması testinde kullanılan ve kütle birimi cinsinden ifade edilen, yük hücresi doğrulama aralığıdır.

Tablo 1. Yük hücresi tip değerlendirmesindeki MPE değerleri

MPE (+/-)	Load, m			
	Class A	Class B	Class C	Class D
$p_{LC} \times 0.5 v$	$0 \leq m \leq 50\,000 v$	$0 \leq m \leq 5\,000 v$	$0 \leq m \leq 500 v$	$0 \leq m \leq 50 v$
$p_{LC} \times 1.0 v$	$50\,000 v < m \leq 200\,000 v$	$5\,000 v < m \leq 20\,000 v$	$500 v < m \leq 2\,000 v$	$50 v < m \leq 200 v$
$p_{LC} \times 1.5 v$	$200\,000 v < m$	$20\,000 v < m \leq 100\,000 v$	$2\,000 v < m \leq 10\,000 v$	$200 v < m \leq 1\,000 v$

Yük hücrelerinin tip değerlendirme testlerine yönelik test prosedürleri OIML R60-2 ve test raporu formatı ise OIML R 60-3 dokümanında verilmiştir.

OIML R60 ta tanımlanan testlerin her biri “bağımsız” birer test olarak sunulmuştur. Bununla birlikte, yük hücresi testlerinin verimli bir şekilde yürütülmesi için, artan ve azalan yük, sürünme, tekrarlanabilirlik ve minimum ölü yük çıkışı geri dönüş testlerinin, bir sonraki test sıcaklığına geçmeden önce verilen test sıcaklığında eş zamanlı olarak yapılması tanımlanmıştır. Barometrik basınç ve nem testleri, yukarıdaki testlerin tamamlanmasının ardından ayrı ayrı yapılır.

Farklı doğruluk sınıfları için işlemler A ve B doğruluk sınıfları için dört kez veya C ve D doğruluk sınıfları için ise iki kez tekrarlanması gerektiği tanımlanmıştır.

OIML R60 testlerini gerçekleştirmede kullanılacak cihaz izlenebilirliği olan ve istenen sıcaklık değerlerinde testleri gerçekleştirebilen cihazlar veya sistemler olmalıdır. Testler sırasında yük hücresi çıkışını gözlemlemek için kullanılan kuvvet üreten sistem ve gösterge cihazının kombinasyonu için genişletilmiş belirsizlik, U (kapsama faktörü $k = 2$, %95 güven aralığı için) değeri, test edilen yük hücresinin maksimum müsaade edilen hatasının (MPE) 1/3 katından daha düşük belirsizliğe sahip olmalıdır

3. OIML R60 GÖRE YÜKLEME TESTLERİ

OIML R60 dokümanına göre yük hücrelerine uygulanacak yük yükleme testlerinin uygulama yöntemleri ve detayları aşağıda verilmiştir.

3.1 İlk Yükleme Testi (Initial 20 °C Test)

Test edilecek yük hücresi uygun kapasiteli kuvvet kalibrasyon makinasına uygun bağlantı aparatları kullanılarak montajı yapılır. Bu test için istenen sıcaklık değeri olan 20 °C, ya laboratuvar ortam şartlarının bu sıcaklığa ayarlanması ile yada yük hücresinin bir kabinin içine yerleştirilmesi ile kabin sıcaklığının bu değere ayarlanmaması ile sağlanır. Sıcaklık kararlılığı için, yük hücresinin üreticisinin önerileri doğrultusunda yeterli süre beklenir.

Her yük adımının yükleme ve stabilizasyon süresinin toplamı, OIML R60 dokümanına göre mümkün olduğunca aşağıdaki tablo 2 de verilen değerlere uygun olmalıdır.

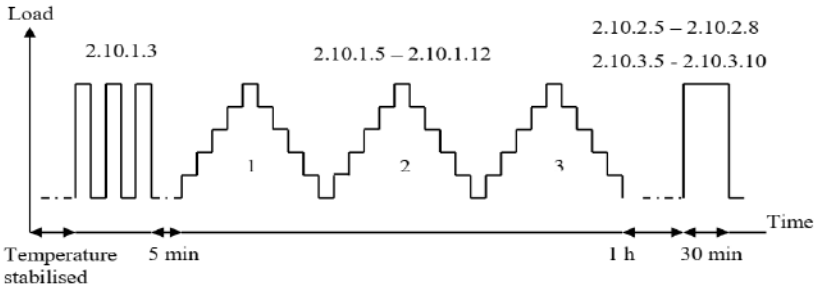
Tablo 2. Yük değişimine göre yükleme ve stabilizasyon süresi için müsaade edilen süreler

Yük değişimi	Yükleme ve stabilizasyon süresinin toplamı için müsaade edilen süre		
	Sınıf C ve D	Sınıf B	Sınıf A
0-10 kg arası	10 saniye	15 saniye	20 saniye
10-100 kg arası	20 saniye	30 saniye	40 saniye
100-1000 kg arası	30 saniye	45 saniye	60 saniye
1000-10000 kg arası	40 saniye	60 saniye	80 saniye
10000-100000 kg	50 saniye	75 saniye	100 saniye
100000 kg'den büyük	60 saniye	90 saniye	120 saniye

Eğer tablo 1 de belirtilen süreler uyuşması mümkün değilse, ölçüm alınmadan önce yükleme süresi kadar beklenmesi önerilir.

Test numunesi, 20 °C ($\pm 2^\circ\text{C}$) sıcaklıkta stabilize olduktan sonra, üç kez maksimum kapasitede önyükleme uygulanır. Yükleme testine yani 1. Seriyeye başlamadan önce 5 dakika beklenir. Ardından, belirlenen yük adımlarıyla art arda üç kez artan ve azalan yükleme testi gerçekleştirilir. Yük-Zaman grafiği şekilde gösterimi şekil 3 de verilmiştir.

Yükleme testinin ardından sürünme testi uygulanacaksa, teste başlamadan önce 1 saat beklenmelidir. Bekleme süresinin tamamlanmasının ardından ön yükleme yapılmadan doğrudan sürünme testine geçilmelidir.



Şekil.3. Yük-zaman grafiği olarak yükleme ve sürünme testi serilerinin gösterimi

3.2 40 °C Yükleme Testi

Test numunesinin bulunduğu kabin, 40 °C'ye ayarlanarak sıcaklık stabilizasyon süresi boyunca beklenir. Numune, 40 °C ($\pm 2^\circ\text{C}$) sıcaklıkta stabilize olduktan sonra, üç kez maksimum kapasitede önyükleme uygulanır. Önyükleme işlemi tamamlandıktan sonra, 5 dakika beklenerek yükleme testlerine geçilir. Yükleme testlerinde, ilk (Initial) 20 °C testindeki yükleme ve bekleme süreleri

esas alınır. Testlerin ardından 1 saat beklenerek, 40 °C'de sürünme testi gerçekleştirilir.

3.3 (-10)°C Yükleme Testi

Test numunesinin bulunduğu kabin, -10°C'ye ayarlanarak sıcaklık stabilizasyon süresi boyunca beklenir. Numune, -10°C ($\pm 3^\circ\text{C}$) sıcaklıkta stabilize olduktan sonra, üç kez maksimum kapasitede önyüklemeye uygulanır. Önyüklemeye işlemi tamamlandıktan sonra, 5 dakika beklenerek yükleme testlerine geçilir. Yükleme testlerinde, ilk (initial) 20°C testindeki yükleme ve bekleme süreleri esas alınır. Testlerin ardından 1 saat beklenerek, -10°C'de sürünme testi gerçekleştirilir.

3.4 Son Yükleme Testi (Tend 20 °C Test)

Test numunesinin bulunduğu kabin, yeniden 20 °C'ye ayarlanarak sıcaklık stabilizasyon süresi boyunca beklenir. Numune, 20 °C ($\pm 2^\circ\text{C}$) sıcaklıkta stabilize olduktan sonra, üç kez maksimum kapasitede önyüklemeye uygulanır. Önyüklemeye işlemi tamamlandıktan sonra, 5 dakika beklenerek yükleme testlerine geçilir. Yükleme testlerinde, ilk (initial) 20 °C testindeki yükleme ve bekleme süreleri esas alınır. Bu testten sonra sürünme testi gerçekleştirilmez.

3.5 Ek Sıcaklık Testi

Yukarıda belirtilen test adımları, standart sıcaklık değerleri haricinde istenen diğer tüm sıcaklıklar için tekrarlanabilir. Ancak genel olarak yukarıdaki sıcaklıklar yeterli olur.

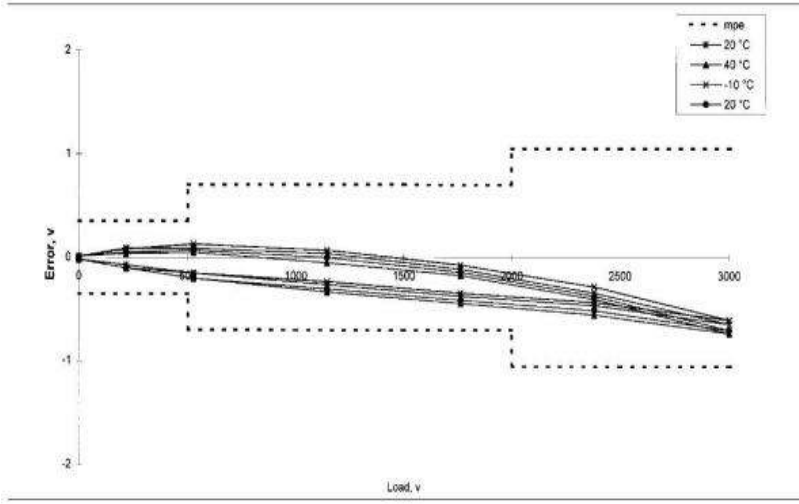
Tüm sıcaklık testleri dataları OIML R60-3 verilen formatta raporlanması istenir. Rapor formatı şekil 4 de verilmiştir. Ayrıca dataları kullanarak grafik oluşturulması istenir. Her bir sıcaklık değeri için hata zarfı grafinin oluşturulması istenir. Şekil 5 te örnek hata zarfı grafiği verilmiştir. Bu grafikte ilk 20° C, 40°C, -10°C ve son 20°C datalarına göre yük hata noktaları artan azalan yönlü olarak birleştirilir. Bu birleştirilen noktaların grafikte kesik çizgilerle gösterilen müsaade edilen hata değeri çizgisi ile kesişmemesi istenir. Herhangi bir kesişme istenmeyen bir durum olarak ifade edilir.

Application no : _____			
Load cell model: _____			
Serial no. : _____			
Zmax: _____			
MLC: _____			
Ymin: _____			
PLC: _____ DR: _____			
Force-generating system: _____			
Indicating instrument: _____			
Evaluator: _____			

	At start	At end	
Date:			°C
Temperature:			°C
Relative humidity:			%
Barometric pressure:			kPa
Indicator temperature:			°C
Electronics power voltage (when applicable): _____ V			

Test load (units)	Run no. 1		Run no. 2		Run no. 3		Average indication (counts)	Repeatability error (counts)
	Indication (counts)	Time (hh mm ss)	Indication (counts)	Time (hh mm ss)	Indication (counts)	Time (hh mm ss)		
0								
0								
0								
0								
0							*	

Şekil 4. Sıcaklık yüklem testi raporlama formatı



Şekil 5. Farklı sıcaklık sonuçlarının hata grafiği olarak örnek gösterimi

3.6 Yükleme Testi Hesaplamaları

Yük hücrelerinin tip değerlendirmesi için test ve değerlendirmesinde, çeşitli laboratuvarlar tarafından kullanılan test cihazlarının ve uygulamalarının farklı olabileceği rehber doküman tarafından kabul edilmektedir. OIML R 60, bazı farklılıklara izin verir ve yine de verileri inceleyen konuyu bilen taraflarca kolayca anlaşılacak bir test, kayıt ve sonuç hesaplama yöntemi sağlamayı amaçlamıştır.

Bu karşılaştırılabilirlik kolaylığını sağlamak için, testleri yapan kişilerin veri kaydı ve sonuç hesaplama için ortak bir sistem kullanmaları gereklidir.

Her test sıcaklığı için ilgili tablo doldurulmalı, ortalamaları hesaplanmalıdır. Aşağıdaki formüller yardımı ile gerekli değerlerinde hesaplanmaları yapılmalıdır.

$$DR = (E_{\max} - E_{\min}) \times C_{DR} / n_{LC} \quad (1)$$

Burada,

DR: minimum ölü yük çıkış geri dönüşü, kütle birimleri (g, kg, t) cinsinden ifade edilir.

E_{max}: yük hücresinin maksimum kapasitesi

E_{min}: yük hücresinin minimum kapasitesi

C_{DR} : minimum ölü yük çıkış geri dönüşü, v birimi cinsinden ifade edilir.

n_{LC} :yük hücresi doğrulama aralıklarının maksimum sayısı

$$E_L = (\text{ort. test gösterge değeri} - \text{referans gösterge değeri}) / f \quad (2)$$

$$E_R = (\text{maks. gösterge değeri} - \text{min. gösterge değeri}) / f \quad (3)$$

Burada,

E_L yük hücresi hatası, v cinsinden ifade edilir.

E_R tekrarlanabilirlik hatası, v cinsinden ifade edilir.

$$f = [0,75 \text{ ort. gösterge değeri} \cdot (D_{\max} - D_{\min}) - D_{\min} \text{ gösterge değeri}] / 0,75 \cdot n \quad (4)$$

Burada,

f: dönüştürme faktörü

D_{max}: maksimum test yükü

D_{min}: minimum test yükü

n: Yük hücresi ölçüm aralığının yük hücresi doğrulama aralıklarının sayısına bölümü

Tüm gösterge değerlerini "v"ye dönüştürmek için kullanılan dönüştürme faktörü f, yük hücresi doğrulama aralığı v başına gösterge değeri sayısı belirlenmelidir. Bu faktör, başlangıçtaki 20 °C nominal test sıcaklığında artan yük testlerinin test verisi ortalamalarından belirlenir.

Artan yük test çalışmalarındaki ortalama gösterge ile D_{max} ve D_{min} arasındaki farkın %75'i arasındaki fark hesaplanır ve D_{min}'deki gösterge değerini alınır. Sonuç (beş anlamlı rakama kadar) o yük için doğrulama aralıklarının sayısına (%75'i n) bölerek dönüştürme faktörü f hesaplanır.

$$R_i = [(test \text{ yükü} - D_{\min}) / (D_{\max} - D_{\min})] \times n \times f \quad (5)$$

R_i : Referans gösterge değeri (net test yükü), gösterge değeri birimleri cinsinden ifade edilir;

D_{max}: maksimum test yükü

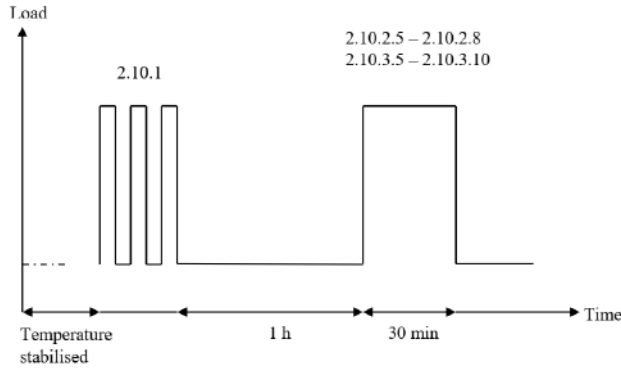
D_{min}: minimum test yükü

n: Yük hücresi ölçüm aralığının yük hücresi doğrulama aralıklarının sayısına bölümü

f: dönüştürme faktörüdür.

3.7 Sürünme Testi

Sürünme testinden önce yükleme testi yapılmışsa, sürünme testine başlamadan önce 1 saat beklenmesi gerekmektedir. Bekleme süresi tamamlandıktan sonra, ön yükleme uygulanmamalıdır (Şekil 4). Eğer sürünme testinden önce herhangi bir yükleme testi yapılmamışsa, önce üç kez ön yükleme uygulanır. Ardından, 1 saat beklenerek sürünme testine başlanır. Bu durum Şekil 5 te gösterilmiştir. Yük hücresinin sıfır değeri kaydedildikten sonra, maksimum yük uygulanır ve bu değer kararlı olması beklenir ve sonra yük hücresi çıkış değerleri kaydedilir. Test sırasında, 30 dakika boyunca belirli aralıklarla yük hücresinin maksimum yükteki çıkış değerleri kaydedilir. Özellikle 20. dakikadaki değer atlanmamalıdır. Testin sonunda, yük kaldırıldıktan sonra (yüksüz ya da D_{min} durumunda) yük hücresinin çıkış değerleri 1 dakika aralıklarla kaydedilir. Yüksüz konum için 3 değer yeterlidir.



Şekil.6. Yük-zaman grafiği olarak sürünme testi

Sürünme testleri dataları OIML R60-3 verilen formatta raporlanması istenir. Rapor formatı şekil 7 de verilmiştir.

6.8 Creep (Cc) and DR (C_{DR})

R 60-1, 5.5.1, 5.5.2

R 60-2, 2.10.2, 2.10.3. Complete one sheet for each test temperature.

Application no.: _____
 Load cell model: _____
 Serial no.: _____
 E_{aux}: _____
 n_{L.C.}: _____
 v_{min}: _____
 p_{L.C.}: _____ DR: _____
 Force-generating system: _____
 Indicating instrument: _____
 Evaluator: _____

	At start	At end	
Date:			
Temperature:			°C
Relative humidity:			%
Barometric pressure:			kPa
Indicator temperature:			°C

Conversion factor, *f*: _____

Table 6.8

Creep							DR						
Test load	Original		Barom. Press	Change of		mpc	Test load	Original		Barom. Press	Change of		mpc
	Indication	Time		Indication	Time			Indication	Time				
	counts	hh:mm:ss	kPa	v	mm:ss	v		counts	hh:mm:ss	kPa	v	mm:ss	v
D _{aux}													
D _{aux}													
(*)							D _{aux}						
D _{aux}													

DR (γ):	<input type="text"/>	30 minute creep: PASS: <input type="checkbox"/> FAIL: <input type="checkbox"/>
actual time (s):	<input type="text"/>	20 – 30 minute creep difference (< 0.15*MPE): PASS: <input type="checkbox"/> FAIL: <input type="checkbox"/>
specified time (s):	<input type="text"/>	DR < 0.5 γ: PASS: <input type="checkbox"/> FAIL: <input type="checkbox"/>
MPE for DR (γ):	<input type="text"/>	DR within manuf. Specified DR requirements: PASS: <input type="checkbox"/> FAIL: <input type="checkbox"/>

- Notes: 1) Change (γ) for creep: the observed indication minus the initial "load" indication (**) divided by the conversion factor, *f*.
 2) Determine the difference between the reading obtained at 20 minutes and the reading obtained at 30 minutes (see 5.5.1).
 3) Change (γ) for DR: the initial indication (***) minus the initial "no load" indication (*) divided by the conversion factor, *f*.
 4) Absolute (not relative) time shall be recorded.

Şekil.7. Sürünme testi rapor formatı

3.8 Sürünme Testi Hesaplamaları

Sürünme testi hesaplamalarında aşağıdaki formüller kullanılarak gerekli hata değerleri belirlenir.

$$Cc = (\text{Gösterge değeri} - \text{Başlangıç gösterge değeri}) / f \quad (6)$$

Burada,

Cc: Sürünme büyüklüğü, v cinsinden ifade edilen

f: dönüştürme faktörü

$$C_c(30-20) = (30. \text{ dakika gösterge değeri} - 20. \text{ dakika gösterge değeri}) / f \quad (7)$$

Burada,

C_c(30-20): 30. dakika gösterge değeri ile 20. dakika gösterge değeri arasındaki fark sürünme büyüklüğü, v cinsinden ifade edilen

f: dönüştürme faktörü

$$C_{DR} = (\text{minimum test yükü gösterge değeri2} - \text{minimum test yükü gösterge değeri1}) / f \quad (8)$$

Burada,

C_{DR}: minimum ölü yük çıkış değeri, v cinsinden ifade edilen

f: dönüştürme faktörü

$$C_m = (T2 \text{ sıcaklığındaki ortalama gösterge değeri} - T1 \text{ sıcaklığındaki ortalama gösterge değeri}) / f \quad (9)$$

Burada,

C_m: minimum test yükündeki sıcaklık etkisi değeri, v cinsinden ifade edilen

f: dönüştürme faktörü

3.9 Barometrik Basınç Testleri

OIMR R60 dokümanı gerekliliği olarak, yük hücresinin gösterge değeri, 95 kPa ile 105 kPa arasındaki basınç aralığında, 1 kPa basınç değişimi altında kaldığında 1 “v” değerinde daha fazla bir değişim göstermemelidir. Bu test için, yük hücresi üzerinde hava basıncını gösterebilen basınç ölçere sahip barometrik hava geçirmeyen bir kabin veya bir kapalı sistem içine yerleştirilir. Barometrenin göstergesinin dışarıdan görülebilir bir konumda olmasına dikkat edilmelidir. Test için yük hücresi, gösterge elemanına bağlanır ve gösterge elemanı çalıştırılır. Isınma süresi tamamlandıktan sonra, önce atmosfer basıncında gösterge değeri kaydedilir. Ardından, kabin içindeki basıncın en az 1 kPa kadar artırılması veya azaltılması sağlanır. Basınç değişimi sırasında, gösterge değeri ve basınç değeri kaydedilir. Farklı basınç değerlerinde en az 3 gösterge değeri kaydedilir. Bu değerler karşılaştırılarak, 1 kPa basınç değişimindeki gösterge değeri üzerindeki basınç etkisi hesaplanır. Hesaplama için aşağıdaki formül kullanılır.

$$C_p = (P_2 \text{ basıncındaki gösterge değeri} - P_1 \text{ basıncındaki gösterge değeri}) / f \quad (12)$$

Burada,

C_p : barometrik basınç etkisi değeri, v cinsinden ifade edilen

f: dönüştürme faktörü

4. OIML R60 GÖRE YÜK HÜCRESİ TESTLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

OIML R60 dokümanına göre yük hücresi için testlerin yapılabilmesi için yük hücresi üreticisinin bu testleri yaptırmak için başvuru yapması gereklidir. Üretici ürettiği yük hücresinin OIML R60 dokümanında belirtilen zorunlu bilgileri içeren bir başvuru dokümanı hazırlaması gereklidir. Sonrasında başvuruya uygun olarak kuvvet uygulama cihazı belirlenerek yük hücresinin kuvvet cihazına montajı için gerekli bağlantı parçalarının hazırlanması gereklidir. Yük hücresinin montajı uygun şekilde yapıldıktan sonra yükleme ve sürünme testleri aynı sistem üzerinde gerçekleştirilebilir. OIML R60 testleri için genellikle kuvvet kalibrasyon makinaları kullanılır. Bu cihazlara genellikle -10°C , 20°C ve 40°C sıcaklıkları sağlayacak şekilde yük hücresinin içine yerleştirilebileceği kabinler monte edilir. Şekil 7 de böyle bir makina görülmektedir. Kuvvet makinasının üst kısmında içine yük hücresi yerleştirilebilen kapağı açık bir ısıtma ve soğutma kabini görülmektedir. Bunların dışında genellikle 50 kg veya daha düşük kapasiteli yük hücrelerinin yükleme testleri için kalibreli kütle setleri kullanılır. Bu durumda yük hücresi büyük soğutma kabinlerinin içine konumlandırılıp operatör kabin içine girerek el yardımı ile yükleme testlerini kabin içinde gerçekleştirebilir.

Yük hücresinin yükleme sistemine montajı yapıldıktan sonra uygun yükleme adımları belirlenir. Genel olarak 5 yük adımda maksimum kapasiteye çıkılması hedeflenir. Öncelikle yük hücresi 20°C sıcaklığa gelmesi sağlanır sonra Şekil 3 te verilen şekilde 3 ön yükleme ve 3 artan azalan seri olarak yükleme işlemleri gerçekleştirilir. Elde edilen datalar Şekil 8 de verilen şekilde ilgili tabloya kaydedilir. Alınan 3 seri artan azalan seri değerlerinin ortalaması bulunur. Ortalama değerlerden ilk sıfır değerindeki gösterge değeri yük adımlarındaki değerlerden çıkartılarak düzeltilmiş ortalama değerler elde edilir. Tekrarlanabilirlik hatası değerleri ise 1., 2., ve 3. Serideki maksimum değerler ile minimum değerler arasındaki farktan hesaplanır. Son olarak “v” birimde ifade edilen hata değerine karşılık yük adımları grafiği oluşturulur. Bu grafikte hata değerlerinin noktalarının birleştirilmesi ile oluşturulan yükleme boşaltma eğrisinin, müsaade edilen hata değerleri çizgilerinin hep içinde kalması istenir. Eğer müsaade edilen hata çizgilerini herhangi bir noktada geçmesi durumu

oluşursa yük hücresi istenen performans sınıfını sağlayamadığı belirlenir ve yük hücresinin başarısız olduğu grafikten görülür.



Şekil 7. Sıcaklık kabinli kuvvet kalibrasyon makinası

İlk 20 °C testinden sonra kabin +40 °C ayarlanır ve yük hücresinin o sıcaklığa gelmesi için yeterli süre beklenir. Sonra aynı yükleme işlemleri yapılır ve datalar kaydedilir. Bu sıcaklıktaki hata grafiği çizilerek müsaade edilen hata sınırlarının içinde sonuçlar elde edilip edilmediğine bakılır.

Sonra kabin -10 °C ayarlanır ve yük hücresinin o sıcaklığa gelmesi için yeterli süre beklenir. Sonra aynı yükleme işlemleri uygulanır ve datalar kaydedilir. Bu

sıcaklıktaki hata grafiği çizilerek müsaade edilen hata sınırlarının içinde sonuçlar elde edilip edilmediğine bakılır.

En son olarak kabin tekrar 20 °C ayarlanır ve yük hücresinin o sıcaklığa gelmesi için yeterli süre beklenir. Sonra aynı yükleme işlemleri yapılır ve datalar kaydedilir. Bu sıcaklıktaki hata grafiği çizilerek müsaade edilen hata sınırlarının içinde sonuçlar elde edilip edilmediğine bakılır. Şekil 5 te verilen şekilde tüm sıcaklık değerleri için hata grafikleri tek bir grafikte gösterilerek yük hücresinin müsaade edilen hata değerleri içinde kaldığı raporlanır.

Sürünme testleri her sıcaklık değerinde 3 yükleme boşatma serisi sonrası 1 saat beklendikten sonra yük hücresinin maksimum yükte yüklenmesi ile yapılır. Maksimum yük uygulandıktan sonra 30 dakika boyunca yük hücresi gösterge değerı kaydedilir. Elde edilen datalardan sürünme hatası değerleri hesaplanır. Şekil 9 da verilen şekilde her sıcaklık değerı için ayrı ayrı raporlanırlar.

Barometrik basınç testi tek sıcaklık değerinde gerçekleştirilir. Yük hücresi üzerinde bir basınç sensörü bulunan bir kabin içine yerleştirilir. Gösterge ünitesi dışarıda konumlandırılır. Yük hücresinin bulunduğu kabin içinde yaklaşık 1 bar basınç değişimi oluşturulur. Basınç değişimi sırasında yük hücresi gösterge değerleri kaydedilir ve basınç hatası değerleri hesaplanarak sensörün performansının uygun olup olmadığı yada raporda belirtildiği şekilde geçti veya kaldı şeklinde işaretlenir. Rapor formatı şekil 10 da gösterildiği gibi olabilir.

Load cell model	: xxx								
Load cell model	: xxx								
Seri no	: xxx								
Serial no	: xxx								
E _{max}	: 35 kg								
n _{max}	: 3000								
v _{min}	: 0,0078								
P _{LC}	: 0,7	DR	: 0,0004	Dönüşüm Faktör (f)	: 0,000595				
				Conversion factor					
Kuvvet Uygulama Sistemi	: El ile yüklemeli ölü ağırlıklı sistem								
Force-generating System	: Hand operated dead weight system								
Gösterge Elemanı	: xxx								
Indicating instrument	: xxx								

Başlangıç At start	Bitiş At end
21.02.2021	20.3
Sıcaklık (temperature)	20.3
Bağıl nem (relative humidity)	20.3
Barometrik basınç (barometric pressure)	98.00
	98.00

Tablo 8.

Test Yüklü Test Load kg	Okunam Indication mV/V	Zaman Time		Değişim Change		Müsaade Edilen Değişim (mpc) v _{mpc} % °C
		hh:mm:ss	mm	mV/V	v	
0	-0,22713	14:40:08	-	-	-	-
35	1,55657	14:40:32	0,3	-	-	-
35	1,55655	14:41:12	1	-0,00002	-0,03	0,74
35	1,55653	14:42:12	2	-0,00004	-0,07	0,74
35	1,55653	14:43:12	3	-0,00004	-0,07	0,74
35	1,55653	14:44:12	4	-0,00004	-0,07	0,74
35	1,55653	14:45:12	5	-0,00004	-0,07	0,74
35	1,55653	14:47:12	7	-0,00004	-0,07	0,74
35	1,55655	14:50:12	10	-0,00002	-0,03	0,74
35	1,55656	14:52:12	12	-0,00001	-0,02	0,74
35	1,55657	14:55:12	15	0,00000	0,00	0,74
35	1,55657	14:57:12	17	0,00000	0,00	0,74
35	1,55658	15:00:12	20	0,00001	0,02	0,74
35	1,55658	15:02:12	22	0,00001	0,02	0,74
35	1,55659	15:05:12	25	0,00002	0,03	0,74
35	1,55659	15:10:12	30	0,00002	0,03	0,74
0	-0,22711	15:10:36	0,3	0,00002	0,03	0,50
Fark (Difference)		30-20 mm		0,00001	0,02	0,16

Minimum Yüke Geri Dönüş(v) Dead load return (DR)	<input type="text" value="0,03363355"/>	30 dakika Sürümme: 30 minute creep	GEÇTİ: <input checked="" type="checkbox"/> X	KALDE: <input type="checkbox"/>
		PASS		FAIL
Gerçek Zaman(s) Actual time	<input type="text" value="20"/>	30-20 dakika Sürümme Farkı: 30-20 minute creep difference	GEÇTİ: <input checked="" type="checkbox"/> X	KALDE: <input type="checkbox"/>
		PASS		FAIL
Özel Zaman(s) Specified time	<input type="text" value="8"/>	DR < 0.5 v:	GEÇTİ: <input checked="" type="checkbox"/> X	KALDE: <input type="checkbox"/>
		PASS		FAIL
DR için mpc(v) mpc for DR	<input type="text" value="0,50"/>			

Şekil 9. Tek sıcaklık değerindeki sürümme testi datalarının raporda gösterilmesi

Load cell model	: xxx								
Load cell model	: xxx								
Seri no	: xxx								
Serial no	: xxx								
E _{max}	: 35 kg								
n _{max}	: 3000								
v _{min}	: 0,0078								
P _{LC}	: 0,7	DR	: 0,0004	Dönüşüm Faktör (f)	: 0,000595				
				Conversion factor					
Kuvvet Uygulama Sistemi	: El ile yüklemeli ölü ağırlıklı sistem								
Force-generating System	: Hand operated dead weight system								
Gösterge Elemanı	: DMP 40, S.N. 964720034								
Indicating instrument	: DMP 40, S.N. 964720034								

Başlangıç At start	Bitiş At end
23.02.2021	20.3
Sıcaklık (temperature)	20.3
Bağıl nem (relative humidity)	20.3
Barometrik basınç (barometric pressure)	98.00
	98.00

Tablo 11.

Başlangıç Pressure kPa	Okunam Indication mV/V	Zaman Time hh:mm:ss	Değişim Change				Müsaade Edilen Değişim (mpc) v _{mpc} %Pa
			mV/V	v	kPa	v _{mpc} %Pa	
98,00	-0,28064	18:40:12	-	-	-	-	
99,35	-0,28065	18:40:32	-0,00001	-0,02	1,35	-0,0186833	
98,00	-0,28063	18:41:02	0,00002	0,03	-1,35	-0,0373706	
99,35	-0,28064	18:41:32	-0,00001	-0,02	1,35	-0,0186833	
98,00	-0,28062	18:41:32	0,00002	0,03	-1,35	-0,0373706	
99,35	-0,28063	18:41:52	-0,00001	-0,02	1,35	-0,0186833	
98,00	-0,28061	18:42:12	0,00002	0,03	-1,35	-0,0373706	

GEÇTİ: X KALDE:

PASS FAIL

Şekil 10. Basınç testi datalarının raporda gösterilmesi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yük hücresi veya Loadcell üretimi yapan firmalar sensörlerinin performanslarını belirlemek için OIML R60 testine ihtiyaç duyarlar. OIML R60 yük hücreleri için pek çok testi içeren bir yasal metroloji dokümanıdır. Bu çalışmada OIML R60 dokümanında göre yükleme, sürünme ve barometrik basınç testlerinin gereklilikleri ve dikkat edilmesi gereken hususları verilmiştir. Ülkemizde bu alanda çok fazla çalışma olmaması nedeniyle konunun daha iyi anlaşılması için bu çalışma planlanmıştır. Bu çalışma ile, OIML R60 dokümanında göre yük hücrelerinin performans ölçümleri yapan veya kullanan, konu ile ilgili kişilere testler ve raporlama hakkında detaylı ve doğru bir bilgi iletilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışma ile bu konuda çalışma yapanlara rehber bir doküman hazırlanması amaçlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] OIML R60 - 1, 2021, Metrological regulation for load cells, Part 1: Metrological and technical requirements
- [2] OIML R60 - 2, 2021, Metrological regulation for load cells, Part 2: Metrological controls and performance tests
- [3] OIML R60 - 3, 2021, Metrological regulation for load cells, Part 3: Test report format
- [4] Aydemir B., 2021, Kuvvet Kalibrasyon Rehberi, TÜBİTAK UME, Eylül 2021, ISBN: 978-605-312-399-6
- [5] ISO 376:2011, Metallic Materials-Calibration of Force-proving Instruments Used for the Static Verification of Uniaxial Testing Machines
- [6] ASTM E74-18, 2019, Standard Practice of Calibration of Force-Measuring Instruments
- [7] DKD R 3-3, 2024, Guideline DKD-R 3-3 Calibration of force measuring devices
- [8] Aydemir, B., Dizdar, H., Vatan,C., 2018, “Genel Kuvvet Metrolojisi Eğitim Dokümanı”, TÜBİTAK UME Gebze-Kocaeli, Mayıs 2018
- [9] Aydemir B., Dizdar H.,Vatan C., 2019, “EN ISO 376 Standardına Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kalibrasyonunda Belirsizlik Hesabı ve İrdelenmesi” Kuvvet Laboratuvarı Teknik Dokümanı, TÜBİTAK UME, S.2, N.1, 2019, (1-13)
- [10] Aydemir, B., 2022, Evaluation of Uncertainty Calculation in Calibration of Force Measuring Devices According to ISO 376 Standard, Current Debates in Engineering Sciences, Section 8, s.133-158, ISBN: 978-625-8109-85-6

2. Bölüm

Karadeniz, Ege ve Akdeniz Bölgesinde 2024 Yılında Meydana Gelen Deniz Kazalarının Risk Analizi Çalışması

Serdar ŞİPAL¹, Hakan DİLİPAK²

Özet

Küresel ticaretin artması birlikte, dünya genelinde ürün sevkiyat hacmi her geçen yıl daha yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Dünya ticaret verileri incelendiğinde, dünya üzerinde taşınan ürünlerin %70 gibi büyük bir bölümünün deniz yoluyla nakledildiği görülmektedir. Ürünlerin transferinde karayolu %18, demiryolu %9 ve havayolu ise %1'in altında bir paya sahiptir [1,2]. Bu yoğunluk, deniz trafiğindeki yükü de beraberinde artırmaktadır. Jeopolitik konumu itibarıyla İstanbul ve Çanakkale Boğazları ile Marmara Denizi gibi kritik su yollarına ev sahipliği yapan Türkiye, bu yoğun trafikten doğrudan etkilenmektedir. Bu çalışma kapsamında; Denizcilik Genel Müdürlüğü'nün Akdeniz, Ege, Marmara ve Karadeniz limanlarına uğrayan gemilerin istatistikî bilgilerinden hareketle, Türk arama kurtarma sahası içinde kalan Karadeniz, Ege Denizi ve Akdeniz'de gerçekleşen karaya oturma, batma, çatışma ve su alma, yangın gibi kaza türleri analiz edilmiştir. Değerlendirme sürecinde Fine-Kinney risk analizi yöntemi tercih edilerek, 2024 yılındaki her bir kaza vakası tek tek incelenmiş; yapılan hesaplamalar ışığında riskli bölgeler konum ve şiddet derecesine göre harita üzerinde görselleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Deniz yolu taşımacılığı, Marmara Denizi, Boğazlar, Deniz trafiği, Deniz kazaları, Deniz kazaları risk analizi

¹ Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kazaların Teknik Ve Çevresel Araştırması Ana Bilim Dalı
ORCID / 0009-0006-6653-2861,
E-posta serdar.sipal@uab.gov.tr

² Prof. Dr. Gazi Üniversitesi, İmalat Mühendisliği,
ORCID / 0000-0003-3796-818, E-posta hdilipak@gazi.edu.tr

1. GİRİŞ

Her gün farklı tip, tonaj ve bayraklara sahip çok sayıda gemi, Türk Boğazları ve Marmara Denizi'ni seyir rotaları doğrultusunda kullanmaktadır [3]. Transit geçişlerin yanı sıra gemiler; yedek parça temini, kumanya alımı, yakıt ve su ikmali, personel değişimi gibi çeşitli operasyonel ihtiyaçlar nedeniyle seyir haritalarında belirlenmiş demirleme sahalarında beklemek durumunda kalmaktadır.

Söz konusu geçiş güzergâhları ve demirleme alanları, açık deniz koşullarına kıyasla daha dar ve sınırlı alanlar sunduğundan, gemiler bu bölgelerde birbirlerine daha yakın mesafelerde seyretmekte ve trafik düzenlemelerine uygun rota izlemek zorunda kalmaktadır. Bu durum, gemi trafiğinin yoğunlaşmasına ve ilgili sahalarda deniz trafik yoğunluğunun giderek artmasına yol açmaktadır. Açık deniz seyirine alışkın kaptan ve zabitanlar açısından dar sularda seyir yapmak ve sınırlı alanlarda demirlemek, iş yükü ve stres düzeyi bakımından daha zorlayıcıdır. Bu nedenle, tecrübe eksikliği, dikkat dağınıklığı veya gemi kondisyonunun yetersizliği gibi faktörler deniz kazalarının meydana gelme olasılığını artırmaktadır.

Denizde Çatışmayı Önleme Tüzüğü'nün (COLREG 72) 10. kuralı esas alınarak, Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından İstanbul ve Çanakkale Boğazları ile Marmara Denizi'nde Trafik Ayrım Şemaları oluşturulmuştur. Bu kapsamda kurulan Türk Boğazları Gemi Trafik Hizmetleri (TBGTH) Sistemi, 30 Aralık 2003 tarihinden itibaren faaliyete geçerek denizcilere hizmet sunmaya başlamıştır [3].

Deniz kazalarının ölçülmesi ve bu veriler üzerinden risk analizlerinin yapılabilmesi amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Marmara Denizi ve Türk Boğazları'ndan geçen gemi sayılarının belirlenmesinde Otomatik Tanımlama Sistemi (OTS/AIS) verilerinden yararlanılmıştır [4]. Deniz kazalarının sonuçları ve çevresel etkilerinin birlikte değerlendirilmesine yönelik standart bir yaklaşım oluşturulması, IMO tarafından önerilmiş ve kaza raporlarının bu çerçevede hazırlanması tavsiye edilmiştir [5]. Bu doğrultuda, deniz kazalarının şiddetinin belirlenmesinde dört temel parametre öne çıkmaktadır: fiziksel etki, yapısal hasar, insan üzerindeki etkiler ve çevresel etkiler.

Bu çalışmada risk değerlendirmesi; olasılık (P), şiddet (S) ve maruziyet/yoğunluk (E) değişkenlerine dayanan üç parametrelili bir model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Söz konusu yaklaşım, denizcilik ve ulaştırma güvenliği literatüründe yaygın olarak kullanılan kantitatif risk matrisi yöntemine dayanmaktadır. Risk skoru, $(R = P \times S \times E)$ bağıntısı ile hesaplanmış; olasılık değeri geçmiş kaza frekansları ve trafik yoğunluğu verileri dikkate alınarak, şiddet değeri ise kazalardaki yaralanma ve hasar düzeylerine göre belirlenmiştir [5–11]. IMO tarafından Resmi Güvenlik Değerlendirmesi (FSA) kapsamında kullanılan ve Fine-Kinney yöntemi olarak bilinen bu yaklaşımın, deniz

kazalarına yönelik gerçekçi risk analizleri sunduğu ve literatürde yaygın biçimde benimsendiği görülmektedir [12–15].

Akyıldız H. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 2000–2009 yılları arasında meydana gelen deniz kazaları; yıllar, bölgeler ve gemi tipleri açısından incelenmiştir. Bu kapsamda, deniz kazalarına etki eden risk unsurları belirlenmiş ve olaylar olasılık ile şiddet kriterlerine göre sınıflandırılmıştır. Ayrıca Trafik Ayrım Düzeni (TAD) ve Gemi Trafik Hizmetleri Sistemi (GTHS) yapıları değerlendirilmiş; mevcut mevzuattaki eksiklikler ortaya konularak, şirketler, gemi personeli ve kamu otoriteleri için çeşitli öneriler geliştirilmiştir.

Araştırmada risk kavramı, kaza veya olayın gerçekleşme olasılığı ile muhtemel şiddetinin çarpımı olarak tanımlanmıştır. Bu çerçevede, risk değerlendirmesinde

$Risk = Olasılık \times \text{Şiddet}$ bağıntısının yanı sıra, risk matrisinin logaritmik gösterimi olan $\text{Log}(Risk) = \text{Log}(Olasılık \text{ Endeksi}) + \text{Log}(\text{Şiddet Endeksi})$ ifadeleri kullanılmıştır. Bu yaklaşım, kaza ve olayların sistematik ve karşılaştırılabilir biçimde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır [16].

Kılıç, İbrahim tarafından yapılan çalışmada ise İstanbul Boğazı'ndaki deniz kazası riskleri bütüncül bir yaklaşımla ele alınmış ve kapsamlı bir değerlendirme sunulmuştur. Boğazın çok sayıda risk kriteri çerçevesinde analiz edilmesi, çalışmayı benzer araştırmalardan ayıran önemli bir özellik olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca çalışma, hem akademik literatüre katkı sağlamakta hem de ilgili kurumlara risklerin azaltılmasına yönelik yol gösterici bir çerçeve sunmaktadır [17].

Yorulmaz, M. ve Sezen, K. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, denizcilik alanındaki tehlikelerin belirlenmesi ve Fine-Kinney yöntemi ile risk analizinin uygulanabilirliğinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Bu kapsamda çeşitli denizcilik risk analiz yöntemleri incelenmiş ve belirlenen tehlikeler; ölüm, yaralanma, maddi hasar ve çevresel etkiler açısından değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda 40 farklı risk skoru hesaplanmış; 1200 risk skoruna sahip “gemi yapısındaki hasar ve bozulmalar” tehlikesinin, ölüm riski açısından en yüksek düzeyde olduğu tespit edilmiştir [18].

Bu çalışmanın amacı, Karadeniz, Ege Denizi, Akdeniz'de meydana gelen deniz kazalarını, Uluslararası Denizcilik Örgütü (International Maritime Organization) tarafından tavsiye edilen deniz kazası şiddet hesaplama yöntemleri doğrultusunda analiz etmek; elde edilen sonuçları risk kategorilerine göre sınıflandırarak ağır ve şiddetli/katastrofik deniz kazalarının hangi bölgelerde yoğunlaştığını ortaya koymaktır.

2. YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, Dünya Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından önerilen deniz kazası şiddet belirleme yaklaşımı ile Fine-Kinney risk analizi yöntemi kullanılarak Türk Arama Kurtarma sahası içerisinde kalan Karadeniz, Ege Denizi, Akdeniz'de deniz kazalarının hangi alanlarda ve koordinatlarda yoğunlaştığı belirlenmiş ve riskli bölgeler tespit edilmiştir. Olasılık değerlerinin hesaplanabilmesi amacıyla Denizcilik genel müdürlüğü tarafından her yıl yayımlanan veriler incelenmiş, Türkiye Arama Kurtarma sahası içerisindeki yıllık gemi trafiği ve gemi geçiş sayıları temel alınarak yaklaşık değerler elde edilmiştir.

Denizcilik Genel Müdürlüğü tarafından söz konusu istatistikler her yıl kurumun resmi internet sitesinde yayımlanmaktadır [19]. Bu çalışmada, özellikle 2024 yılına ait deniz kazası verileri dikkate alınarak gerçeğe en yakın olasılık değerlerinin elde edilmesi hedeflenmiştir. Riskin hesaplanmasında en yaygın ve temel yöntemlerden biri olan sayısal yaklaşım esas alınmış; bu yöntemde risk, olasılık ve şiddet değerlerinin çarpımı olarak ifade edilmiştir [20]. Bu kapsamda aşağıdaki bağıntılar kullanılmıştır:

$$\text{Log(Risk)} = \text{Olasılık} \times \text{Şiddet}$$

$$\text{Log(Risk Matrisi)} = \text{Log(Olasılık Endeksi)} + \text{Log(Şiddet Endeksi)}$$

Bu ifadelerde olasılık, bir olayın gerçekleşme ihtimalini; şiddet ise olayın etkisinin büyüklüğünü temsil edecek şekilde sayısal olarak tanımlanmıştır. Elde edilen veriler matematiksel ve mantıksal yöntemlerle değerlendirilerek risk düzeyleri hesaplanmıştır. Ayrıca, ondalıklı değerlerin oluşturabileceği karmaşıklığı azaltmak ve sonuçların daha belirgin hale gelmesini sağlamak amacıyla şiddet değerleri 1000 ile çarpılmış ve ardından logaritmik dönüşüm uygulanmıştır. Bu sayede elde edilen veriler ölçülebilir ve karşılaştırılabilir bir yapıya kavuşturulmuş; logaritmik risk düzeyleri üzerinden kaza risk sınıflandırması yapılmıştır.

IMO tarafından önerilen şiddet hesaplama yaklaşımlarında, deniz kazalarının değerlendirilmesinde yoğunluk faktörünün de dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Yapılan gözlemler, belirli bir zaman diliminde ve belirli bir bölgede oluşan gemi trafiği yoğunluğu ile deniz kazalarının meydana gelme sıklığı arasında doğrusal bir ilişki bulunduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda, özellikle karaya oturma, çatışma ve çatma türündeki kazaların analizinde ilgili deniz alanına ait trafik yoğunluğu katsayısı hesaplamalara dâhil edilmiştir.

IMO yaklaşımıyla uyumlu bir risk değerlendirmesi gerçekleştirebilmek amacıyla Fine-Kinney yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem; deniz trafiği yoğunluğu, kaza olasılığı ve kazanın potansiyel sonuçlarını birlikte ele alarak bütüncül bir değerlendirme imkânı sunmaktadır. Bu kapsamda, incelenen deniz

alanlarına ilişkin risk faktörleri, Risk = Olasılık × Şiddet × Yoğunluk bağıntısı kullanılarak belirlenmiştir [12–15].

Türk Arama Kurtarma sahasında yıllık gemi trafik yoğunluğunun belirlenmesinde en sağlıklı yaklaşım, günlük gemi trafik verilerinin düzenli olarak izlenmesine dayanmaktadır [21]. Gemilerde Otomatik Tanımlama Sistemi (AIS/OTS) kullanımı, Uluslararası Denizcilik Örgütü tarafından yürürlüğe konulan Denizde Can Güvenliği Sözleşmesi (SOLAS) hükümleri çerçevesinde zorunlu hale getirilmiştir. Buna göre, 500 Gross Ton (GRT) ve üzeri bölgesel ticari gemiler ile 300 GRT ve üzeri uluslararası sefer yapan ticari gemilerde ve tonajdan bağımsız olarak tüm yolcu gemilerinde AIS Tip A cihazı bulundurulması zorunludur [22].

Bunun dışında kalan balıkçı tekneleri, özel motor yatlar ve yelkenli tekneler gibi düşük tonajlı ve genellikle SOLAS kapsamı dışında yer alan deniz araçlarında ise AIS Tip B cihazlarının kullanımı isteğe bağlıdır. Bu sistem sayesinde kıydan yaklaşık 40 deniz mili mesafeye kadar gemilerin konumları, seyir rotaları ve hız bilgileri izlenebilmektedir. Nitekim, yapılan anlık ölçümlere göre Türk Arama Kurtarma sahasında 1.706 adet AIS Tip A ve 1.848 adet AIS Tip B olmak üzere toplam 3.554 deniz aracının seyir halinde, demirde veya limanlarda bağlı durumda bulunduğu tespit edilmiştir.

Türk Arama Kurtarma sahasındaki yıllık gemi yoğunluğunun gerçeğe yakın şekilde hesaplanabilmesi amacıyla AIS verileri ile boğazlardan gerçekleşen yıllık gemi geçiş sayıları karşılaştırılarak ortalama değerler elde edilmiştir. Bu bölümde, gemi trafik akışının yoğun olduğu bölgeler ile gemi uğrak limanlarının bulunduğu alanlar esas alınarak risk analizi gerçekleştirilmiştir. Özellikle İstanbul ve Çanakkale Boğazı'nda yapılan değerlendirmelerde, boğazlardan geçen gemi sayıları dikkate alınmıştır. Risk modellemesi kapsamında ise 2024 yılı içerisinde söz konusu bölgelerde meydana gelen kazaların şiddet düzeyleri esas alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

Deniz trafik yoğunluğunun belirlenmesi

Bu bölümde, deniz trafiği yoğunluğu gerçeğe en yakın şekilde belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, Türk Arama ve Kurtarma (A/K) sahasında seyir halinde bulunan AIS Tip A ve Tip B sistemine sahip deniz araçlarının anlık sayıları, buldukları deniz alanlarına göre ayrı ayrı tespit edilmiştir. Elde edilen bu veriler, ilgili bölgelerin yüzölçümleri ile ilişkilendirilerek deniz trafik yoğunluğu değerleri hesaplanmıştır.

Deniz trafiği yoğunluğunun artması, kaza meydana gelme olasılığını doğrudan etkileyen bir unsur olup, buna bağlı olarak kaza risk seviyesinin de artmasına neden olmaktadır. Bu kapsamda çalışma alanı; Akdeniz, Ege Denizi, Marmara ve Boğazlar bölgesi ile Karadeniz olmak üzere dört ana deniz sahası altında ele

alınmıştır. Söz konusu alanlar için hesaplanan trafik yoğunlukları ve bunların yüzdesel dağılımları dikkate alınarak, her bir bölgeye özgü yoğunluk katsayıları belirlenmiştir.

Resim 1 Türk A/K sahasında bulunan gemilere ait OTS(AIS) verileri



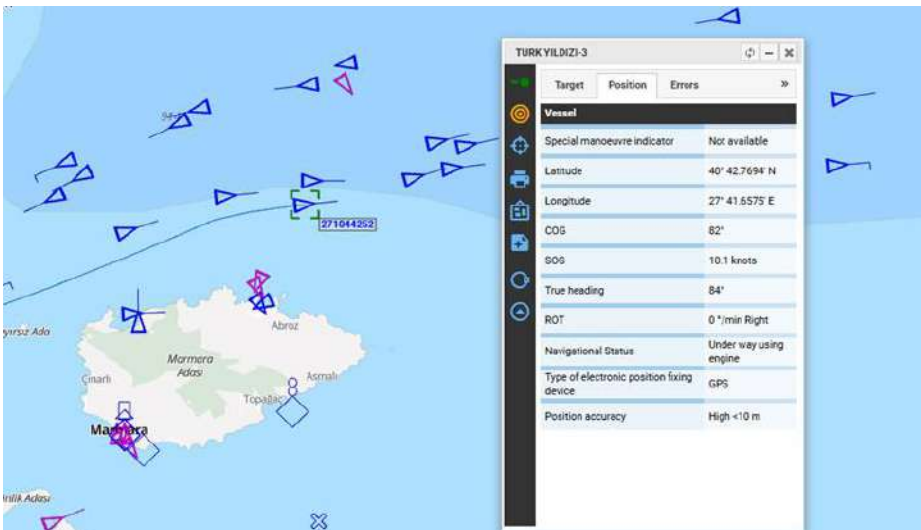
Yoğunluk katsayılarını ortaya çıkarmak amacıyla Türk A/K sahası içerisindeki anlık seyreden gemi sayılarının Türk A/K sahası alanına bölünmesiyle genel yoğunluk değerine ulaşılmıştır [23].

AIS verileriyle kullanılan modern yöntem aşağıdaki gibi formüle edilmiştir ;

$$KGTY = \sum t_i A \cdot T \quad (1)$$

$T_i =$ 'i' inci geminin hücrede geçirdiği süre

A=Grid Hücre Alanı



Resim 2 Marmara Denizinde seyir yapan bir gemiye ait OTS(AIS) görseli

Anlık veriler AIS (OTS) sisteminden temin edilmektedir. Seçilen gün veya saat diliminin sonuçlar üzerinde belirleyici bir etkisi bulunmamaktadır; zira Türk Arama Kurtarma sahasında anlık olarak bulunan ortalama gemi sayısının genel olarak benzer düzeylerde seyrettiği gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, bu hesaplamalar 2024 yılı verilerini kapsamaktadır. 2025 yılı ve sonrasında gemi trafiğinde ve deniz geçiş alanlarındaki yoğunlukta artış yaşanmasının muhtemel olduğu değerlendirilmekte olup, söz konusu artışa bağlı olarak deniz kazası risk seviyelerinde de yükseliş meydana gelmesi beklenmektedir.

Marmara ve Boğazlar bölgesi deniz alanında gemi yoğunluğu tespiti:

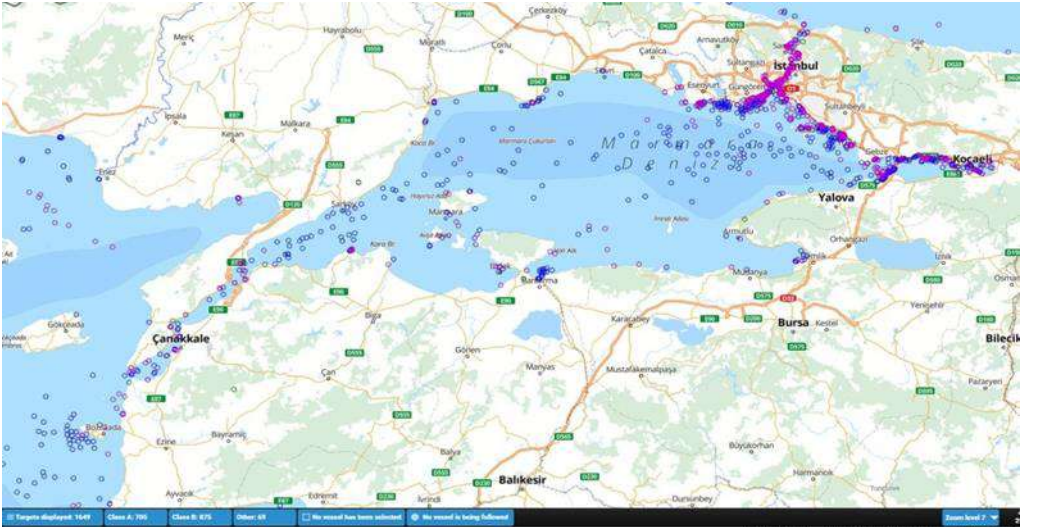
Çanakkale Boğazı alanı:370,69 Km² , İstanbul boğazı alanı 74,61 Km² ve Marmara denizi alanı:11 133,3 Km² olmak üzere, Google Earth programı ile yapılan ölçüme göre hesaplanan Marmara ve Boğazlar toplam deniz alanı 11 578,6 Km² 'dir.

Marmara ve Boğazlar bölgesi gemi trafiği durumu AIS sisteminden elde edilen gemi bilgilerine göre anlık ortalama ölçümlerde 1649 gemidir.

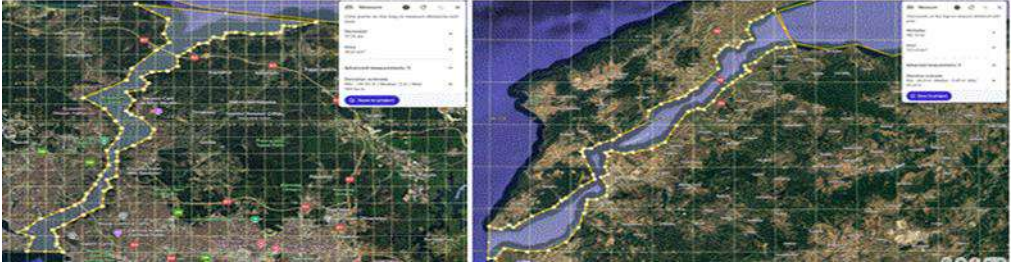
Marmara ve Boğazlar Gemi Trafik Yoğunluğu (MBGTY):

$$MBGTY = \frac{\sum G_s}{A} \quad (G_s: \text{Gemi sayısı}, A: \text{Alan}) \quad (3)$$

$MBGTY = \frac{1649}{11\,578,6} = 1\,000 \text{ Km}^2 \text{ 'ye } 142,2 \text{ gemi bulunmuştur. Resim 3'te Marmara denizi ve boğazlar deniz alanında anlık olarak bulunan gemiler verilmiştir.}$



Resim 3 Marmara denizi ve Boğazlar deniz alanında anlık olarak bulunan gemiler



Resim 4 Marmara denizi ve Boğazlar'ın deniz alanı ölçümü

Resim 4'te Marmara Denizi ve Boğazlar deniz alanlarının “Google Haritalar” üzerinden yapılan ölçümleri sunulmuştur. Ölçümler, kıyı şeridi esas alınarak noktasal işaretlemelerle gerçekleştirilmiş; boğazların bitim noktalarından sınırlandırma yapılarak Marmara Denizi ve Boğazlar için deniz alanları km² cinsinden hesaplanmıştır. Google Haritalar, bu hesaplamaları kendi yazılım altyapısı içerisinde otomatik olarak gerçekleştirmekte ve sonuçları anlık olarak ekranda göstermektedir.

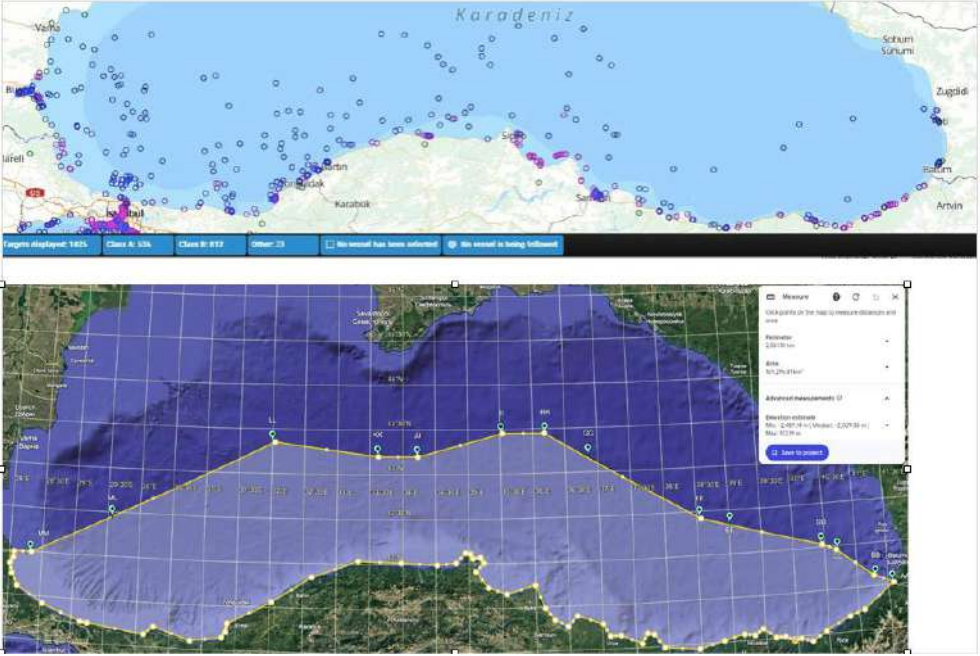
Karadeniz bölgesi deniz alanında gemi yoğunluğu tespiti:

Google Earth programı ile yapılan ölçüme göre hesaplanan deniz alanı 169 296, 81 km² 'dir. Karadeniz bölgesi gemi trafiği durumu AIS sisteminden elde edilen gemi bilgilerine göre anlık ortalama ölçümlerde 1 425 gemidir. Resim 5'te Karadeniz deniz alanında anlık olarak bulunan gemiler ve Karadeniz Türk Arama Kurtarma sorumluluğunda kalan deniz alanının ölçümü verilmiştir.

Karadeniz Gemi Trafik Yoğunluğu (KGTY):

$$KGTY = \frac{\sum G_s}{A} \quad G_s: \text{Gemi sayısı, A: Alan} \quad (2)$$

$$KGTY = \frac{1\,425}{169\,296,81} = 1\,000 \text{ Km}^2 \text{ 'ye } 8,41 \text{ gemi bulunmuştur.}$$



Resim 5 Karadeniz deniz alanında anlık olarak bulunan gemiler ve Karadeniz Türk Arama Kurtarma sorumluluğunda kalan deniz alanının ölçümü

Akdeniz bölgesi deniz alanında gemi yoğunluğu tespiti:

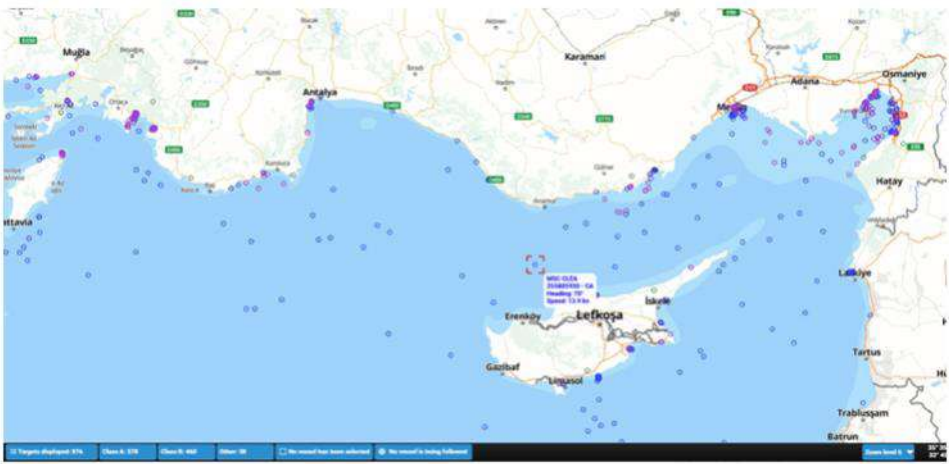
Google Earth programı ile yapılan ölçüme göre hesaplanan deniz alanı 193 311, 3 Km² 'dir. Akdeniz bölgesi gemi trafiği AIS sisteminden elde edilen gemi bilgilerine göre anlık ortalama ölçümlerde anılan bölgede 876 gemi bulunmaktadır.

Akdeniz Gemi Trafik Yoğunluğu (EDGTY):

$$ADGTY = \frac{\sum G_s}{A} \quad (G_s: \text{Gemi sayısı}, A: \text{Alan}) \quad (5)$$

$$ADGTY = \frac{876}{193\,311,32} = \text{Bin Km}^2 \text{ 'ye } 4,53 \text{ gemi bulunmuştur.}$$

Resim 6'da Akdeniz deniz alanında anlık olarak bulunan gemiler ve Akdeniz Türk Arama Kurtarma sorumluluğunda kalan deniz alanının ölçümü verilmiştir.



Resim 6 Akdeniz deniz alanında anlık olarak bulunan gemiler ve Akdeniz Türk Arama Kurtarma sorumluluğunda kalan deniz alanının ölçümü

Ege bölgesi deniz alanında gemi yoğunluğu tespiti:

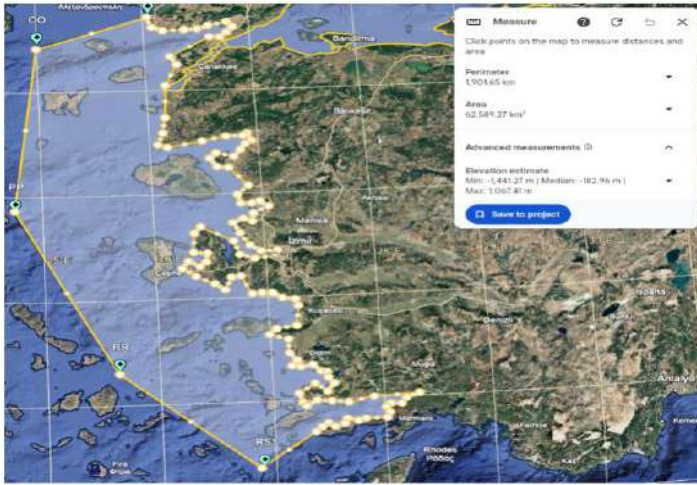
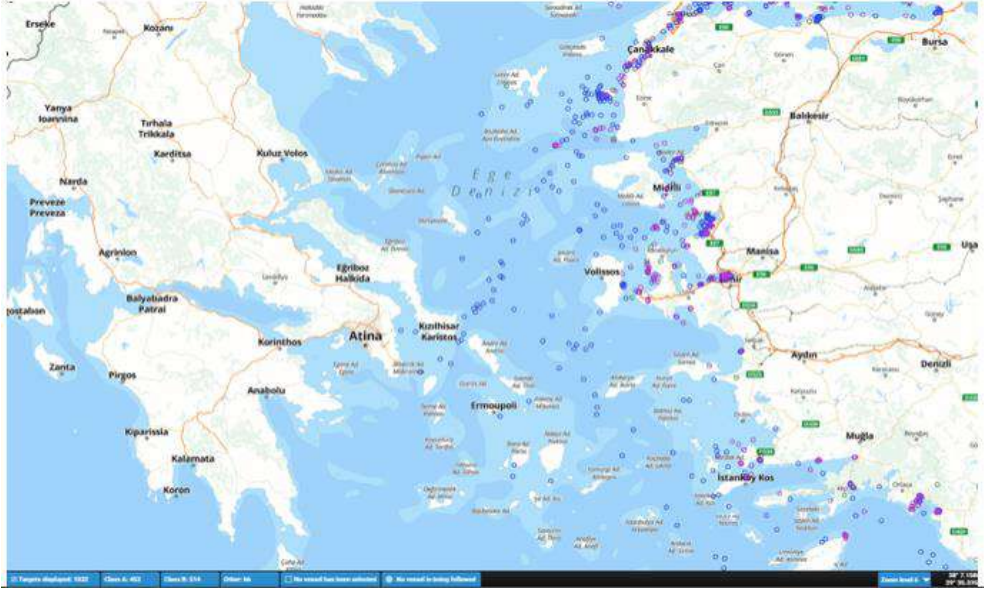
Google Earth programı ile yapılan ölçüme göre hesaplanan deniz alanı 65 589,27 Km² 'dir. Ege bölgesi gemi trafiği durumu AIS sisteminden elde edilen gemi bilgilerine göre anlık ortalama ölçümlerde 1032 gemidir.

Ege Denizi Gemi Trafik Yoğunluğu (EDGTY):

$$EDGTY = \frac{\sum G_s}{A} \quad (G_s : \text{Gemi sayısı, A:Alan})$$

$$EDGTY = \frac{1032}{65589,27} = \text{Bin Km}^2 \text{ 'ye } 15,73 \text{ gemi bulunmuştur.}$$

Resim 7'de Ege Denizi deniz alanında anlık olarak bulunan gemiler ve Ege Denizi Türk Arama Kurtarma sorumluluğunda kalan deniz alanının ölçümü verilmiştir.



Resim 7 Ege Denizi deniz alanında anlık olarak bulunan gemiler ve Ege Denizi Türk Arama Kurtarma sahası sorumluluğunda kalan deniz alanını ölçümü

Genel ve spesifik gemi trafik yoğunluğu hesaplama:

Denizlerde anlık olarak bulunan gemilerin toplam deniz alanlarına bölünmesiyle genel yoğunluğa erişilmiştir.

$$GGTY = \frac{\sum G_s}{\sum Alan} \quad \text{Buradan; } GGTY = \frac{4\,982}{429\,776} = 1\,000 \text{ Km}^2 \text{ 'ye } 11,59 \text{ gemi}$$

bulunmuştur.

Bu durumda, Risk hesaplamalarında ortalama olarak bulunan 11,59 değeri baz alınarak diğer denizlerin yoğunluk durumlarına göre yoğunluk katsayısı değeri hesaplanmıştır.

$$\text{Akdeniz Gemi Trafığı için yoğunluk değeri: } AGTY = \frac{4,53}{11,59} = 0,39$$

$$\text{Karadeniz Gemi Trafığı için yoğunluk değeri: } KGTY = \frac{8,41}{11,59} = 0,72$$

$$\text{Ege Denizi Gemi Trafığı için yoğunluk değeri: } EDGTY = \frac{15,73}{11,59} = 1,36$$

Marmara Denizi ve Boğazlar Gemi Trafığı için yoğunluk değeri: $MDGTY = \frac{142,2}{11,59} = 12,26$ olarak bulunmuştur, bu değerler genel formülde olasılık tarafını hesaplariken ilerideki bölümde kullanılacaktır.

Tablo 1 Denizlere göre anlık gemi yoğunluk değerleri

	Gemi sayısı	Deniz Alanı (Km ²)	Yoğunluk $\frac{\sum G_s}{A}$
Karadeniz	1425	169 296,81	8,41
Marmara ve Boğazlar	1649	11 578,6	142,2
Ege denizi	1032	65589,27	15,73
Akdeniz	876	193 311.32	4,53
Toplam	4982	429 776	11,59

Deniz Kazalarının şiddetine göre sınıflandırılması

Deniz kazalarında, su üzerinde faaliyet gösteren deniz araçlarının fiziksel boyutlarının insan ölçeğiyle karşılaştırıldığında ortaya çıkan uyumsuzluk nedeniyle, karayolu trafik kazalarında olduğu gibi standart bir şiddet sınıflandırması yapmak mümkün olmamaktadır. Bu durum, deniz kazalarının büyüklüğü, türü ve insan ile çevre üzerindeki etkileri dikkate alınarak daha farklı ve kapsamlı değerlendirme ölçütlerinin geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Dünya Denizcilik Örgütü'ne (IMO) [24] göre şiddet; fiziksel etki, yapısal hasar, insan üzerindeki etkiler ve çevresel zararlar birlikte ele alınarak değerlendirilmektedir. Bu yaklaşımlar içerisinde ilk adım, fiziksel şiddetin belirlenmesidir. Fiziksel etkinin hesaplanmasında kullanılan temel formül aşağıda verilmiştir;

$$E_k = \frac{1}{2} \times M \times V^2$$

M=Gemi kütlesi (kg)

V=Çarpışma anındaki hız değeri (m/s) (6)

Örnek olarak, 18 bin tonluk bir feribotun 12 Knot (8 m/s) hızla sabit bir cisme çarpması sonucu 576 MegaJullük enerji ortaya çıkmaktadır. Bu seviye, şiddetli yapısal çarpma (Severe Structural Impact) { 4 } kategorisine girer ve "Ağır" dereceden şiddet faktörünü alarak sınıflandırılmıştır. Bu örneğe göre şiddet hesaplarında gemi büyüklüğü, hacimsel tonaj (Gross Ton) kategori sınıflarına dahil edilmiştir. IMO ve EMSA'da ve akademik çalışmalarda büyük deniz kazalarından sonra yapılan kaza şiddeti ölçümlerinde deniz kazasına maruz kalan her deniz aracı için Gross Tonaj aralıkları;

0~500 GRT--> ise şiddet çarpanı (E) : 1 (Hafif)

500~5 000 GRT--> ise şiddet çarpanı (E) : 2 (Orta)

5000~20 000 GRT--> ise şiddet çarpanı (E): 4 (Ağır)

20 000~100 000 GRT ve ise şiddet çarpanı (E): 8 (Şiddetli/Katastrofik)

olarak alınmaktadır.

Gross Tonaj Denizcilik sektöründe bir çok alanda ölçü referansı olarak kullanılmaktadır, dünya denizciliği ölçeğinde bunlar aşağıdaki tabloda verilmiştir. Bu çalışmada Deniz kazasına karışan deniz aracının kaza şiddetini belirlemek amacıyla yukarıda verilen aralıklar Gross Tonaj (GT) sınıflandırması için kullanılmıştır [25].

Gross Ton (GT) = K x V

K= 0.2 x 0.02 x log₁₀ (V) (7)

Burada:

V = Geminin tüm kapalı hacmi (m³)

K = Hacme bağlı katsayı

Örnek: Bir geminin kapalı yerlerinin hacmi = 25 000 m³ olduğunda, verilen formül göre geminin Gross tonu: 7 200 GT olur.

Deniz aracı büyüklüğüne ek olarak deniz kazalarında deniz aracı büyüklüğünden bağımsız olarak insan kaybına ve yaralanmaya dayalı şiddet tespiti yapılması Ölüm ve Yaralanma indeksi (Fatality and Injury Index-FII) istenmektedir [26,27].

FII=(10 x Ölü sayısı) + (5x Ağır yaralı sayısı) x (1x Hafif yaralı sayısı), FII şiddet skalası Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 IMO tarafından kaza risk hesaplamaları için tavsiye edilen FII şiddet skalası

FII	ŞİDDET
0-5	Hafif
6-20	Orta
21-50	Ağır
>50	Katastrofik

FII endeksine ek olarak kazanın çevresel etkisi, şiddet hesaplarına dâhil edilmiştir. Çevresel Etki Şiddeti (Environmental Severity Index-ESI) aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır.

$$ESI = \alpha(\text{Sızıntı Miktarı}) + \beta(\text{Etkilenen Alan}) + \gamma(\text{Biyolojik Etki})$$

Şiddetlerin etkeni ve birleştirilmesi;

Deniz kazalarının şiddet miktarının hesaplamalarında aşağıdaki formülden yararlanılır. Bu yöntem, IMO araştırma raporları, Avrupa Denizcilik Güvenlik Ajansı (EMSA) kaza veritabanı, A.B.D. Sahil Güvenlik Komiserliği tarafından kabul edilmiş şiddet hesaplama yöntemidir. Çalışmamızda (E) endeksi 0,5 , (FII) endeksi 0,5 katsayısı ile çarpılarak deniz kazalarına ait Birleşik Denizcilik Şiddet Endeksi (Common Maritime Severity Index -CMSI)” ortaya çıkarılacaktır.

$$CMSI = 0,35 E + 0,25 MSDI + 0,20 FII + 0,20 ESI \quad (8)$$

Yapısal hasar tespitinde (CMSI) oluşan her deniz kazasının yakından incelenmesi gerektiği için uygulanamaz olduğundan, Çevresel Şiddet Endeksi (Environmental Severity Index-ESI) tespitinde, meydana gelen deniz kazaları sonucunda risk değerini etkileyecek kadar büyük deniz kirlilik oluşmadığı gözlemlendiğinden dolayı bu çalışmada mevcut formül 2024 yılında yaşanmış her deniz kazasına,

$$CMSI = 0.5 E + 0.5 FII \text{ şeklinde uygulanmıştır.} \quad (9)$$

Örnek olarak bir karaya oturma deniz kazasında bir geminin Gross tonajı 18 000, olayda 5 hafif yaralanma 3 ağır yaralanma ve 1 ölüm gerçekleşmemiş olsun bu durumda, E= 4 (Ağır kategori) buradan,

FII = 10 x ölü + 5 x ağır yaralanma + 1 x Hafif yaralanma = 26 (Ağır kategori olur). Buradan CMSI şiddet endeksi = 0,5 x 4 + 0,5 x 26 = 15 olarak bulunur.

Risk Gruplarının Belirlenmesi

Çalışmada, risk değerlendirmesi (R), olasılık (O), şiddet (S) ve maruziyet/yoğunluk (Y) değişkenlerine dayalı üç parametrelili bir model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, endüstriyel güvenlik, denizcilik ve ulaşım güvenliği literatüründe yaygın olarak kullanılan kantitatif risk matrisi yöntemine dayanmaktadır.

Çalışmada, her bir deniz kazası $R=O \times S \times Y$ bağıntısı ile hesaplanmış; burada olasılık geçmiş olay frekansı ve trafik yoğunluğu verileri üzerinden tahmin edilmiş, şiddet geçmiş kazalardaki yaralanma ve hasar düzeyine göre değerlendirilmiştir. Trafik yoğunluğu (TY), maruziyet katsayısı olarak modele entegre edilmiştir; bu, özellikle kara yolu ve deniz yolu güvenliği literatüründe risk skorunu gerçek operasyonel koşullara uyarlamak için önerilen bir yaklaşımdır.

Beş seviyeli olasılık ve şiddet sınıflandırması ve 1–5 arası maruziyet katsayısı, uluslararası standartlarda (örneğin ISO 31010) ve denizcilik risk analizlerinde kullanılan matris tabanlı yöntemlerle uyumlu olarak seçilmiştir.

Risk sonuçları, R değerine bağlı olarak düşük, orta, ağır ve şiddetli/katastrofik şeklinde sınıflandırılmıştır. Bu yaklaşım, literatürde ‘semi-kuantitatif risk analizi’ olarak adlandırılmakta olup, hem istatistiksel veri kullanımını hem de uzman değerlendirmelerini aynı modelde birleştirme avantajı sunmaktadır[28,29].

Buradaki amaç haritada eğer uygunsa riskli bölgeleri tespit etmek, eldeki verilere göre anlamlı risk skalası belirlemek olduğundan, hesaplamalar sonucu bulunan değerler üzerinden riskler gruplara ayrılmıştır[30].

Grup 1: Hafif veya düşük Risk : (Log 0,1 < Risk < Log 0,5)

Herhangi bir eylem gerektirmez, İzleme, veri toplama, bilgilendirme: Deniz Ticaret Odalarına, Liman Başkanlıklarına, Denizcilik eğitimi veren üniversite ve okullara aylık bilgilendirme yapılır. Etki çapı 5 deniz mili

Grup 2: Orta seviye Risk: (Log 0,5 < Risk < Log 0,75)

Eylem gerektirmez, Yerel uyarılar yapılır. Bölgeden geçen gemilere belirli zaman aralıklarında seyir uyarıları yapılır (MF telsiz bandında çalışan denizcilere uyarı sistemi -Navteks, Türk Radyo). Kazaya karışan gemilere öncelikli denetim yapılır. Etki çapı 5-25 mil

Grup 3: Yüksek seviye Risk : (Log 0,75 < Risk < Log 0,99) Eylem gerektirir, yerel otoriteler kaza olan yerlere uyarı işaretleri, şamandıralar veya deniz fenerleri yerleştirir, Bölgeden geçen gemilere belirli zaman aralıklarında seyir uyarıları yapılır. (Navteks, Türk Radyo).

Grup 4: Şiddetli / Katastrofik seviye Risk: (Log 0,99 < Risk)

Alarm seviyesidir, Acil Eylem gerekir, Ulusal otorite tarafından en yakın kıyı birimine mevcutlara ek olarak ihtiyaca göre römorkör, yangın söndürücü bot/römorkör, acil kurtarma botu aracı görevlendirir. Bölgeden geçen gemilere

belirli zaman aralıklarında seyir uyarıları yapılır. (Navteks, Türk Radyo). Kazaların tekrarı halinde deniz alanı veya deniz aracı için acil kısıtlama/ kapatma tedbiri uygulanır.

Karadeniz için risk analizi çalışması ve riskli bölgelerin haritada belirtilmesi

Karadeniz için 2024 yılı içerisinde meydana gelen Karaya oturma, Batma, Su alma, Çatma, Çatışma ve Yangın kategorilerindeki deniz kazaları için kaza şiddet hesaplamaları yapılmış, gemiler gross tonlarına göre tasnif edilmiş ve çıkan sonuçlara göre haritada kazaların yoğunlaştığı riskli bölgeler tayin edilmiştir. Haritada karışıklık olmaması amacıyla hafif ve orta kategorideki kazalara yer verilmemiştir, Ağır ve Katastrofik deniz kazaları, kaza oluş yerleriyle beraber belirtilmiştir.

Karadeniz’de yıllık gemi geçiş sayıları hesaplamak Boğazla ve Marmara denizi kadar net bir şekilde yapılamadığından, Karadeniz Limanlarına 2024 yıllarında uğrayan gemi sayıları baz alınarak deniz kaza olasılığı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek amacıyla, 2024 yılı boyunca Türkiye limanlarına uğrayan tüm gemilerin toplamına bakılmış ve deniz trafik yoğunluğu ile uyumlu olup olmadıkları kontrol edilmiştir. Tablo 3’te 2024 yılına ait Türk Bayraklı ve yabancı bayraklı gemilerin Limanlara uğrama sayısı ve toplam groston değerleri verilmiştir.

Denizcilik Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan yıllık istatistik bilgilerine göre; 20 994 Türk Bayraklı, 39 600 Yabancı bayraklı toplamda 60 594 gemi Türkiye’deki limanlarda yükleme/boşaltma yapmış, 2024 yılı içerisinde toplamda 902 445 224 gross tonluk yük bu limanlardan elleçlenmiştir.

Tablo 3 Türkiye limanlarına uğrayan gemiler ve yük elleçleme tonajları

Limanlarınıza uğrayan gemi istatistikleri, 2024
Calling vessel statistics at Turkish ports, 2024

Ay / Month	Toplam Uğrayan Gemi Sayısı / Total Number of Calling Vessel					
	Türk Bayraklı / Turkish Flag		Yabancı Bayraklı / Foreign Flag		Toplam / Total	
	Gemi Sayısı / No. of Ship	Gros Ton / Gross Tonnage	Gemi Sayısı / No. of Ship	Gros Ton / Gross Tonnage	Gemi Sayısı / No. of Ship	Gros Ton / Gross Tonnage
Ocak / January	1.398	10.186.298	2.954	57.200.830	4.352	67.387.128
Şubat / February	1.435	10.111.463	3.097	58.379.845	4.532	68.491.307
Mart / March	1.510	11.022.474	3.327	62.431.609	4.837	73.454.083
Nisan / April	1.429	10.395.788	3.331	63.212.607	4.760	73.608.395
Mayıs / May	1.722	11.005.592	3.570	67.671.576	5.292	78.677.169
Haziran / June	2.025	11.564.126	3.519	66.779.609	5.544	78.343.734
Temmuz / July	2.151	11.566.924	3.513	68.391.101	5.664	79.958.025
Ağustos / August	2.332	11.603.958	3.535	68.103.540	5.867	79.707.497
Eylül / September	2.175	12.088.888	3.294	62.746.855	5.469	74.835.743
Ekim / October	1.944	11.134.939	3.453	71.048.420	5.397	82.183.359
Kasım / November	1.410	11.063.377	2.965	60.836.124	4.375	71.899.501
Aralık / December	1.463	10.927.230	3.042	62.972.055	4.505	73.899.285
Toplam / Total	20.994	132.671.057	39.600	769.774.170	60.594	902.445.227

Denizcilik Genel Müdürlüğü-Deniz Ticaretini Geliştirme Daire Başkanlığı
(General Directorate for Maritime Affairs -Department of Merchant Trade Development)
03.02.2025 - 11:00:00

Karadeniz limanları uğraklı gemi sayıları

Karadeniz limanları uğraklı gemi sayılarını bulmak amacıyla, 2024 yılı boyunca Karadeniz limanlarına uğrayan tüm gemilerin toplamına bakılmış ve deniz trafik yoğunluğu ile uyumlu olup olmadıkları kontrol edilmiştir. Tablo 6’da 2024 yılına ait Türk Bayraklı ve yabancı bayraklı gemilerin Limanlara uğrama sayısı ve toplam groston değerleri verilmiştir.

Denizcilik Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan yıllık istatistik bilgilerine göre; 1 353 Türk Bayraklı, 4 872 Yabancı bayraklı toplamda 6 225 gemi Tablo 4’te verilen limanlarda yükleme/boşaltma yapmış, 2024 yılı içerisinde toplamda 47 877 671 Gross tonluk yük, bu limanlardan elleçlenmiştir. Karadeniz risk hesaplamalarında kullanılmak üzere olasılık hesaplamaları için 6 225 sayısı baz alınmıştır.

Tablo 4 Karadeniz limanlarına uğrayan gemiler ve yük elleçleme tonajları

Liman Başkanlığı / Harbour Master	Toplam Uğrayan Gemi Sayısı / Total Number of Calling Vessel					
	Türk Bayraklı / Turkish Flag		Yabancı Bayraklı / Foreign Flag		Toplam / Total	
	Gemi Sayısı / No. of Ship	Gros Ton / Gross Tonnage	Gemi Sayısı / No. of Ship	Gros Ton / Gross Tonnage	Gemi Sayısı / No. of Ship	Gros Ton / Gross Tonnage
Amasra	0	0	26	1.002.482	26	1.002.482
Bartın	10	22.084	343	1.157.409	353	1.179.493
Fatsa	2	5.622	16	41.868	18	47.490
Giresun	31	359.139	110	695.917	141	1.055.056
Hopa	77	231.104	29	116.195	106	347.299
İnebolu	59	189.189	22	97.139	81	286.328
Karadeniz Ereğli	187	1.341.853	427	6.086.930	614	7.428.783
Karasu	9	30.778	532	4.108.467	541	4.139.245
Ordu	1	127	0	0	1	127
Rize	150	355.008	21	113.437	171	468.445
Samsun	385	2.597.722	2.182	15.198.960	2.567	17.796.682
Sinop	1	9.991	9	239.278	10	249.269
Sürmene	1	111	2	2.712	3	2.823
Tirebolu	59	534.584	27	148.381	86	682.965
Trabzon	56	699.167	439	3.450.235	495	4.149.402
Ünye	216	567.632	99	451.056	315	1.018.688
Zonguldak	109	191.507	588	7.831.588	697	8.023.095
Toplam / Total	1.353	7.135.617	4.872	40.742.054	6.225	47.877.671

Denizcilik Genel Müdürlüğü-Deniz Ticaretini Geliştirme Daire Başkanlığı
(General Directorate for Maritime Affairs -Department of Merchant Trade Development)
03.02.2025 - 11:00:00

Karaya oturma olayları için Risk analizi çalışması:

2024 yılı içerisinde yaşanan karaya oturma olaylarında ölüm ve yaralanma yaşanmamıştır. Bir adet şiddetli büyük olay yaşanmıştır.

Ana Arama Kurtarma Koordinasyon Merkezi (AAKKM) verilerine göre Karadeniz deniz alanında 2024 yılı içerisinde 5 Karaya oturma olayı meydana gelmiştir. Gürcistan Poti’de meydana gelen Türk bayraklı bir geminin kumluk alana oturma olayı, Türkiye kıyılarında olmaması nedeniyle tabloya dahil edilmemiştir.

2025 yılı ve sonraki yıllar için gemilerin karaya oturma olasılığı hesaplanacak olursa bu oran: $5/6 \cdot 225 = 0,00080321$ yaklaşık olarak on binde 8 'dir.

Önceki bölümden Karadeniz bölgesi için gemi trafik yoğunluk katsayısı(KGTY) 0,72 bulunmuştu. Karadeniz deniz alanında kaza olma ihtimali hesabında gerçeğe yakın risk değerlerini yakalamak amacıyla CMSI endeksi, Deniz trafik yoğunluğu katsayısı ve kaza olma olasılığı çarpılarak anılan bölgedeki risk değerine ulaşılmıştır.

Tablo 5'te Türkiye Karadeniz sahillerinde oluşan karaya oturma olayları verilmiştir. Kazaya konu olan gemi adları gizlenmiştir. Kazaların şiddetine göre E katsayısı ve FII endeksleri belirlenmiş, bulunan değerler yoğunluk, olasılık ve CMSI endeksleri ile çarpılarak elde edilen rakam ile risk değerine ulaşılmış, bulunan risk değeri 10000

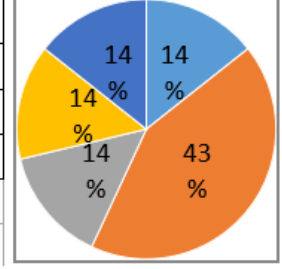
ile çarpılıp logaritması alınarak her bir deniz kazası için "ölçeklenebilir risk şiddet seviyesi" tespit edilmiştir. Bulunan Risk Kategorisi Tablo 6'da LOG kısmında ve Tablo5'in Risk Kategorisi sütununda verilmiştir.

Tablo 5 Karadeniz Türk A/K sahasında meydana gelen karaya oturma olayları

Olay Tarih ve Saati	Kaza Yeri	Yrl	Ölü	Gemi Adı	Gros	E	FII	CMSI	Yğnlk	Olasılık	Risk Kategorisi
11/11/2024 16:00:00	Sinop Ayancık	0	0	K** S*	1,84	1	0	0,5	0,72	%0,08	0,46
10/23/2024 08:00:00	Kdz. Ereğli Limanı	0	0	M**	93733	8	0	4	0,72	%0,08	1,36
10/3/2024 03:44:00	Anadolu Karaburun sahili	0	0	E**	45	1	0	0,5	0,72	%0,08	0,46
9/30/2024 18:00:00	Kefken Liman Başkanlığı sorumluluk sahası	0	0	M** K**	12	1	0	0,5	0,72	%0,08	0,46
8/11/2024 11:06:00	Sinop Liman Sahası İçerisinde	0	0	D**	3,27	1	0	0,5	0,72	%0,08	0,46

Tablo 6 Karadeniz karyaya oturma olayları CMSI, Yoğunluk, Olasılık çarpımları ve Deniz kazalarının risk kategorilerinin belirlenmesi

CMSI	Yoğunluk	Olasılık	Risk	#	%	x 10000	LOG
0,5	0,72	0,00080000	0,00028800	1	%0,03	2,88	0,46
4	0,72	0,00080000	0,00230400	2	%0,23	23,04	1,36
0,5	0,72	0,00080000	0,00028800	3	%0,03	2,88	0,46
0,5	0,72	0,00080000	0,00028800	4	%0,03	2,88	0,46
0,5	0,72	0,00080000	0,00028800	5	%0,03	2,88	0,46



Karadeniz Ereğli Limanında 93733 GRT'lık geminin karaya oturmasının Logaritmik risk seviyesi 1,36 değeri ile şiddetli risk kategorisindedir, diğer karaya oturan deniz araçlarının logaritmik risk seviyesi 0,46 ile hafif risk kategorisindedir.

Batma olayları için risk analizi çalışması

2024 yılı içerisinde yaşanan batma olaylarında iki adet ölümlü kaza yaşanmıştır. İki deniz kazası da şiddetli risk kategorisine girmektedir.

AAKK Merkezi verilerine göre Karadeniz deniz alanında yaşanan 4 batma olayının 2025 yılı ve sonraki yıllar için oluşma olasılığı:

$4/6225 = 0,00064257$ (% 0,064) yaklaşık olarak on binde 6,4 'tür.

Karadeniz deniz alanında kaza olasılığında gerçeğe yakın risk değerlerini yakalamak amacıyla CMSI endeksi ve kaza olma olasılığı çarpılarak anılan bölgedeki risk değerine ulaşılmıştır. Batma türü olaylarda deniz trafik yoğunluğunun, kaza ile net bir ilgisi olmadığından deniz yoğunluğu katsayısı hesaba katılmamıştır. Bu nedenle yoğunluk katsayısı '1' olarak alınmıştır.

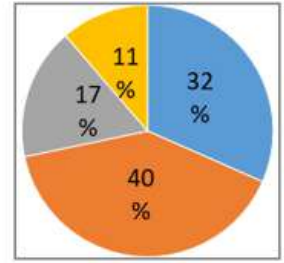
Tablo 7'de Türkiye Karadeniz sahillerinde oluşan batma olayları verilmiştir. Kazaya konu olan gemi adları gizlenmiştir. Kazaların şiddetime göre E katsayısı ve FII endeksleri belirlenmiş, bulunan değerler yoğunluk, olasılık ve CMSI endeksleri ile çarpılarak elde edilen rakam ile risk değerine ulaşılmış, bulunan risk değeri 10 000 ile çarpılıp logaritması alınarak her bir deniz kazası için "Risk şiddet seviyesi" tespit edilmiştir. Bulunan risk Kategorisi Tablo 6'da LOG kısmında ve Tablo5'in Risk Kategori sütununda verilmiştir.

Tablo 7 Karadeniz Türk A/K sahasında meydana gelen batma olayları

Olay Tarih ve Saati	Kaza Yeri	Yrl	Ölü	Gemi Adı	Gros	E	FII	CMSI	Olasılık	Risk
12/2/2024 16:01:00	Küçük karasu mevki	1	1	E**	4,5	1	11	6	%0,08	1,68
8/11/2024 11:03:00	Kastamonu Cide ilçesi Gideros Koyu	3	3	M**	4	1	33	17	%0,08	2,13
1/17/2024 13:00:00	Sakarya nehri çıkışı	2	0	S** M**	14,95	1	1	1	%0,08	0,9
1/13/2024 15:00:00	Kıyıköy Balıkçı Barınağı	0	0	K**D**	3,5	1	0	0,5	%0,08	0,6

Tablo 8 Karadeniz batma olayları CMSI, Yoğunluk, Olasılık çarpımları ve Deniz kazalarının risk kategorilerinin belirlenmesi

CMSI	Yğnlk	Olasılık	Risk	#	%	x 10000	LOG
6	1	0,0008000	0,0048000	1	%0,48	48,00	1,68
17	1	0,0008000	0,0136000	2	%1,36	136,00	2,13
1	1	0,0008000	0,0008000	3	%0,08	8,00	0,90
0,5	1	0,0008000	0,0004000	4	%0,04	4,00	0,60



Karadeniz açıklarında yaşanan üç batma olayı sonrasında iki ölümlü olay meydana gelmiş ve bunlar katastrofik/şiddetli risk kategorisinde yer almıştır. Bir olay Yüksek seviyeli Risk kategorisine girmiştir.

Su alma, Yangın olayları için risk analizi çalışması

2024 yılı içerisinde yaşanan su alma olaylarında bir adet kaza yaşanmıştır. AAKK Merkezi verilerine göre Karadeniz deniz alanında yaşanan bir su olayının 2025 yılı ve sonraki yıllar için oluşma olasılığı :

$1/6 \cdot 225 = 0,0001606$ (% 0,016) yaklaşık olarak on binde 2 'dir. 2024 yılı içerisinde yaşanan yangın olaylarında iki adet kaza yaşanmıştır. Eldeki verilere göre Karadeniz deniz alanında yangın olayının 2025 yılı ve sonraki yıllar içinde oluşma olasılığı :

$2/6225 = 0,0003212$ (% 0,032) yaklaşık olarak on binde 3 'tür

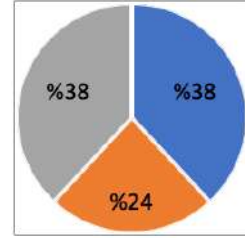
Karadeniz deniz alanında kaza olasılığında gerçeğe yakın risk değerlerini yakalamak amacıyla CMSI endeksi ve kaza olma olasılığı çarpılarak anılan bölgedeki risk değerine ulaşılmıştır. Su alma ve yangın türü olaylarda deniz trafik yoğunluğunun, kaza ile net bir ilgisi olmadığından deniz yoğunluğu katsayısı hesaba katılmamıştır. Bu nedenle yoğunluk katsayısı '1' olarak alınmıştır.

Tablo 9 Karadeniz Türk A/K sahasında meydana gelen yangın ve su alma olayları

Olay Tarih ve Saati	Kaza Yeri	Ölü	Yaralı		Gemi Adı	Gros	E	FII	CMSI	Olasılık	Risk Kategorisi	
16.9.2024 15:50:00	Sinop 40 nm açıkları	0	0		Su Alma	S**	1856	2	0	1	%0,064	0,81
27.4.2024 10:00:00	Ordu/ Ünye Karadeniz Tersanesi	0	0	Yn	Ş** T** Ş**	456,01	1	0	0,5	%0,032	0,51	
18.4.2024 02:45:00	Ordu Ünye	0	0	Yn	M** G**	2401	2	0	1	%0,032	0,81	

Tablo 10 Karadeniz Su alma ve Yangın olayları CMSI, Yoğunluk, Olasılık çarpımları ve Deniz kazalarının risk kategorilerinin belirlenmesi

CMSI	Olasılık	Risk	#	%	x 10000	LOG
1	0,00064000	0,00064	1	0,06%	6,40	0,81
0,5	0,00064000	0,00032	2	0,03%	3,20	0,51
1	0,00064000	0,00064	3	0,06%	6,40	0,81



Karadeniz’de yaşanan bir su alma ve bir yangın olayı sonrasında ölüm ve yaralanma meydana gelmemiş ve bir olay orta risk kategorisinde, iki olay yüksek seviye risk kategorisinde yer almıştır.

Çatma ve çatışma olayları için risk analizi çalışması

2024 yılı içerisinde iki adet çatma ve iki adet çatışma olayı yaşanmıştır. AAKK Merkezi verilerine göre Karadeniz deniz alanında yaşanan bir çatma olayının 2025 yılı ve sonraki yıllar için oluşma olasılığı:

$2/6 \cdot 225 = 0,0003212$ (% 0,032) yaklaşık olarak on binde 3 ‘tür

AAKK Merkezi verilerine göre Karadeniz deniz alanında çatışma olayının 2025 yılı ve sonraki yıllar içinde oluşma olasılığı:

$2/6225 = 0,0003212$ (% 0,032) yaklaşık olarak on binde 3 'tür.

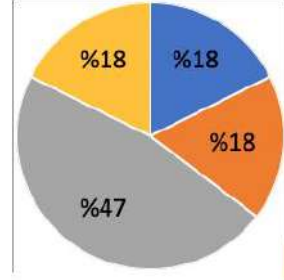
Önceki bölümden Karadeniz bölgesi için gemi trafik yoğunluk katsayısı 0,72 bulunmuştu. Karadeniz deniz alanında kaza olasılığında gerçeğe yakın risk değerlerini yakalamak amacıyla CMSI endeksi, Deniz trafik yoğunluğu katsayısı ve kaza olma olasılığı çarpılarak anılan bölgedeki risk değerine ulaşılmıştır.

Tablo 11 Karadeniz Türk A/K sahasında meydana gelen çatma ve çatışma olayları

Olay Tarihi	Kaza Yeri	Yr l	Öl ü	Gemi Adı	Gros	E	FII	CMSI	Yğnl k	Olasılı k	Risk Kateg ori
22.12.2024	Zonguld ak Demirleme bölgesi	0	0	S** A**	4974	2	0	1	0,72	%0,032	0,36
5.5.2024	Zonguld ak Ereğli Erdemir Limanı	0	0	S**	2453	2	0	1	0,72	%0,032	0,36
25.3.2024	Türkeli Demir Sahası	0	0	A**	43729	8	0	4	0,72	%0,032	0,96
11.1.2024	Hopa	0	0	S**	1945	2	0	1	0,72	%0,032	0,36

Tablo 12 Karadenizde yaşanan denizde Çatma ve Çatışma olayları CMSI, Yoğunluk, Olasılık çarpımları ve Deniz kazalarının risk kategorilerinin belirlenmesi

CMSI	Yoğunluk	Olasılık	Risk	#	%	x 10000	LOG
1	0,72	0,000320 00	0,0002304	1	0,02%	2,30	0,36
1	0,72	0,000320 00	0,0002304	2	0,02%	2,30	0,36
4	0,72	0,000320 00	0,0009216	3	0,09%	9,22	0,96
1	0,72	0,000320 00	0,0002304	4	0,02%	2,30	0,36



Karadeniz’de yaşanan iki çatma ve iki çatışma olayı sonrasında ölüm ve yaralanma meydana gelmemiştir. İstanbul Boğazı kuzeyi çıkışı batı tarafında kalan Türkeli demir sahasında 43 729 gross tonluk bir geminin çatışma kazası yaşanması neticesinde bir olay yüksek seviye risk kategorisinde, diğer olaylar düşük risk kategorisinde yer almıştır.

Karadeniz deniz alanında risk kagegorisi Ağır ve Şiddetli olan olayların konumları



Resim 7 Karadeniz Deniz alanında Ağır Seviye Risk ve Şiddetli/Katastrofik Seviye Riskli deniz kazalarının haritadaki konumları

Resim 7'de 2024 yılı içerisinde Karadenizde meydana gelen olaylar içerisinde Şiddetli/Katastrofik ve Yüksek seviye riskli grupta yer alan olaylar haritaya olay kodu ile birlikte işaretlenmiştir.

Ege Denizi için risk analizi çalışması ve riskli bölgelerin haritada belirtilmesi

Ege Denizi için 2024 yılı içerisinde meydana gelen Karaya oturma, Batma, Su alma, Çatma, Çatışma ve Yangın kategorilerindeki deniz kazaları için kaza şiddet hesaplamaları yapılmış, gemiler gross tonlarına göre tasnif edilmiş ve çıkan sonuçlara göre haritada kazaların yoğunlaştığı riskli bölgeler tayin edilmiştir. Haritada karışıklık olmaması amacıyla hafif ve orta kategorideki kazalara yer verilmemiştir, Ağır/Yüksek ve Katastrofik/Şiddetli kategorisindeki deniz kazaları, kaza oluş yerleriyle beraber belirtilmiştir.

Türkiye sahilinde konuşlu Ege Denizi Limanlarına 2024 yıllarında uğrayan gemi sayıları baz alınarak deniz kaza olasılığı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek amacıyla, 2024 yılı boyunca Türkiye limanlarına uğrayan tüm gemilerin toplamına bakılmış ve deniz trafik yoğunluğu ile uyumlu olup olmadıkları kontrol edilmiştir. Tablo 7'de 2024 yılına ait Türk Bayraklı ve yabancı bayraklı gemilerin Limanlara uğrama sayısı ve toplam groston değerleri verilmiştir.

Denizcilik Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan yıllık istatistik bilgilerine göre; 20 994 Türk Bayraklı, 39 600 Yabancı bayraklı toplamda 60 594 gemi Türkiye'deki limanlarda yükleme/boşaltma yapmış, 2024 yılı içerisinde toplamda 902 445 224 grostonluk yük, bu limanlardan elleçlenmiştir. Bu değerler Tablo 13'te verilmektedir.

Tablo 13 Ege Denizi limanlarına uğrayan gemiler ve yük elleçleme tonajları

Limanlarımıza uğrayan gemi istatistikleri, 2024

Calling vessel statistics at Turkish ports, 2024

Ay / Month	Toplam Uğrayan Gemi Sayısı / Total Number of Calling Vessel					
	Türk Bayraklı / Turkish Flag		Yabancı Bayraklı / Foreign Flag		Toplam / Total	
	Gemi Sayısı / No. of Ship	Gros Ton / Gross Tonnage	Gemi Sayısı / No. of Ship	Gros Ton / Gross Tonnage	Gemi Sayısı / No. of Ship	Gros Ton / Gross Tonnage
Ocak / January	1.398	10.186.298	2.954	57.200.830	4.352	67.387.128
Şubat / February	1.435	10.111.463	3.097	58.379.845	4.532	68.491.307
Mart / March	1.510	11.022.474	3.327	62.431.609	4.837	73.454.083
Nisan / April	1.429	10.395.788	3.331	63.212.607	4.760	73.608.395
Mayıs / May	1.722	11.005.592	3.570	67.671.576	5.292	78.677.169
Haziran / June	2.025	11.564.126	3.519	66.779.609	5.544	78.343.734
Temmuz / July	2.151	11.566.924	3.513	68.391.101	5.664	79.958.025
Ağustos / August	2.332	11.603.958	3.535	68.103.540	5.867	79.707.497
Eylül / September	2.175	12.088.888	3.294	62.746.855	5.469	74.835.743
Ekim / October	1.944	11.134.939	3.453	71.048.420	5.397	82.183.359
Kasım / November	1.410	11.063.377	2.965	60.836.124	4.375	71.899.501
Aralık / December	1.463	10.927.230	3.042	62.972.055	4.505	73.899.285
Toplam / Total	20.994	132.671.057	39.600	769.774.170	60.594	902.445.227

Denizcilik Genel Müdürlüğü-Deniz Ticaretini Geliştirme Daire Başkanlığı

(General Directorate for Maritime Affairs - Department of Merchant Trade Development)

03.02.2025 - 11:00:00

Ege Denizi limanları uğraklı gemi sayıları

Ege Denizi limanları uğraklı gemi sayılarını bulmak amacıyla, 2024 yılı boyunca Ege Denizi limanlarına uğrayan tüm gemilerin toplamına bakılmış ve deniz trafik yoğunluğu ile uyumlu olup olmadıkları kontrol edilmiştir. Tablo 14’te 2024 yılına ait Türk Bayraklı ve yabancı bayraklı gemilerin imanlara uğrama sayısı ve toplam groston değerleri verilmiştir.

Eldeki verilerden 7 164 Türk Bayraklı, 9 822 Yabancı bayraklı toplamda 16 986 gemi tabloda verilen limanlarda yükleme/boşaltma yapmış, 2024 yılı içerisinde toplamda 203 931 271 Gross tonluk yük, bu limanlardan elleçlenmiştir. Ege Denizi risk hesaplamalarında kullanılmak üzere olasılık hesaplamaları için 16 986 değeri baz alınmıştır.

Tablo 14 Ege Denizi limanlarına uğrayan gemi sayıları ve gross tonaj bilgileri

Liman Başkanlığı / Harbour Master	Toplam Uğrayan Gemi Sayısı / Total Number of Calling Vessel					
	Türk Bayraklı / Turkish Flag		Yabancı Bayraklı / Foreign Flag		Toplam / Total	
	Gemi Sayısı / No. of Ship	Gross Ton / Gross Tonnage	Gemi Sayısı / No. of Ship	Gross Ton / Gross Tonnage	Gemi Sayısı / No. of Ship	Gross Ton / Gross Tonnage
Aliağa	1,579	15,597,034	4,507	101,196,013	6,086	116,793,047
Ayvalık	1,114	452,913	0	0	1,114	452,913
Bodrum	1,709	658,812	1,158	5,613,706	2,867	6,272,518
Çeşme	1,458	5,338,016	942	2,418,493	2,410	7,756,509
Dikili	2	6,463	187	1,026,393	189	1,032,856
Enez	3	2,342	10	1,155,081	13	1,157,423
Gocek	29	57,942	2	4,596	31	62,538
Güllük	80	911,172	322	3,313,720	402	4,224,892
İzmir	254	3,327,434	1,275	21,343,995	1,529	24,671,429
Karabiga	368	930,703	418	8,194,546	786	9,125,249
Kuşadası	558	169,976	1,001	32,211,922	1,559	32,381,898
Toplam / Total	7,164	27,452,807	9,822	176,478,465	16,986	203,931,271

Denizcilik Genel Müdürlüğü-Deniz Ticaretini Geliştirme Daire Başkanlığı
(General Directorate for Maritime Affairs -Department of Merchant Trade Development)
03.02.2025 - 11:00:00

Karaya oturma olayları için Risk analizi çalışması:

2024 yılı içerisinde yaşanan karaya oturma olaylarında ölüm ve yaralanma yaşanmamıştır. Bir adet şiddetli büyük olay yaşanmıştır.

AAKKM’den alınan verilere göre Karadeniz deniz alanında 2024 yılı içerisinde 7 Karaya oturma olayı meydana gelmiştir. 2025 yılı ve sonraki yıllar için gemilerin karaya oturma olasılığı hesaplanacak olursa bu oran:

$7/16986= 0,00041210$ yaklaşık olarak on binde 4’tür.

Önceki bölümden Ege denizi bölgesi için gemi trafik yoğunluk katsayısı 1,36 bulunmuştu. Ege deniz alanında kaza olasılığında gerçeğe yakın risk değerlerini yakalamak amacıyla CMSI endeksi, Deniz trafik yoğunluğu katsayısı ve kaza olma olasılığı çarpılarak anılan bölgedeki risk değerine ulaşılmıştır.

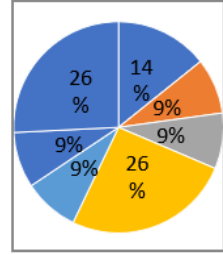
Tablo 15’te Türkiye Ege sahillerinde oluşan karaya oturma olayları verilmiştir. Kazaya konu olan gemi adları gizlenmiştir. Tablo 16’da Ege denizinde yaşanan karaya oturma olayları CMSI, Yoğunluk, Olasılık çarpımları ve hesaplanan değerlere göre kategorileri verilmiştir.

Tablo 15 Ege denizi Karaya oturma kategorisi deniz kazaları

Olay Tarih ve Saati	Kaza Yeri	Ölü	Yr1	Gemi Adı	Gros	E	FII	CMSI	Yoğunluk	Olasılık	Risk
26.4.2024 16:30:00	Seferihisar Sığacık Ekmeksiz Plajı	0	0	E**	11,67	1	0	0,5	1,36	%0,0412	0,45
9.1.2024 18:21:00	Konak iskelesi	0	3	M**	330	1	7	4	1,36	%0,0412	1,35
27.12.2024 02:16:00	Tavşan Adası güneydoğusu	0	0	G**	997	2	0	1	1,36	%0,0412	0,75
30.8.2024 16:07:00	Balikesir Ayvalık	0	0	H**	4	1	0	0,5	1,36	%0,0412	0,45
22.6.2024 11:40:00	Ayvalık Patriçya koyu Kırlangıç kayalığı mevkii	0	0	S**	6	1	0	0,5	1,36	%0,0412	0,45
5.5.2024 15:53:00	İzmir Narlıdere, Yenikale 0.5 NM Açıkları	0	0	M**	55487	8	0	4	1,36	%0,0412	1,35
27.4.2024 07:42:00	Ayvalık Patriça Ayışığı Manastırı mevkii önleri	0	0	S**	2,75	1	0	0,5	1,36	%0,0412	0,45

Tablo 16 Ege denizinde yaşanan karaya oturma olayları CMSI, Yoğunluk, Olasılık çarpımları ve Deniz kazalarının risk kategorilerinin belirlenmesi

CMSI	Yoğunluk	Olasılık	Risk	#	%	x 10000	LOG
1	1,36	0,00041200	0,00056032	1	0,06%	5,60	0,75
0,5	1,36	0,00041200	0,00028016	2	0,03%	2,80	0,45
0,5	1,36	0,00041200	0,00028016	3	0,03%	2,80	0,45
4	1,36	0,00041200	0,00224128	4	0,22%	22,41	1,35
0,5	1,36	0,00041200	0,00028016	5	0,03%	2,80	0,45
0,5	1,36	0,00041200	0,00028016	6	0,03%	2,80	0,45
4	1,36	0,00041200	0,00224128	7	0,22%	22,41	1,35



İzmir Narlıdere Yenikale açıklarında 55 487 gross tonluk geminin karaya oturmasının Logaritmik risk seviyesi 1,35 değeri ile şiddetli risk kategorisindedir, gross tonajı düşük ancak olay sonunda iki ağır yaralanma ve bir hafif yaralanma meydana gelmesiyle oluşan logaritmik risk seviyesi 1,35 ile şiddetli risk kategorisindedir.

Batma ve su alma olayları için risk analizi çalışması

2024 yılı içerisinde yaşanan batma ve su alma olaylarında ölüm ve yaralanma meydana gelmiştir. AAKKM'den alınan verilere göre Ege deniz alanında 2024 yılı içerisinde bir batma olayı meydana gelmiştir. 2025 yılı ve sonraki yıllar için gemilerin batma olasılığı hesaplanacak olursa bu oran: $1/16986 = 0,00005887$ yaklaşık olarak on binde 0,6'dır. AAKKM'den alınan verilere göre Ege deniz alanında 2024 yılı içerisinde beş adet su alma olayı meydana gelmiştir. 2025 yılı ve

sonraki yıllar için gemilerin su alma olasılığı hesaplandığında bu oran: $5/16986=0,00029436$ yaklaşık olarak on binde 3'tür.

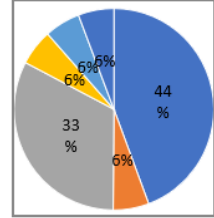
Tablo 17'de Türkiye Ege sahillerinde oluşan su alma ve batma olayları verilmiştir. Kazaya konu olan gemi adları gizlenmiştir. Tablo 18'de Ege denizinde yaşanan karaya oturma olayları CMSI, Yoğunluk, Olasılık çarpımları ve hesaplanan değerlere göre kategorileri verilmiştir.

Tablo 17 Ege denizi Karaya oturma kategorisi deniz kazaları

Olay Tarih ve Saati	Kaza Yeri	Öl ü	Yr l	Kaza Türü	Gemi Adı	Gros	E	FI I	CMS I	Olasılık	Ris k
30.1.2024 02:03:00	İzmir ili Dikili ilçesi Madra Çayı açıkları	5	3	Batma	O** İ**	26,72	1	65	33	%0,006	1,29
29.8.2024 19:20:00	Ören Türkevleri açıkları	0	0	Su Alma	C**	12,98	1	0	0,5	%0,0294	0,17
6.8.2024 19:30:00	İzmir -Karaburun	0	1	Su Alma	Ö** K**	9,25	1	5	3	%0,0294	0,95
20.7.2024 13:30:00	Patmos Adası'nın yaklaşık 1,5 nm doğusu	0	0	Su Alma	S**G* *	135,95	1	0	0,5	%0,0294	0,17
18.6.2024 19:10:00	Millipark 1. Koy	0	0	Su Alma	D**N*	9,65	1	0	0,5	%0,0294	0,17
27.5.2024 23:27:00	Aydın Didim	0	0	Su Alma	İ** E**	6,75	1	0	0,5	%0,0294	0,17

Tablo 18 Ege denizinde yaşanan batma ve su alma olayları CMSI, Yoğunluk, Olasılık çarpımları ve ilişkili deniz kazaları risk kategorileri

CMSI	Olasılık	Risk	#	%	x 10000	LOG
33	0,00005887	0,00194271	1	0,19%	19,43	1,29
0,5	0,00029436	0,00014718	2	0,01%	1,47	0,17
3	0,00029436	0,00088308	3	0,09%	8,83	0,95
0,5	0,00029436	0,00014718	4	0,01%	1,47	0,17
0,5	0,00029436	0,00014718	5	0,01%	1,47	0,17
0,5	0,00029436	0,00014718	6	0,01%	1,47	0,17



Ege denizinde 2024 yılı içerisinde meydana gelen batma ve su alma olayları incelendiğinde, İzmir ili Dikili açıklarında meydana gelen beş ölüm ve üç ağır yaralanma yaşanan olayın Şiddetli/Katastrofik risk kategorisine girdiği, İzmir-Karaburun açıklarında meydana gelen bir ağır yaralanma yaşanan olayın yüksek/ağır seviye risk kategorisine girdiği görülmüştür.

Çatma ve çatışma olayları için risk analizi çalışması:

2024 yılı içerisinde yaşanan çatma ve çatışma olaylarında ölüm meydana gelmemiş, bir yaralanmalı olay meydana gelmiştir. AAKKM'den alınan verilere göre Ege deniz alanında 2024 yılı içerisinde üç çatışma olayı meydana gelmiştir. 2025 yılı ve sonraki yıllar için gemilerin çatışma olasılığı hesaplanacak olursa bu oran: $3/16986 = 0,0001766$ yaklaşık olarak on binde 2'dir.

Tablo 19'da Türkiye Ege sahillerinde oluşan çatma ve çatışma olayları verilmiştir. Kazaya konu olan gemi adları gizlenmiştir. Tablo 20'de Ege denizinde yaşanan karaya oturma olayları CMSI, Yoğunluk, Olasılık çarpımları ve hesaplanan değerlere göre kategorileri verilmiştir.

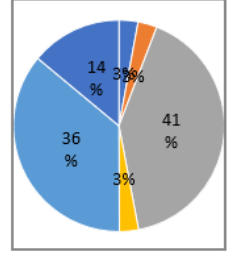
Önceki bölümden Ege denizi bölgesi için gemi trafik yoğunluk katsayısı 1,36 bulunmuştu. Ege deniz alanında kaza olasılığında gerçeğe yakın risk değerlerini yakalamak amacıyla CMSI endeksi, Deniz trafik yoğunluğu katsayısı ve kaza olma olasılığı çarpılarak anılan bölgedeki risk değerine ulaşılmıştır.

Tablo 19 Ege denizi çatma ve çatışma kategorisi deniz kazaları

Olay Tarih ve Saati	Kaza Yeri	Ölü	Yar	Kaza Türü	Gemi Adı	Gros	E	FII	CMSI	Yoğunluk	Olasılık	Risk
11.7.2024 11:30:00	Gökçeada kuzeyi	0	0	Çtşm	K**	4,52	1	0	0,5	1,36	%0,0177	0,08
17.3.2024 21:00:00	Didim-akbük açıkları	0	0	Çtşm	D**	10,25	1	0	0,5	1,36	%0,0177	0,08
7.7.2024 20:55:00	Alaçatı/Çeşme	0	2	Çtşm	H**	4,75	1	10	5,5	1,36	%0,0177	1,12
25.5.2024 23:45:00	Sakız Adası batısı	0	0	Çtm	S**	21,58	1	0	0,5	1,36	%0,0177	0,08
15.4.2024 12:00:00	Kuşadası Egeport Yolcu Limanı	0	0	Çtm	C**J**	55877	8	0	4	1,36	%0,0177	0,98
19.3.2024 22:20:00	İzmir liman çıkışı	0	0	Çtm	E**	1532	2	0	1	1,36	%0,0177	0,38

Tablo 20 Ege denizinde yaşanan çatma ve çatışma olayları CMSI, Yoğunluk, Olasılık çarpımları ve ilişkili deniz kazaları risk kategorileri

CMSI	Yoğunluk	Olasılık	Risk	#	%	x 10000	LOG
0,5	1,36	0,0001766	0,000120088	1	0,01%	1,20	0,08
0,5	1,36	0,0001766	0,000120088	2	0,01%	1,20	0,08
5,5	1,36	0,0001766	0,001320968	3	0,13%	13,21	1,12
0,5	1,36	0,0001766	0,000120088	4	0,01%	1,20	0,08
4	1,36	0,0001766	0,000960704	5	0,10%	9,61	0,98
1	1,36	0,0001766	0,000240176	6	0,02%	2,40	0,38



Ege denizinde 2024 yılı içerisinde meydana gelen çatma ve çatışma olayları incelendiğinde, İzmir ili Çeşme Alaçatıda meydana ve iki kişinin ağır yaralanması ile sonuçlanan olayın Şiddetli/Katastrofik risk kategorisine girdiği, Kuşadası Egeport limanında meydana gelen rıhtıma çarpma olayının yüksek/ağır seviye risk kategorisine girdiği görülmüştür.

Yangın olayları için risk analizi çalışması

2024 yılı içerisinde yaşanan yangın olaylarında ölüm meydana gelmemiş ancak iki yaralanmalı olay meydana gelmiştir. AAKKM'den alınan verilere göre Ege deniz alanında 2024 yılı içerisinde yedi yangın olayı meydana gelmiştir. 2025 yılı ve sonraki yıllar için gemilerin çatışma olasılığı hesaplanacak olursa bu oran:

$7/16986 = 0,0004121$ yaklaşık olarak on binde 4'tür.

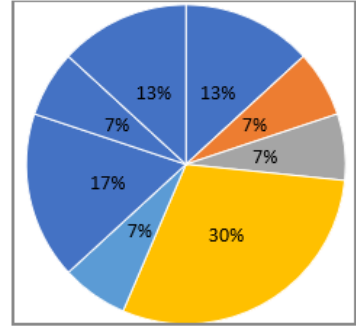
Tablo 21'de Türkiye A/K sahası içinde kalan Ege denizinde oluşan yangın olayları verilmiştir. Kazaya konu olan gemi adları gizlenmiştir. Tablo 22'de Ege denizinde yaşanan karaya oturma olayları CMSI, olasılık çarpımları ve hesaplanan değerlere göre kategorileri verilmiştir. Yangın olaylarının deniz yoğunluğu ile ilgisi olmadığından dolayı çarpan değeri "1" olarak alınmıştır.

Tablo 21 Ege denizi çatma ve çatışma kategorisi deniz kazaları

Tarih-Saat	Yer	Ölü	Yrl	Gemi adı	Gross	E	FII	CMSI	Olasılık	Risk
8.11.2024 04:30:00	Aliğa Habaş iskelesi	0	0	Ü**	3551	2	0	1	0,000412	0,61
3.11.2024 13:22:00	Çeşme-Ildır	0	0	A**	4,85	1	0	0,5	0,000412	0,31
2.8.2024 21:00:00	Bodrum	0	0	S**	4,32	1	0	0,5	0,000412	0,31
28.7.2024 21:45:00	Seferihisar Tenos Marina	3	0	D**	5,14	1	11	6	0,000412	1,39
28.5.2024 01:01:00	İzmir Bulamaç Adası	0	0	B**B**	7,68	1	0	0,5	0,000412	0,31
1.4.2024 17:50:00	Kuşadası Setur Marina	2	0	I**	3,24	1	2	1,5	0,000412	0,79
3.3.2024 19:00:00	Urla	0	0	M** M**	1,82	1	0	0,5	0,000412	0,31
8.11.2024 04:30:00	Aliğa Habaş iskelesi	0	0	Ü**	3551	2	0	1	0,000412	0,61

Tablo 22 Ege denizinde yaşanan yangın olayları CMSI, olasılık çarpımları ve ilişkili deniz kazaları risk kategorileri

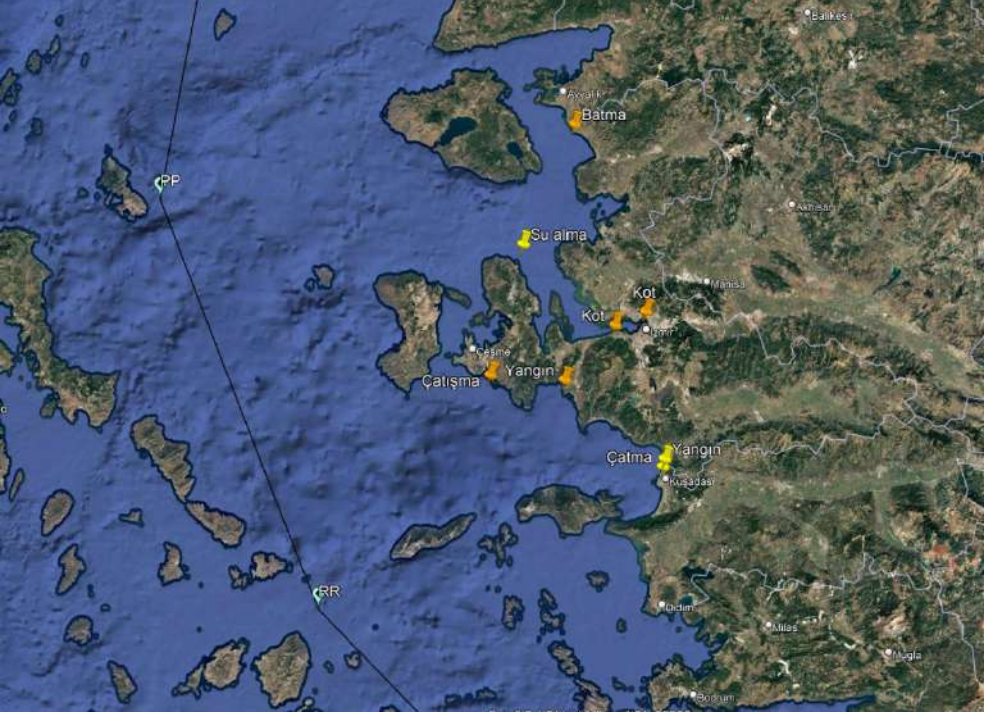
CMSI	Olasılık	Risk	#	%	x 10000	LOG
1	0,000412	0,000412	1	0,04%	4,12	0,61
0,5	0,000412	0,000206	2	0,02%	2,06	0,31
0,5	0,000412	0,000206	3	0,02%	2,06	0,31
6	0,000412	0,002472	4	0,25%	24,72	1,39
0,5	0,000412	0,000206	5	0,02%	2,06	0,31
1,5	0,000412	0,000618	6	0,06%	6,18	0,79
0,5	0,000412	0,000206	7	0,02%	2,06	0,31
1	0,000412	0,000412	8	0,04%	4,12	0,61



Ege Denizinde yaşanan sekiz yangın olayı sonrasında bir ağır yaralanma yaşanan olay meydana gelmiştir. Bu olayda iki kazazede ağır yaralanmış bir kazazede hafif yaralanmıştır. Bahse konu bu olay şiddetli/Katastrofik seviye risk kategorisinde, iki yaralanma ile sonuçlanan diğer bir olay Yüksek/ağır seviye risk kategorisinde yer almıştır.

Riskli bölgelerin haritada belirtilmesi

Resim 8'de 2024 yılı içerisinde Ege denizinde meydana gelen ve Şiddetli/Katastrofik ve Ağır/Yüksek seviye riskli gruba yer alan olaylar haritaya olay kodu ile birlikte işaretlenmiştir.



Resim 8 Ege deniz alanında Ağır Seviye Risk ve Şiddetli/Katastrofik Seviye Riskli deniz kazalarının haritadaki konumları

Akdeniz için risk analizi çalışması ve riskli bölgelerin haritada belirtilmesi

Akdeniz için 2024 yılı içerisinde meydana gelen Karaya oturma, Batma, Su alma, Çatma, Çatışma ve Yangın kategorilerindeki deniz kazaları için kaza şiddet hesaplamaları yapılmış, gemiler gross tonlarına göre tasnif edilmiş ve çıkan sonuçlara göre haritada kazaların yoğunlaştığı riskli bölgeler tayin edilmiştir. Haritada karışıklık olmaması amacıyla hafif ve orta kategoride bulunan riskli kazalara yer verilmemiştir, Ağır/Yüksek ve Katastrofik/Şiddetli kategorisindeki deniz kazaları, kaza oluş yerleriyle beraber belirtilmiştir.

Akdenizde yıllık gemi geçiş sayıları hesaplamak Boğazlar ve Marmara denizi kadar net bir şekilde yapılamadığından, Türkiye sahilinde konuşlu Akdeniz limanlarına 2024 yıllarında uğrayan gemi sayıları baz alınarak deniz kaza olasılığı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek amacıyla, 2024 yılı boyunca Türkiye limanlarına uğrayan tüm gemilerin toplamına bakılmış ve deniz trafik yoğunluğu ile uyumlu olup olmadıkları kontrol edilmiştir. Tablo 23'te 2024 yılına ait Türk Bayraklı ve yabancı bayraklı gemilerin Limanlara uğrama sayısı ve toplam groston değerleri verilmiştir.

Denizcilik Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan yıllık istatistik bilgilerine göre; 20 994 Türk Bayraklı, 39 600 Yabancı bayraklı toplamda 60

594 gemi Türkiye'deki limanlarda yükleme/boşaltma yapmış, 2024 yılı içerisinde toplamda 902 445 224 grostonluk yük, bu limanlardan elleçlenmiştir.

Tablo 23 Akdeniz limanlarına uğrayan gemiler ve yük elleçleme tonajları

Limanlarımıza uğrayan gemi istatistikleri, 2024

Calling vessel statistics at Turkish ports, 2024

Ay / Month	Toplam Uğrayan Gemi Sayısı / Total Number of Calling Vessel					
	Türk Bayraklı / Turkish Flag		Yabancı Bayraklı / Foreign Flag		Toplam / Total	
	Gemi Sayısı / No. of Ship	Gros Ton / Gross Tonnage	Gemi Sayısı / No. of Ship	Gros Ton / Gross Tonnage	Gemi Sayısı / No. of Ship	Gros Ton / Gross Tonnage
Ocak / January	1.398	10.186.298	2.954	57.200.830	4.352	67.387.128
Şubat / February	1.435	10.111.463	3.097	58.379.845	4.532	68.491.307
Mart / March	1.510	11.022.474	3.327	62.431.609	4.837	73.454.083
Nisan / April	1.429	10.395.788	3.331	63.212.607	4.760	73.608.395
Mayıs / May	1.722	11.005.592	3.570	67.671.576	5.292	78.677.169
Haziran / June	2.025	11.564.126	3.519	66.779.609	5.544	78.343.734
Temmuz / July	2.151	11.566.924	3.513	68.391.101	5.664	79.958.025
Ağustos / August	2.332	11.603.958	3.535	68.103.540	5.867	79.707.497
Eylül / September	2.175	12.088.888	3.294	62.746.855	5.469	74.835.743
Ekim / October	1.944	11.134.939	3.453	71.048.420	5.397	82.183.359
Kasım / November	1.410	11.063.377	2.965	60.836.124	4.375	71.899.501
Aralık / December	1.463	10.927.230	3.042	62.972.055	4.505	73.899.285
Toplam / Total	20.994	132.671.057	39.600	769.774.170	60.594	902.445.227

Denizcilik Genel Müdürlüğü-Deniz Ticaretini Geliştirme Daire Başkanlığı

(General Directorate for Maritime Affairs -Department of Merchant Trade Development)

03.02.2025 - 11:00:00

Akdeniz limanları uğraklı gemi sayıları

Akdeniz limanları uğraklı gemi sayılarını bulmak amacıyla, 2024 yılı boyunca Akdeniz limanlarına uğrayan tüm gemilerin toplamına bakılmış ve deniz trafik yoğunluğu ile uyumlu olup olmadıkları kontrol edilmiştir. Tablo 24'te 2024 yılına ait Türk Bayraklı ve yabancı bayraklı gemilerin limanlara uğrama sayısı ve toplam groston değerleri verilmiştir.

Eldeki verilerden 1 904 Türk Bayraklı, 6 607 Yabancı bayraklı toplamda 8 581 gemi tabloda verilen limanlarda yükleme/boşaltma yapmış, 2024 yılı içerisinde toplamda 132 633 120 gross tonluk yük, bu limanlardan elleçlenmiştir. Akdeniz risk hesaplamalarında kullanılmak üzere olasılık hesaplamaları için 8 581 değeri baz alınmıştır.

Tablo 24 Akdeniz limanlarına uğrayan gemi sayıları ve gross tonaj bilgileri

A	B	C	D	E	F	G
Liman başkanlıklarında limanlarımıza uğrayan gemi istatistikleri, 2024						
Calling vessel statistics at Turkish ports according to the harbour masters area of jurisdiction, 2024						
Liman Başkanlığı / Harbour Master	Toplam Uğrayan Gemi Sayısı / Total Number of Calling Vessel					
	Türk Bayraklı / Turkish Flag		Yabancı Bayraklı / Foreign Flag		Toplam / Total	
	Gemi Sayısı / No. of Ship	Gros Ton / Gross Tonnage	Gemi Sayısı / No. of Ship	Gros Ton / Gross Tonnage	Gemi Sayısı / No. of Ship	Gros Ton / Gross Tonnage
Alanya	0	0	49	1,806,624	49	1,806,624
Anamur	64	33,024	2	11,071	66	44,095
Antalya	287	3,640,979	200	3,108,803	487	6,749,782
Ceyhan	65	542,382	988	32,410,340	1,053	32,952,722
Fethiye	0	0	314	223,018	314	223,018
Finike	0	0	1	4,362	1	4,362
Göcek	29	57,942	2	4,596	31	62,538
Kaş	249	37,584	0	0	249	37,584
Marmaris	465	234,477	444	3,547,712	909	3,782,189
Mersin	679	10,514,715	3,472	67,695,144	4,151	78,209,859
Taşucu	66	94,733	1,205	8,665,614	1,271	8,760,347
Toplam / Total	1,904	15,155,836	6,677	117,477,284	8,581	132,633,120

Denizcilik Genel Müdürlüğü-Deniz Ticaretini Geliştirme Daire Başkanlığı
(General Directorate for Maritime Affairs - Department of Merchant Trade Development)
03.02.2025 - 11:00:00

Karaya oturma olayları için Risk analizi çalışması:

2024 yılı içerisinde yaşanan karaya oturma olaylarında ölüm ve yaralanma yaşanmamıştır. Bir adet şiddetli büyük olay yaşanmıştır. AAKKM'den alınan verilere göre Akdeniz deniz alanında 2024 yılı içerisinde 5 Karaya oturma olayı meydana gelmiştir. 2025 yılı ve sonraki yıllar için gemilerin karaya oturma olasılığı hesaplanacak olursa bu oran: $5/8.581 = 0,00058268$ yaklaşık olarak on binde 6'dır.

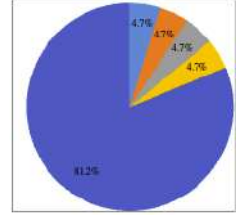
Önceki bölümden Akdeniz bölgesi için gemi trafik yoğunluk katsayısı 0,39 bulunmuştu. Akdeniz bölgesi kaza olasılığında gerçeğe yakın risk değerlerini yakalamak amacıyla CMSI endeksi, Deniz trafik yoğunluğu katsayısı ve kaza olma olasılığı çarpılarak anılan bölgedeki risk değerine ulaşılmıştır. Tablo 25 'te Türkiye Akdeniz sahillerinde oluşan karaya oturma olayları verilmiştir. Kazaya konu olan gemi adları gizlenmiştir.

Tablo 25 Akdeniz karaya oturma kategorisi deniz kazaları

Olay Tarih ve Saati	Kaza Yeri	Ölü	Yıl	Gemi adı	Gross	E	FII	CMSI	Olasılık	Risk
14.12.2024 10:00:00	Kemer Ayışığı koyu	0	0	M**	237.98	1	0	0,5	%0,0412	0,06
19.10.2024 19:49:00	Göcek Kurtoğlu burnu açıkları	0	0	S** D**	3.98	1	0	0,5	%0,0412	0,06
17.9.2024 15:30:00	Kaş Liman Ağzı bölgesi	0	0	G**	35	1	0	0,5	%0,0412	0,06
28.8.2024 06:42:00	Kumluca ilçesi Adrasan Koyu	0	0	S**	14.2	1	0	0,5	%0,0412	0,06
24.4.2024 02:23:00	İskenderun Global Terminali	0	0	M**A**	29295	8	0	4	%0,0412	0,96

Tablo 26 Akdenizde yaşanan karaya oturma olayları CMSI, Yoğunluk, Olasılık çarpımları ve Deniz kazalarının risk kategorilerinin belirlenmesi

AKDENİZ_RA_KOT								
CMSI	Yoğunluk	Olasılık	Risk	#	%	x 10000	LOG	
0.5	0.39	0.00058268	0.0001136226	1	0.01%	1.14	0.06	
0.5	0.39	0.00058268	0.0001136226	2	0.01%	1.14	0.06	
0.5	0.39	0.00058268	0.0001136226	3	0.01%	1.14	0.06	
0.5	0.39	0.00058268	0.0001136226	4	0.01%	1.14	0.06	
4	0.39	0.00058268	0.0009089808	5	0.09%	9.09	0.96	



İskenderun Global Terminalinde 29 295 gross tonluk geminin karaya oturması olayının Logaritmik risk seviyesi 0,96 değeri ile yüksek/ağır risk kategorisindedir, diğer olaylar hafif risk kategorisinde yer almıştır.

Batma ve su alma olayları için risk analizi çalışması

2024 yılı içerisinde yaşanan batma ve su alma olaylarında ölüm ve yaralanma meydana gelmemiştir. AAKKM'den alınan verilere göre Akdeniz alanında 2024 yılı içerisinde dört batma olayı meydana gelmiştir. 2025 yılı ve sonraki yıllar için gemilerin batma ve su alma olasılığı hesaplanacak olursa bu oran:

$$4/8.581 = 0,00046615 \text{ yaklaşık olarak on binde 5'tir.}$$

AAKKM'den alınan verilere göre Akdeniz deniz alanında 2024 yılı içerisinde dört su alma olayı meydana gelmiştir. 2025 yılı ve sonraki yıllar için gemilerin su alma olasılığı hesaplanacak olursa bu oran: $4/8.581 = 0,00046615$ yaklaşık olarak on binde 5'tir.

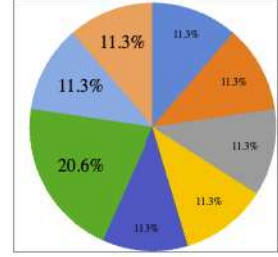
Batma türü olaylarda deniz yoğunluğunun kaza ile net bir ilgisi olmadığından deniz yoğunluğu katsayısı hesaba katılmamıştır sonucu etkilememsi için katsayı değeri '1' alınmıştır. Tablo 27’de Türkiye Akdeniz bölgesinde oluşan su alma ve batma olayları verilmiştir. Kazaya konu olan gemi adları gizlenmiştir. Kazaya konu olan gemi adları gizlenmiştir. Tablo 28’de Akdeniz’de yaşanan su alma ve batma olayları olayları CMSI, olasılık çarpımları ve hesaplanan değerlere göre risk kategorileri verilmiştir.

Tablo 27 Akdeniz su alma ve batma kategorisi deniz kazaları

Olay Tarih ve Saati	Kaza Yeri	Ölü	Yrl	Kaza Türü	Gemi Adı	Gros	E	FII	CMSI	Yoğunluk	Risk Kategorisi
10.12.2024 10:00:00	Marmaris Ataköy Marina	0	0	Batma	N**	5.5	1	0	0,5	%0,005	0,37
17.10.2024 13:40:00	BOĞSAK mevkii	0	0	Batma	A**	5.7	1	0	0,5	%0,005	0,37
24.4.2024 17:35:00	Muğla Marmaris	0	0	Batma	P**	51	1	0	0,5	%0,005	0,37
21.4.2024 11:00:00	Antalya Belkıs Otel İskelesi	0	0	Batma	S**	40.32	1	0	0,5	%0,005	0,37
13.12.2024 13:46:00	Kaş Liman Başkanlığı	0	0	Su Alma	A**	32.01	1	0	0,5	%0,005	0,37
1.12.2024 13:38:00	Kaş Acıkları	0	0	Su Alma	S** j**	4109	2	0	1	%0,005	0,67
15.9.2024 07:49:00	Fethiye Kızılada önleri	0	0	Su Alma	V**	3.45	1	0	0,5	%0,005	0,37
18.1.2024 18:16:00	Taşucu İncekum Burnu mevkii 7 mil açığı	0	0	Su Alma	M**	3.39	1	0	0,5	%0,005	0,37

Tablo 29 Akdeniz’de su alma ve batma olayları CMSI, Yoğunluk, Olasılık çarpımları ve Deniz kazalarının risk kategorileri

AKDENİZ_RA_Batma / Su Alma							
CMSI	Yğnlk	Olasılık	Risk	#	%	x 10000	LOG
0.5	1	0.00046615	0.000233075	1	0.02%	2.33	0.37
0.5	1	0.00046615	0.000233075	2	0.02%	2.33	0.37
0.5	1	0.00046615	0.000233075	3	0.02%	2.33	0.37
0.5	1	0.00046615	0.000233075	4	0.02%	2.33	0.37
0.5	1	0.00046615	0.000233075	5	0.02%	2.33	0.37
1	1	0.00046615	0.00046615	6	0.05%	4.66	0.67
0.5	1	0.00046615	0.000233075	7	0.02%	2.33	0.37
0.5	1	0.00046615	0.000233075	8	0.02%	2.33	0.37



Akdenizde 2024 yılı içerisinde meydana gelen batma ve su alma olayları incelendiğinde, Kaş açıklarında 4109 gross tonluk bir geminin su alması olayının orta risk kategorisine girdiği, diğer yedi olayın hafif risk kategorisinde olduğu görülmüştür.

Çatma, Çatışma olayları için risk analizi çalışması

2024 yılı içerisinde yaşanan Akdeniz’de meydana gelen çatma ve çatışma kazaları kategorisinde iki ölümlü olay meydana gelmemiş, bir ölümlü olayın yaşandığı olayda bir de ağır yaralanma durumu yaşanmıştır. AAKKM’den alınan verilere göre Akdeniz bölgesinde 2024 yılı içerisinde dört çatışma olayı meydana gelmiştir. 2025 yılı ve sonraki yıllar için gemilerin çatışma

olasılığı hesaplanacak olursa bu oran:

$4/8 \cdot 581 = 0,00046615$ yaklaşık olarak on binde 5’tir.

AAKKM’den alınan verilere göre Akdeniz bölgesinde 2024 yılı içerisinde bir adet çatma olayı meydana gelmiştir. 2025 yılı ve sonraki yıllar için gemilerin çatma türünde kaza olasılığı hesaplanacak olursa bu oran:

$1/8 \cdot 581 = 0,00011654$ yaklaşık olarak on binde 1’dir.

Tablo 29’da Türkiye Arama kurtarma sahası Akdeniz bölgesinde oluşan çatma ve olayları verilmiştir. Kazaya konu olan gemi adları gizlenmiştir.

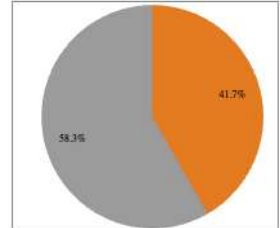
Önceki bölümden Akdeniz bölgesi için gemi trafik yoğunluk katsayısı 0,39 bulunmuştu. Akdeniz alanında kaza olasılığında gerçeğe yakın risk değerlerini yakalamak amacıyla CMSI endeksi, Deniz trafik yoğunluğu katsayısı ve kaza olma olasılığı çarpılarak anılan bölgedeki risk değerine ulaşılmıştır. Bu değerler Tablo 30’da verilmiştir.

Tablo 29 Akdeniz çatma ve çatışma kategorisi deniz kazaları

Olay Tarih ve Saati	Kaza Yeri	Öl ü	Yrl	Kaza Tür ü	Gemi Adı	Gros E	FI I	CMS I	Yoğunluk	Olasılık	Risk kategorisi	
28.12.2024 20:14:00	MERSİN MIP LİMANI	0	0	Çtm	L** Ö**	1318	2	0	1	0,39	%0,001	0,34
28.7.2024 00:30:00	Göcek Liman Başkanlığı yetki sahası, Ayten Koyu	1	0	Çtşm	T** I**	2,14	1	10	6	0,39	%0,005	1,04
15.7.2024 21:36:00	Antalya/Demre	1	1(Ağır Y.)	Çtşm	F** 3	103,3	1	15	15,5	0,39	%0,005	1,45
29.1.2024 10:30:00	Manavgat Irmağı	0	0	Çtşm	I** K**	127,55	1	0	0,5	0,39	%0,005	0,04
1.1.2024 18:06:00	Fethiye Liman içi	0	0	Çtşm	I**	397	1	0	0,5	0,39	%0,005	0,04

Tablo 30 Akdeniz’de çatma ve çatışma olayları CMSI, Yoğunluk, Olasılık çarpımları ve Deniz kazalarının risk kategorileri

AKDENİZ_RA_Çatma_Çatışma							
CMSI	Yoğunluk	Olasılık	Risk	#	%	x 10000	LOG
1	0.39	0.00011654	0.0000454506	1	0.00%	0.45	-0.34
6	0.39	0.00046615	0.001090791	2	0.11%	10.91	1.04
15.5	0.39	0.00046615	0.00281787675	3	0.28%	28.18	1.45
0.5	0.39	0.00046615	0.00009089925	4	0.01%	0.91	-0.04
0.5	0.39	0.00046615	0.00009089925	5	0.01%	0.91	-0.04



Akdeniz bölgesinde 2024 yılı içerisinde meydana gelen çatma ve çatışma olayları incelendiğinde, Antalya, Demre 'de meydana gelen olayda iki kişi ağır yaralanmış daha sonra ağır yaralanan bir kazazede kurtarılamayarak vefat etmiştir. Göcek Ayten koyunda yaşanan olay sonrasında bir kişi vefat etmiştir. Bu iki olayın Şiddetli/Katastrofik risk kategorisine girdiği görülmüştür.

Yangın olayları için risk analizi çalışması:

2024 yılı içerisinde yaşanan yangın olaylarında ölüm meydana gelmemiş ancak bir yaralanmalı olay meydana gelmiştir.

AAKKM'den alınan verilere göre Akdeniz bölgesinde 2024 yılı içerisinde onbir yangın olayı meydana gelmiştir. 2025 yılı ve sonraki yıllar için gemilerin yangın olayına maruz kalma olasılığı hesaplanacak olursa bu oran:

$11/8.581 = 0,0012819$ yaklaşık olarak on binde 13'tür.

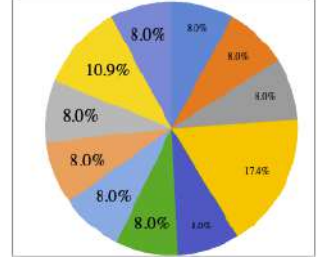
Tablo 31’de Türkiye Arama kurtarma sahası Akdeniz bölgesinde oluşan yangın olayları verilmiştir. Tablo 32’de Akdeniz’de yaşanan yangın olayları CMSI, olasılık çarpımları ve hesaplanan değerlere göre kategorileri verilmiştir. Yangın olaylarının deniz trafik yoğunluğu ile ilgisi olmadığından, yoğunluk katsayısı “1” olarak alınmıştır.

Tablo 31 Akdeniz yangın kategorisi deniz kazaları

Tarih ve Saat	Konum	Ölü	Yr1	Gemi adı	Gross	E	FII	CMSI	Olasılık	Risk Kategorisi
29.8.2024 18:50:00	Fethiye Göcek Tersane Adası Akvaryum Koyu	0	0	A**	60	1	0	0,5	0,001282	0.81
24.8.2024 12:21:00	Göcek Sarsala koyu	0	0	B**	12.45	1	0	0,5	0,001282	0.81
14.8.2024 06:16:00	Antalya Kemer G Marina	0	0	H**A**	36.19	1	0	0,5	0,001282	0.81
14.7.2024 17:47:00	Marmaris Keci Adası Kuzey Doğusu	3 y, 1Ay	0	E**	68	1	8	4,5	0,001282	1.76
9.7.2024 19:30:00	İskenderun Atakaş işkelesi önü	0	0	S** C**	35812	8	0	0,5	0,001282	0.81
10.6.2024 13:45:00	Marmaris boğaz çıkışı Çiftlik Koyu önleri	0	0	D**A**	2,24	1	2	0,5	0,001282	0.81
7.6.2024 16:08:00	Datça açıkları	0	0	S**	36.06	1	0	0,5	0,001282	0.81
7.6.2024 13:50:00	Fethiye açıkları	0	0	K**	16.68	1	0	0,5	0,001282	0.81
5.5.2024 19:33:00	Fethiye Ece Saray Marina önleri	0	0	E** J**	1,66	1	0	0,5	0,001282	0.81
2.5.2024 12:15:00	Marmaris açıkları	0	0	L**	998	2	0	1	0,001282	1.11
21.3.2024 07:30:00	Antalya/ Alanya Balıkçı Barınağı	0	0	B** A	2,29	1	0	0,5	0,001282	0.81

Tablo 32 Akdenizde yaşanan yangın olayları CMSI, Yoğunluk, Olasılık çarpımları ve Deniz kazalarının risk kategorileri

AKDENİZ_RA_Yangın								
CMSI	Yoğunluk	Olasılık	Risk	#	%	x 10000	LOG	
0.5	1	0.00128200	0.000641	1	0.06%	6.41	0.81	
0.5	1	0.00128200	0.000641	2	0.06%	6.41	0.81	
0.5	1	0.00128200	0.000641	3	0.06%	6.41	0.81	
4.5	1	0.00128200	0.005769	4	0.58%	57.69	1.76	
0.5	1	0.00128200	0.000641	5	0.06%	6.41	0.81	
0.5	1	0.00128200	0.000641	6	0.06%	6.41	0.81	
0.5	1	0.00128200	0.000641	7	0.06%	6.41	0.81	
0.5	1	0.00128200	0.000641	8	0.06%	6.41	0.81	
0.5	1	0.00128200	0.000641	9	0.06%	6.41	0.81	
1	1	0.00128200	0.001282	10	0.13%	12.82	1.11	
0.5	1	0.00128200	0.000641	11	0.06%	6.41	0.81	

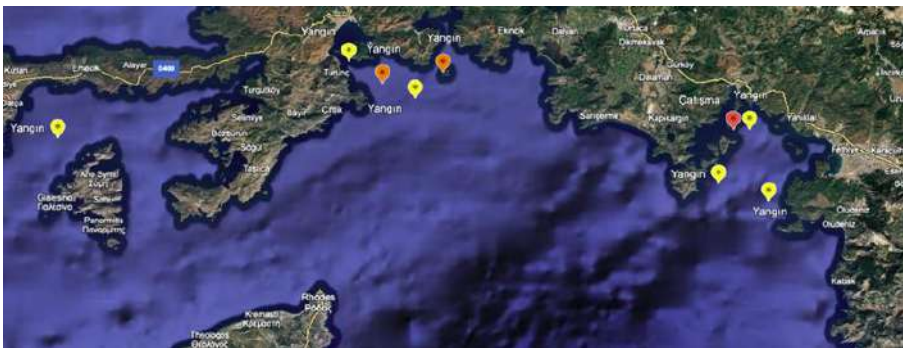


Riskli bölgelerin haritada belirtilmesi

Resim 9,10 ve 11’de 2024 yılı içerisinde Akdeniz’de meydana gelen ve Şiddetli/Katastrofik ve Ağır/Yüksek seviye riskli gruba yer alan olaylar haritaya olay kodu ile birlikte işaretlenmiştir.



Resim 9 Akdeniz alanında Ağır Seviye Risk ve Şiddetli/Katastrofik Seviye Riskli deniz kazalarının haritadaki konumları



Resim 10 Akdeniz alanında Ağır Seviye Risk ve Şiddetli/Katastrofik Seviye Riskli deniz kazalarının haritadaki konumları (Fethiye ve Marmaris bölgesi yakınlaştırılmış)



Resim 11 Akdeniz alanında Ağır Seviye Risk ve Şiddetli/Katastrofik Seviye Riskli deniz kazalarının haritadaki konumları (Antalya Körfezi yakınlaştırılmış)

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu makalede Karadeniz, Ege Denizi ve Akdenizde 2024 yılı içerisinde meydana gelen deniz kazalarını baz alarak bu verilerden gerçeğe yakın risk analizi çalışması yapılmıştır. Bulgular ışığında, Karadeniz deniz alanında, Kdz. Ereğli Limanı girişinde Şiddetli/Katastrofik kategorisinde yer alan bir karaya oturma deniz kazası yaşanmıştır. Küçük ve emniyetsiz tekneler ile denize açılma sonucunda Kastamonu Cide ilçesi Gideros Koyunda ve Küçük Karasu mevkiinde ölümlü sonuçlanan batma olayı meydana gelmiş, bu olaylar Şiddetli/Katastrofik risk kategorisinde yer almıştır. İstanbul Boğazi Kuzey çıkışında bir çatışma olayı, Ordu Ünye ve Sinop açıklarında yaşanan bir su alma olayı Ağır Risk kategorisinde yer almıştır.

Ege deniz alanında Konak İskelesi önlerinde ve İzmir Narlıdere Şiddetli/Katastrofik kategorisinde yer alan iki karaya oturma deniz kazası yaşanmıştır. Çeşme Alaçatı mevkiinde ölümlü çatışma olayı meydana gelmiş, İzmir Dikili Madra çayı açıklarında küçük tekne ile denize açılma sonucunda ölümlü batma olayı meydana gelmiş ve Seferihisar Tenos Marina'da ölümlü sonuçlanan yangın olayı gelmiş bu üç kaza Şiddetli/Katastrofik risk kategorisinde yer almıştır.

Akdeniz deniz alanında Göcek Ayten koyunda ve Antalya Demre önlerinde ölümlü çatışma olayı, Marmaris Keçi Adası açıklarında ağır yaralanma ve yaralanma ile sonuçlanmış yangın olayı ile Marmaris açıklarında 998 gross tonluk bir gemide yaşanan yangın kazası ile beraber Bu dört olay Şiddetli/Katastrofik risk kategorisinde yer almıştır.

Akdeniz deniz alanında özellikle yaz aylarında turistik amaçlı gezinti tekneleri ve yatların yanma, batma ve karaya oturma türünde Ağır ve Şiddetli risk kategorisinde deniz kazalarının yaşandığı gözlemlenmiştir. Özellikle Fethiye ve Marmaris arasında kalan bölgede güneybatı turistik teknelerin sıklıkla seyahat

ettiği bölgelerde yangın kaza grubu Ağır ve Şiddetli risk kategorisinde ön plana çıkmaktadır.

Çalışma sonucu ortaya çıkan veriler ve yapılan risk analizi sonuçlarına göre;

- Marmaris koyu ve 25 mil deniz alanı içerisinde ulusal çapta önlemlerin alınması gerekmektedir.
- Fethiye koyu ve 25 mil deniz alanı içerisinde ulusal çapta önlemlerin alınması gerekmektedir.
- Kastamanu Giderus koyu ve Karasu açıkları 25 mil deniz alanı içerisinde ulusal çapta önlemlerin alınması gerekmektedir.
- Yaz mevsimine girilmeden önce Bölge Liman Başkanlıkları ve Liman Başkanlıkları tarafından, turistik amaçlı ticaret yapan tekne sahiplerine, kaptanlara, mürettebata tazeleyici eğitimler sağlanmalı yada bu eğitimleri veren okullar ile işbirliği sağlanarak gerekli tazeliyeici eğitimler içeren kurslar hazırlanmalıdır.
- Turistik amaçlı bölgede çalışan tekneler denize çıkmadan önce, tekne kaptanları yada yetkili personel tarafından, yolculara gerekli can kurtarma, yangın, can salı gibi hayati konularda bilgilendirme yapılmalıdır.
- Bölge Liman Başkanlıkları ve Liman Başkanlıkları tarafından, kendi tekneleri ile denize açılmak isteyen amatör denizcilere, tekne emniyeti, tekne yapısı, denizcilik hakkında eğitici broşürler hazırlayabilir, yerel medya araçları kullanarak bireysel amaçla denize çıkacak şahıslara gerekli uyarılar yapılabilir.
- Kdz. Ereğli, İskenderun Limanı, İzmir, Aliğa Limanı gibi büyük limanlara uğrayacak gemilerin Klas Sörvey belgeleri incelenip, yapılan değerlendirmeye göre gemilere demirleme veya rıhtıma yanaşma izni verilebilir.
- Kdz. Ereğli, İskenderun Limanı, İzmir, Aliğa Limanı demirleme bölgesinde demirleyecek olan gemilerin gemi sertifikaları incelenip, evraklarında eksik olan gemiler varsa uyarılması, eksik veya tarihi geçmiş sertifikaların gemi/şirket tarafından zamanında tamamlanıp, güncellenmesi sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] OECD/ITF – Transport Outlook 2019
- [2] Uluslararası Denizcilik Araştırması (UNCATD review)
- [3] İsmet B., Aydın S.Z., Bitiktaş F. (2022) Türk Boğazları Trafik Yoğunluğu, Bekleme Süreleri ve Deniz Kazaları
- [4] AIS: Automatic Identification System- Belirli tonaj üzerinde gemilerde bulunan elektronik kimlik bildirici sistem. OTS: otomatik tanımlama sistemi
- [5] “Marine accident severity is the quantitative expression of the kinetic energy, momentum exchange, structural damage and human casualty level arising from a maritime accident.”
— *IMO Casualty Investigation Code*
- [5] *ISO 31010. (2019). Risk management — Risk assessment techniques. International Organization for Standardization.*
- [6] HSE (UK Health and Safety Executive). (2001). A guide to risk assessment and risk management. HSE Books.
- [7] Cox, L. A. (2008). What’s wrong with risk matrices? *Risk Analysis*, 28(2), 497–512.
- [8] FMEA risk matrix approach: Stamatis, D. H. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*. ASQ Quality Press.
- [9] Denizcilik ve Deniz Kazalarında Risk Analizi / IMO (International Maritime Organization). (2010). *Formal Safety Assessment (FSA) Guidelines (MSC-MEPC.2/Circ.12)*.
- [10] Konovessis, D., & Vassalos, D. (2008). *Maritime safety: risk analysis tools and techniques. Ocean Engineering*, 35(8–9), 798–809.
- [11] Ventikos, N., Louzis, K., & Psaraftis, H. N. (2014). Maritime accident risk assessment. *Safety Science*, 63, 104–115.
- [12] Ventikos, N. P., & Psaraftis, H. N. (2004). Methods for the risk analysis of maritime transportation. *Safety Science*, 42(9), 815–832.
- [13] International Maritime Organization (IMO). (2010). *Formal Safety Assessment (FSA) – Guidelines.MSC-MEPC.2/Circ.12*.
- [14] Fine, W. T. (1971). Mathematical evaluations for controlling hazards. *Journal of Safety Research*, 3(4), 157–166.
- [15] https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/171899/mod_resource/content/1/Konu9.pdf
- [16] Akyıldız H., Yüksek Lisans Tezi, Türkiyenin kabotaj taşımacılığının geliştirilmesi ve paralelindeki deniz kazaları risk analizi
- [17] Tez (Yüksek Lisans); İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015, dc.identifier.uri: <http://hdl.handle.net/11527/13137>

- [18] Yorulmaz, M. ve Sezen, K., (2023). Denizcilik Alanında Kullanılan Risk Analizi Yöntemleri ve Fine Kinney Yöntemiyle Bir Uygulama. Afet ve Risk Dergisi, 6(3), 622-637.
- [19] <https://denizcilikistatistikleri.uab.gov.tr/>
- [20] Haimes, Y.Y., "Risk Modelling, Assesment and Management 2nd ed." Willey Interscience, NJ,, 19-39 (2004).
- [21] <https://www.saiyangmarine.com/info/differences-between-class-a-and-class-b-ais-102945473.html>
- [22] <https://www.amsa.gov.au/safety-navigation/navigation-systems/types-automatic-identification-systems>
- [23] Silveria et al. (2013), Wang et al. AIS verileriyle kullanılan Modern yöntemi (2019)
- [24] Dünya Denizcilik örgütü Kaza Sorgu Kodu (IMO Casualty Investigation Code)
- [25] Gross Ton bir geminin tüm kapalı hacimlerinin toplamına bağlı olarak hesaplanan, geminin genel büyüklüğünü ifade eden boyutsuz idari bir ölçüdür. Bu tanım IMO – International Maritime Organization tarafından kabul edilen 1969 Uluslararası Tonaj Sözleşmesi (ITC 1969) ile standartlaştırılmıştır.
- [26] IMO ve EMSA deniz kazalarında risk değerlendirmelerinde Fatality and Injury Index (FII) parametresini kullanmaktadır.
- [27] IMO (International Maritime Organization). (2010). Formal Safety Assessment (FSA) Guidelines (MSC-MEPC.2/Circ.12).
- [28] Konovessis, D., & Vassalos, D. (2008). Maritime safety: risk analysis tools and techniques. *Ocean Engineering*, 35(8–9), 798–809.
- [29] Ventikos, N., Louzis, K., & Psaraftis, H. N. (2014). Maritime accident risk assessment. *Safety Science*, 63, 104–115.
- [30] ISO 31010. (2019). *Risk management — Risk assessment techniques*. International Organization for Standardization.
- [31] Nuruhan, M., Deniz Kazalarında İnsan hatası unsurlarının Makine öğrenmesi ile analizi-Doktora Tezi; (IMO, 2023). IMO, 2008 "Deniz Kazaları ve Deniz Olayları Raporu"nda deniz kazası türleri (MSC,2008: 1-2):

3. Bölüm

AA6082-T6 Alüminyum Alaşımının Frezelemesinde Çoklu İşlem Parametrelerinin Titreşim, Üzerindeki Etkilerinin İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi

Ahmet Murat PINAR¹, Ömer İLHAN²

Özet

Sunulan çalışma, AA6082-T6 alüminyum alaşımının kaplamasız takma uçlu sementit karbür parmak frezele ile işlenmesinde çoklu işlem parametrelerinin iş parçası titreşimi üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. İşlem parametresi olarak takım tutucu tipi (Standart ve bilyalı pens başlığı), kesme hızı (150 ve 300 m/dk), ilerleme oranı (200 ve 600 mm/dk), eksenel talaş derinliği (1 ve 2 mm), radyal talaş derinliği (4 ve 8 mm) uç yarıçapı (0,4 ve 0,8 mm), takım yolu deseni (zig-zag ve spiral) ve soğutma koşulu (kuru ve vorteks tüp) kullanılmıştır. Taguchi'nin L16 ortogonal dizisi esas alınarak testler yapılmış ve deney sonuçları sinyal gürültü oranı, ANOVA ve ana etkiler grafikleri ile %95 güven seviyesinde istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Titreşim için yapılan ANOVA sonuçlarına göre, kesme hızı ilerleme oranı ve takım yolu deseni işleme parametrelerinin anlamlı olduğu gözlemlenmiştir. Kesme hızının %27,42'lik dağılımla en anlamlı parametre olduğu bunu sırasıyla ilerleme oranı (%23,73) ve takım yolu deseninin (%10,90) izlediği elde edilmiştir. Optimum titreşim 150 m/dk'lık kesme hızında, 200 mm/dk'lık ilerleme oranında 1 mm'lik eksenel talaş derinliğinde, 8 mm'lik radyal talaş derinliğinde, 0,4 mm'lik uç yarıçapında spiral takım yolu deseninde, kuru işlemede ve standart pens tutuculu sistemde 0,0296 mm olarak tahmin etmiştir. Son olarak yapılan doğrulama testlerine ait ortalama sonuçların güven aralığında yer aldığı ve metodun optimizasyonu başarı ile gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Frezeleme, Taguchi, titreşim, işlenebilirlik

¹ Prof. Dr.; Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü. ahmet.pinar@cbu.edu.tr; ORCID No: 0000-0002-8618-6453

² Arş. Gör.; Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü. omer.ilhan@cbu.edu.tr; ORCID No: 0009-0004-5185-8899

GİRİŞ

Günümüzde, yüksek dayanım/ağırlık oranı, iyi korozyon ve yorulma direnci ile yüksek talaş kaldırma oranı özellikleri sayesinde, alüminyum alaşımları savunma sanayi, otomotiv ve havacılık sektörlerinde artan bir kullanıma sahiptirler (Pinar, 2013). İlgili sektörler yüksek boyut/konum toleransı ve çok iyi yüzey kalitesi gereksinimlerinden dolayı alüminyum alaşımlarının işlenebilirliği ayrı bir önem kazanmaktadır. Talaş kaldırma esnasında oluşan titreşim tek başına önemli bir işlem parametresi olmasına karşın, yüzey kalitesi, boyut/konum toleransı ve kesici takım ömrü üzerinde çok baskın bir etkiye sahiptir. Aşağıda alüminyum alaşımlarının frezelenmesinde titreşim kalite karakteristiğinin değerlendirildiği çalışmalar özetlenmektedir:

Lou ve Chen (1999) fener mili hızının, ilerleme oranının, talaş derinliğinin ve titreşimin AA6061'in parmak frezeleme işlemlerinde yüzey pürüzlülüğüne etkisini çalışmışlardır. Elde edilen verilerin analizi ve modelin oluşturulması sinirsel bulanık sistem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen sistemle yüzey pürüzlülüğü %96 doğrulukta tahmin edilmiştir.

Chen ve Savage (2001) 6061 Alüminyum alaşımı ve AISI 1018 çelik malzemelerinin frezelenmesinde, ilerleme oranı, fener mili hızı, takım malzeme/tip/çap ve titreşim parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini işleme esnasında tahmin etmişlerdir. Önerilen sinirsel bulanık yaklaşım yüzey pürüzlülüğünü %90 doğrulukta modellemiştir.

Brezocnic vd. (2004) fener mili hızı, ilerleme oranı, talaş derinliği ve titreşimlerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini genetik programlama metodu ile tahmin etmişlerdir. Numuneler 6061 alüminyum alaşım malzemenin 4 kesici kenarlı parmak freze ile işlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Artan titreşimin tahmin doğruluğunu arttırdığı ve ilerleme oranının yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en anlamlı faktör olduğunu tespit etmişlerdir.

Silva vd. (2024) AA7050-T7451 alüminyum alaşımının derin kanal açma operasyonunun dalma ve klasik yöntemle ve iki farklı takım kaplama malzemesine göre işlenmesinde yüzey kalitesi, takım aşınması ve titreşim performansını tartışmışlardır. Buna göre dalarak frezeleme stratejisi kullanan takımlarda görülen aşınma, geleneksel frezeleme stratejisinde kullanılan takımlarda görülenden biraz daha düşüktür. PVD ile gerçekleştirilen DLCSiO500W3.5O2 kaplaması, işleme sürecinde daha az takım aşınmasına ve işlenecek malzemenin takıma daha az yapışmasına katkıda bulunmuştur. İşlenen malzemenin takıma yapışması normalde yüzey pürüzlülüğünü artırdığından (kaliteyi düşürdüğünden), bu durum daha düşük pürüzlülük seviyesi olarak yansımıştır

Zagórski vd. (2021) AZ91D magnezyum alaşımının kaplamalı sementit karbür parmak freze ile işlenmesinde 3 farklı takım tutucu (Hidrolik pens tutucu, ER tip

pens tutucu ve ısıtılmalı takım tutcu), 4 farklı kesme hızı (400, 600, 800 ve 1000m/dk), 6 farklı diş başı ilerlemenin (0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 ve 0.30mm/diş) titreşim üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

Omonoyi (2025) AA6061 alüminyum alaşımlarının frezelenmesi sırasında talaş derinliği, devir sayısı ve tabla ilerlemesi faktörlerinin titreşim üzerindeki etkilerini yüzey yanıt yöntemiyle araştırmıştır. Deneyler mineral yağ ve ay çiçek yağı olmak üzere iki farklı soğutma ortamında gerçekleştirilmiştir. Buna göre ayçiçek yağı bazlı kesme sıvısı, mineral yağla kıyasla titreşimi %3,3 oranında azaltmıştır. Elde edilen regresyon denklemi titreşimi %93 doğrulukta tahmin etmiştir.

Guo vd. (2020) süreç titreşimini dikkate alan ve deforme olmamış talaş kalınlığını temel alan bir simülasyon yöntemi sunmuşlardır. Bu yöntemde, 7075-T651 alüminyum alaşımının dinamik frezeleme sürecini kesme kuvveti ve sıcaklık açılarından analiz etmek için bir sonlu elemanlar modeli (FEM) oluşturulmuştur. Sonuçların doğrulanması için devir sayısı, talaş derinliği ve tabla ilerlemesinin farklı seviyelerinde 6 adet test gerçekleştirilmiştir. Buna göre, önerilen metodun, frezeleme titreşiminin etkisini kesin olarak tayin edebilmekte ve işleme kalitesini optimize etmek için uygun titreşim parametrelerini seçmede yeterli doğrulukta olduğu elde gözlemlenmiştir.

Guo, vd., (2022) yüksek hızlı hassas frezelemede titreşim üzerindeki çoklu işleme parametrelerinin kapsamlı etkisini tartışmışlardır. Deneyler, 7050-T7451 alüminyum alaşımı üzerinde, Ø6 mm çapında, 4 ağızlı, 15° talaş açılı ve 30° helis açılı karbür parmak freze kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İşleme parametreleri olarak iş mili devri (12.000–20.000 dev/dak), ilerleme hızı (1500–2500 mm/dak) ve eksenel talaş derinliği (0.2–0.6 mm) değişkenleri araştırılmıştır. Titreşim verileri ivmeölçerler ile toplanmış, FFT ve frekans domeninde integrasyon yöntemleriyle analiz edilerek yer değiştirme genlikleri hesaplanmıştır. Varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre, titreşim üzerindeki etki sıralaması iş mili devri, eksenel talaş derinliği ve ilerleme hızı şeklinde belirlenmiş; özellikle devir artışı ile titreşim genliğinin belirgin şekilde yükseldiği, ilerleme hızının ise istatistiksel olarak daha düşük etkiye sahip olduğu ortaya konmuştur.

Tuyboyov vd. (2025) titanyum alaşımı (350 HB), Alüminyum 2024 (120 HB) ve SAE 1213 (150 HB) malzemelerin frezelenmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri, sıcaklık artışı, titreşim genliği, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Talaş derinliği, yanalma açısı ve kesici uç yarıçapının farklı seviyelerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda, artan talaş derinliğinin talaş kaldırma oranını arttırsa da kesme kuvvetlerini ve titreşimleri yükselterek yüzey kalitesini olumsuz etkilediği görülmüştür. Ayrıca, Titanyum alaşımlarının yüksek sertlikleri nedeniyle daha yüksek spesifik kesme enerjisi

gerektirdiği, Al2024'ün ise en düşük kesme enerjisi ve en yüksek işlenebilirlik sergilediği tespit edilmiştir.

Yukarıdakilerden farklı olarak önerilen çalışma 7 farklı işlem parametresinin iş parçası titreşimi üzerindeki etkileri belirlenerek sistemin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deney numunesi olarak Ø50x40 mm ölçüsünde AA6082-T6 alüminyum alaşımları kullanılmıştır. Bunlara ait kimyasal içerik Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Deney numunelerinin kimyasal bileşimi

Chemical Composition (wt%)								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0,94	0,26	0,062	0,53	1,1	0,005	0,06	0,009	97,034

İşlenebilirlik testlerinde, Seco firması tarafından üretilen, 12 mm çapında tek uçlu kaplamasız sementit karbür frezeleme takımları kullanılmıştır. Takım tutucu ve uçların sipariş kodları sırasıyla R217.69-1612.0-09-1AN ve XOEX090304FR-E05H15'tir (Şekil 1). Kesici takımın ayar açısı 90°, talaş açısı -9°, aksenal talaş açısı 7° ve radyal talaş açısı -8° olup, Deneylerde 0,4 ve 0,8 mm'lik iki farklı uç yarıçapı kullanılmıştır. Kesici takımlar bilyalı ve standart pens tutucu sistemle tezgâha bağlanmıştır (Şekil 1)



Şekil 1: Takım tutucu tipleri ve deneylerde kullanılan kesici takım

Frezeleme deneyleri Mitsubishi M80 kontrol ünitesine sahip 7,5 kW gücünde ve 12.000 dev/dk'lık fener mili hızına sahip GMT MCV 740 CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri tezgâhın tablasına bağlanan 4''lik torna aynasında işlenmiştir.

İşlenebilirlik testleri kuru ve vorteks tüplü soğutma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Vorteks tüplü testler, Emuge Franken karşıt akışlı vorteks tüple 6 bar basınçta yaklaşık -30^0 derece soğuk hava çıkışı elde edilerek yapılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2: Vorteks tüple gerçekleştirilen bir deney

Titreşim ölçümlerimiz PCE firmasına ait piezoelektrik ivme transdüseri ile ölçüm yapan PCE-Vm3D cihazla gerçekleştirilmiştir Cihaza ait teknik özellikler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2: Titreşim ölçüm cihazı özellikleri

Özellik	Değer / Açıklama
Cihaz modeli	PCE-VM 3D
Sensör tipi	3 Eksenli Piezoelektrik İvmeölçer
Görüntüleme	4 haneli, arka aydınlatmalı LCD ekran
Ölçüm eksenleri	X, Y, Z (tekil veya üç eksen birlikte)
Doğruluk	Okumanın %5’i \pm 2 basamak
Ölçüm aralıkları	Yer değiştirme: 0.001–4.000 mm (tepe-tepe eşdeğeri), Hız: 0.01–400.0 mm/s (RMS) İvme: 0.1–400.0 m/s ² (tepe)
Frekans aralığı	10 Hz – 10 kHz (tüm ölçüm modları için)
Analog çıkış	0–2.0 V (tepe), yük direnci >10 k Ω
Birim dönüştürme	Metrik / Inch
Veri aktarımı	Analog çıkış üzerinden veri toplama sistemine

Aşağıda titreşim ölçüm sisteminin aşamaları verilmiştir. Öncelikle numunelerin bağlantısını gerçekleştirdiğimiz 4 inch’lik torna aynasının arkasına transdüserin mıknatısıyla aynanın bağlantısını sağlayacak bir flanş imal edilip 3 adet imbus civata ile aynaya bağlanmıştır (Şekil 3)



Şekil 3: Transdüserin aynaya bağlantısını sağlayan flanş

Şekil 4'te ivme transdüserinin aynaya güçlü neodyum mıknatısla bağlantısı verilmiştir.



Şekil 4: İvme transdüserinin aynaya bağlantısı

Nihayetinde Şekil 5'te iş parçası titreşimi ölçüm sistemi görülmektedir. Mıknatıslı ivme transdüserine bağlı cihazın bilgisayara bağlantısı RS-232C özel kabloyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5: İş parçası titreşimi ölçüm sistemi

Titreşim verisi olarak, Deneysel numunesinin frezelenmesi esnasında iş parçasında X, Y ve Z eksenlerinde meydana gelen anlık yer değiştirme verisinin kaydedildiği Excel dosyasından alınan değerler kullanılmaktadır. Öncelikle ilgili veri dosyasından her bir eksen için etkin RMS değerleri hesaplanmıştır. Aşağıda X eksenine için yapılan RMS hesaplaması verilmiştir.

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

Burada x_i deney esnasında elde edilen X ekseninde gerçekleştirilen i. yer değiştirme miktarı, N toplam yer değiştirme sayısını ifade etmektedir. Y ve Z eksenleri için de bu işlem yapıldıktan sonra, İstatistiksel cevabı oluşturan bileşke RMS değeri aşağıdaki eşitlik vasıtasıyla hesaplanmaktadır.

$$B_{RMS} = \sqrt{X_{RMS}^2 + Y_{RMS}^2 + Z_{RMS}^2} \quad (2)$$

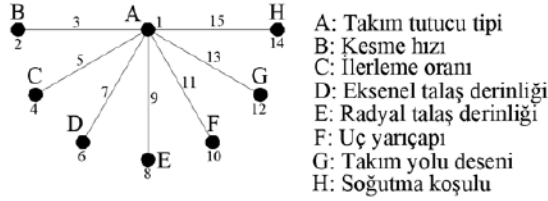
DENEY TASARIMI

İstatistiksel deney tasarımı ve analizler, Taguchi Metodu ile Minitab yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Pilot deney sonuçları ve yukarıdaki uygulama adımları doğrultusunda faktör ve seviyeler aşağıdaki gibi belirlenmiştir (Tablo 3).

Tablo 3: Deney sisteminde kullanılan faktörler ve seviyeleri

İşlem Parametreleri	Birimler	Seviyeler	
		1	2
Takım tutucu tipi (<i>A</i>)	-	Standart pens başlığı	Bilyalı pens başlığı
Kesme hızı (<i>B</i>)	m/dk	150	300
İlerleme oranı (<i>C</i>)	mm/dk	200	600
Eksenel talaş derinliği (<i>D</i>)	mm	1	2
Radyal talaş derinliği (<i>E</i>)	mm	4	8
Uç yarıçapı (<i>F</i>)	mm	0,4	0,8
Takım yolu deseni (<i>G</i>)		Zig-zag	Spiral
Soğutma koşulu (<i>H</i>)		Kuru	Vorteks tüp

Deneylerde 15 sütun ve 16 satırdan oluşan 15 serbestlik dereceli L16'lık OD seçilmiştir (Şekil 6).



Deney no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	A	B	AXB	C	AXC	D	AXD	E	AXE	F	AXF	G	AXG	H	AXH
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

Şekil 6: L16 OD ve linear grafik yöntemiyle faktör ve etkileşimlerin sütunlara atanması

Bu dizi aynı zamanda deney planını oluşturmakta ve dizideki 16 satır, parametrelerin farklı kombinasyonlarındaki deneyleri ifade etmektedir. Dizinin sütunlarına da faktör ve etkileşimler atanmaktadır. Şekil 6’da linear grafik yöntemi kullanılarak elde edilen atanma işlemi görülmektedir. Burada kalın siyah noktalar faktörleri ve bu noktaları birleştiren çizgiler de etkileşimleri ifade etmektedir. Buna göre, dizideki birinci sütun takım tutucu tipine, ikinci sütun kesme hızına, dördüncü sütun ilerleme oranına, altıncı sütun eksenel talaş derinliğine, sekizinci sütun radyal talaş derinliğine, onuncu sütun uç yarıçapına on ikinci sütun takım yolu desenine, on dördüncü sütun soğutma ve geri kalanlar da etkileşimlere atanmıştır.

İSTATİSTİKSEL ANALİZ

Taguchi’nin L16 OD’si esas alınarak gerçekleştirilen deneylere ait yüzey pürüzlülük ölçümlerine ait ortalama değerleri (R_a) ve bunlara tekabül eden S/N oranları Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4: Titreşim deney sonuçları ortalamaları ve bunlara ait S/N oranları

Test no	Takım tutucu tipi (A)	Kesme hızı (B)	İlerleme oranı (C)	E. Talaş derinliği (D)	R. Talaş derinliği (E)	Uç yarıçapı (F)	Takım yolu deseni (G)	Soğutma koşulu (H)	V_w	S/N
1	SPB	150	200	1	4	0.4	Zig-zag	Kuru	0,03016	30,41129
2	SPB	150	200	1	8	0.8	Spiral	V. tüp	0,02996	30,46916
3	SPB	150	600	2	4	0.4	Spiral	V. tüp	0,03127	30,09822
4	SPB	150	600	2	8	0.8	Zig-zag	Kuru	0,03618	28,83105
5	SPB	300	200	2	4	0.8	Zig-zag	V. tüp	0,04020	27,91605
6	SPB	300	200	2	8	0.4	Spiral	Kuru	0,03013	30,42005
7	SPB	300	600	1	4	0.8	Spiral	Kuru	0,03792	28,42353
8	SPB	300	600	1	8	0.4	Zig-zag	V. tüp	0,04095	27,75457
9	BPB	150	200	1	4	0.4	Zig-zag	Kuru	0,03054	30,30262
10	BPB	150	200	1	8	0.8	Spiral	V. tüp	0,03015	30,41514
11	BPB	150	600	2	4	0.4	Spiral	V. tüp	0,03913	28,15091
12	BPB	150	600	2	8	0.8	Zig-zag	Kuru	0,03713	28,60539
13	BPB	300	200	2	4	0.8	Zig-zag	V. tüp	0,04013	27,93135
14	BPB	300	200	2	8	0.4	Spiral	Kuru	0,03496	29,12832
15	BPB	300	600	1	4	0.8	Spiral	Kuru	0,03684	28,67361
16	BPB	300	600	1	8	0.4	Zig-zag	V. tüp	0,04016	27,92499

Taguchi metodu, ölçülen deney verilerinin değerlendirilmesinde istatistiksel bir araç olarak, elektrik kontrol teorisinden esinlenilmiş sinyal/gürültü (S/N) oranını kullanmaktadır (Pinar vd., 2016). Bu yöntemde “sinyal”, ortalama ile ifade edilen istenen yanıt değerini temsil ederken, “gürültü” standart sapma ile ifade edilen istenmeyen değişimi ifade etmektedir. S/N oranının seçimi, amaç fonksiyonunun türüne bağlı olup “Nominal En İyidir (NB)”, “Küçük En İyidir (SB)” veya “Büyük En İyidir (LB)” olarak sınıflandırılabilir. Bu çalışmanın amacı mümkün olan en düşük yüzey pürüzlülüğünü elde etmek olduğundan, “Küçük En İyidir” kriteri seçilmiş ve ilgili S/N oranı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır (Pinar vd., 2016)

$$\frac{S}{N} = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3)$$

Burada n ölçüm sayısı ve y_i ölçülen karakteristik değerdir. S/N oranının birimi desibeldir (dB). Tüm testler için hesaplanan S/N oranları Tablo 4.'ün son sütununda verilmiştir."

İş Parçası Titreşimi için ANOVA

Tablo 5'te titreşim için gerçekleştirilen ANOVA sonuçları verilmiştir. Buna göre, Kesme hızı ilerleme oranı ve takım yolu deseni işleme parametrelerinin titreşim üzerinde anlamlı olduğu gözlemlenmiştir. Kesme hızının %27,42'lik yüzdelerle dağılımla en anlamlı parametre olduğu bunu sırasıyla ilerleme oranı (%23,73) ve takım yolu deseninin (%10,90) izlediği elde edilmiştir.

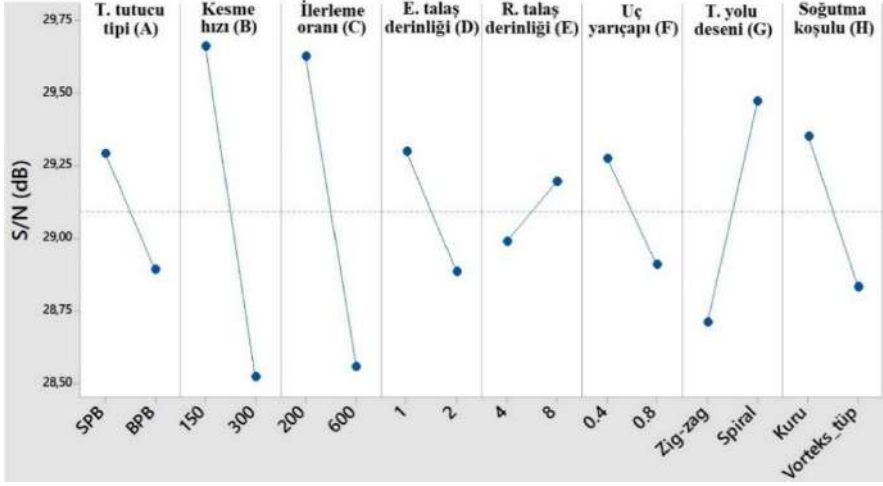
Tablo 5: Titreşim S/N oranları için ANOVA sonuçları

Kaynak	DF	SS	V	F	SS'	P
Takım tutucu tipi (A)	(1)	(0,6366)				
Kesme hızı (B)	1	5,1885	5,1885	11,84	4,7502	27,42
İlerleme oranı (C)	1	4,5494	4,5494	10,38	4,1111	23,73
E. talaş derinliği (D)	(1)	(0,6780)				
R. talaş derinliği (E)	(1)	(0,1683)				
Uç yarıçapı (F)	(1)	(0,5350)				
Takım yolu deseni (G)	1	2,3269	2,3269	5,31	1,8886	10,90
Soğutma koşulu (H)	(1)	(1,0689)				
Hata	12	5,2592	0,4383		6,5741	37,95
Toplam	15	17,324			17,324	100

DF serbestlik derecesi, **SS** karelerin toplamı, **V** varyans, **SS'** saf karelerin toplamı, **P** yüzdelerle dağılım, $F_{0,05,1,12} = 4,75$

Optimum İş Parçası Titreşiminin Belirlenmesi

Optimum iş parçası titreşimi S/N'ye ait ANOVA (Tablo 5) ve ana etkiler grafiği (Şekil 7) dikkate alınarak belirlenmiştir. Ana etkiler grafiğine göre, iş parçası titreşiminin kesme hızı, ilerleme oranı, aksenal talaş derinliği ve uç yarıçapı ile doğru; radyal talaş derinliği ile ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Spiral takım yolu deseninde zig-zaga göre %8,5'luk, kuru işlemede vorteks tüpe göre %6,19'luk ve standart pens başlığında bilyalıya göre %4,2'lik düşüş elde edilmiştir.



Şekil 7: Titreşime ait ana etkiler grafiği

Taguchi anlamlı işlem parametrelerinin en iyi seviyelerine ait ortalama değerleri dikkate alan bir eşitlikle optimum iş parçası titreşimini tahmin etmektedir (Eş 4)

$$P_V = V_{B1} + V_{C1} + V_{G2} - 2 \cdot V_{\mu} \quad (4)$$

Burada V_{B1} , V_{C1} ve V_{G2} değerleri sırasıyla kesme hızının birinci, eksenel talaş derinliğinin birinci ve takım yolu deseninin ikinci seviyesinde gerçekleştirilen testlere ait S/N değerlerinin ortalamalarını ifade etmektedir. V_{μ} de tüm deneylere ait S/N değerlerinin ortalamasıdır. Buna göre önerilen metot minimum titreşimi 30,57db olarak tahmin etmiş olup, buna karşılık gelen titreşim değeri de 0.0296 mm dir.

Optimizasyonun son aşaması olan tolerans tasarımında optimum iş parçası titreşiminin elde edildiği faktör seviyelerinde doğrulama testleri gerçekleştirilip bunların hesaplanan güven aralığında olup olmadığı kontrol edilmektedir. Eş. 5 ve 6 kullanılarak, minimum iş parçası titreşimi için güven aralığımız (CI) $\pm 1,102$ db olarak elde edilmiştir.

$$CI = \left(F_{0,05}(1, df_e) \cdot V_e \sqrt{\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R}} \right)^{1/2} \quad (5)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + V_t} \quad (6)$$

Optimum seviyelerde gerçekleştirilen ($A_1=SPB$, $B_1=150m/dk$, $C_1=200$ mm/dk, $D_1=1$ mm, $E_2=8$ mm, $F_1=0,4$ mm, $G_2=Spiral$ ve $H_1=Kuru$) 3 adet doğrulama testinde, $0,0262\mu m$ 'luk C_v değeri elde edilmiştir. Buna karşılık gelen S/N değeri 31,63 dB dir.

Sonuç olarak doğrulama deneylerine ait ortalamanın ilgili güven aralığında yer aldığı ($29,468 < S/N_{CB} = 31,63 < 31,672$) gözlemlenmiştir. Bu sonuca göre, metodun optimizasyonu yeterli doğrulukta gerçekleştirdiği açıkça görülmektedir.

SONUÇLAR

- Titreşim için yapılan ANOVA sonuçlarına göre, kesme hızı ilerleme oranı ve takım yolu deseni işleme parametrelerinin anlamlı olduğu gözlemlenmiştir. Kesme hızının %27,42'lik yüzdelerle dağılımla en anlamlı parametre olduğu bunu sırasıyla ilerleme oranı (%23,73) ve takım yolu deseninin (%10,90) izlediği elde edilmiştir.
- Ana etkiler grafiğine göre, iş parçası titreşiminin kesme hızı, ilerleme oranı, aksel talaş derinliği ve uç yarıçapı ile doğru; radyal talaş derinliği ile ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Spiral takım yolu deseninde zig-zaga göre %8,5'luk; kuru işlemede vorteks tüpe göre %6,19'luk ve standart pens başlığında bilyalıya göre %4,2'lik düşüş elde edilmiştir.
- Metot optimum titreşimi 150 m/dk'luk kesme hızında, 200mm/dk'luk ilerleme oranında 1mm'lik aksel talaş derinliğinde, 8mm'lik radyal talaş derinliğinde, 0,4mm'lik uç yarıçapında spiral takım yolu deseninde, kuru işlemede ve standart pens tutuculu 0.0296 mm olarak tahmin etmiştir. Aynı şartlarda gerçekleştirilen 3 adet doğrulama deneyinde ortalama 0,0262 mm'lik titreşim değeri tespit edilmiş olup, ilgili değer belirlenen güven aralığında yer aldığı, böylece metodun sistemin optimizasyonunu %95 güven seviyesinde yeterli doğrulukta gerçekleştirdiği elde edilmiştir.
- Ayrıca 16 adet deneye ait sonuçlar incelendiğinde, 2 no'lu testte 0,02996 mm'lik en düşük titreşim elde edilmiş olup, önerilen metotla %12,55'lik iyileştirme sağlandığı tespit edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: 2024-106.

KAYNAKLAR

- Brezocnik, M., Kovacic, M., & Ficko, M. (2004). Prediction of surface roughness with genetic programming. *Journal of Materials Processing Technology*, 157–158, 28–36.
- Chen, J. C., & Savage, M. (2001). A fuzzy-net-based multilevel in-process surface roughness recognition system in milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17, 670–676.
- Guo, M., Ye, Y., Jiang, X., & Wu, C. (2020). Comprehensive effect of multi-parameters on vibration in high-speed precision milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108(7), 2187–2195.
- Guo, M., Wang, J., Guo, W., Liu, J., & Jiang, X. (2022). An unformed chip thickness approach to study the influence of process vibration on machining performance in milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(7), 5363–5375.
- Lou, S. J., & Chen, J. C. (1999). In-process surface roughness recognition (ISRR) system in end-milling operation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15, 200–209.
- Omoniyi, P. (2025). Comparative study and prediction of machining vibration during milling of AA6061 alloys under sunflower vegetable oil. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 20(6), 322–333.
- Pinar, A. M. (2013). Optimization of process parameters with minimum surface roughness in the pocket machining of AA5083 aluminum alloy via Taguchi method. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38, 705–714.
- Pinar, A. M., Filiz, S., & Ünlü, B. S. (2016). A comparison of cooling methods in the pocket milling of AA5083-H36 alloy via Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83, 1431–1440.
- Silva, F. J., Martinho, R. P., Magalhães, L. L., Fernandes, F., Sales-Contini, R. C., Durão, L. M., & Sousa, V. F. (2024). A comparative study of different milling strategies on productivity, tool wear, surface roughness, and vibration. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(3), 115.
- Tuyboyov, O., Muxiddinov, Z., Sirojiddinov, S., Aliyeva, M., & Urinov, N. (2025). Optimization of cutting depth parameters to achieve stability in the machining process. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 627, p. 04009). EDP Sciences.
- Zagórski, I., Korpysa, J., & Weremczuk, A. (2021). Influence of tool holder types on vibration in rough milling of AZ91D magnesium alloy. *Materials*, 14(10), 2517.

4. Bölüm

Türkiye’de Yapı Sağlığı İzleme Sistemlerinin Bütüncül Değerlendirmesi: İleri Algılama Teknolojileri, Akıllı Hasar Tespit Algoritmaları ve Yaşam Döngüsü Yönetimi

Nusret BOZKURT¹, Orhan DURAK²

ÖZET

Türkiye'nin yüksek sismik risk kuşağında yer alması, köprüler, viyadükler ve yüksek binalar gibi kritik altyapıların güvenliğinin sağlanmasını mühendislik açısından zorunlu kılmış ve bu gereklilik Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) ile yasal bir çerçeveye oturtulmuştur. Bu çalışma, Türkiye'deki Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) uygulamalarını; kullanılan donanım teknolojileri, veri işleme metodolojileri ve yasal karar destek mekanizmaları ekseninde kapsamlı bir şekilde inceleyen bir derleme çalışmasıdır. Ülkemizdeki YSİ pratikleri incelendiğinde sistemlerin, tekil Küresel Konumlandırma Sistemleri (GNSS) ve Ağ RTK ölçümlerinden başlayarak günümüzde ivmeölçer, LVDT ve çeşitli çevresel sensörlerin eşzamanlı çalıştığı çoklu izleme ağlarına doğru büyük bir teknolojik evrim geçirdiği görülmektedir. Toplanan büyük verilerin anlamlandırılması aşamasında ise geleneksel frekans ayrıştırma metodlarının (FDD) yerini, yapısal modeldeki belirsizlikleri (epistemik hatalar) minimize eden Sonlu Eleman Model Güncellemesi (SEMG) ve yapay zeka (ANN) destekli hibrit hasar tespit algoritmaları almıştır.

Sonuç olarak, TBDY 2018 kapsamında yüksek binalarda zorunlu hale gelen ve deprem anında katlar arası öteleme oranlarını (drift ratio) hesaplayarak binanın "kullanılabilirliği" hakkında otomatik karar üreten bu sistemler, salt hasar tespit aracı olmanın ötesine geçmiştir. Aksine, yapısal performansın olasılıksal yöntemlerle tahmin edildiği proaktif Yaşam Döngüsü Yönetimi (LCM) için gerekli veri altyapısını oluşturarak, Türkiye'nin afet dirençli şehirler vizyonuna sağlam bir teknik zemin sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Türkiye, Yapı Sağlığı İzleme (YSİ), Sonlu Eleman Model Güncellemesi (SEMG), Akıllı Algoritmalar, Küresel Konumlandırma Sistemleri (GNSS), Yaşam Döngüsü Yönetimi (LCM).

¹ Bitlis Eren Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bitlis, Türkiye
<https://orcid.org/0000-0002-3737-8205>, * Sorumlu Yazar: nbozkurt@beu.edu.tr

² Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bitlis, Türkiye
<https://orcid.org/0009-0008-2958-785X>

Holistic Evaluation of Structural Health Monitoring Systems in Türkiye: Advanced Sensing Technologies, Intelligent Damage Detection Algorithms, and Life-Cycle Management

ABSTRACT

Türkiye's location in a high seismic risk zone has made ensuring the safety of critical infrastructure, such as bridges, viaducts, and high-rise buildings, an engineering necessity, and this requirement has been established within a legal framework by the Turkish Building Earthquake Code (TBDY 2018). This study is a comprehensive review examining Structural Health Monitoring (SHM) applications in Türkiye, specifically focusing on the hardware technologies utilized, data processing methodologies, and legal decision-support mechanisms. An evaluation of SHM practices in Türkiye reveals a major technological evolution from the initial use of singular Global Navigation Satellite Systems (GNSS) and Network RTK measurements to today's multi-sensor monitoring networks where accelerometers, LVDTs, and various environmental sensors operate simultaneously. In the phase of interpreting the collected big data, traditional frequency domain decomposition (FDD) methods have been replaced by Finite Element Model Updating (FEMU), which minimizes uncertainties (epistemic errors) in structural models, and artificial neural network (ANN)-supported hybrid damage detection algorithms. In conclusion, these systems, which became mandatory for high-rise buildings under TBDY 2018 and automatically generate decisions regarding building "usability" by calculating inter-story drift ratios during earthquakes, have evolved beyond being mere damage detection tools. Rather, by establishing the necessary data infrastructure for proactive Life-Cycle Management (LCM)—where structural performance is predicted using probabilistic methods—they provide a solid technical foundation for Türkiye's vision of disaster-resilient cities.

Keywords: Türkiye, Structural Health Monitoring (SHM), Finite Element Model Updating (FEMU), Intelligent Algorithms, Global Navigation Satellite Systems (GNSS), Life-Cycle Management (LCM).

1.GİRİŞ

Dünya genelinde yaşanan kritik altyapıların güvenliğinin sağlanması ve "akıllı şehir" konseptlerinin yaygınlaşması, Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) sistemlerini modern inşaat mühendisliğinin en hayati odak noktalarından biri haline getirmiştir. Bu küresel eğilimin yanı sıra, Türkiye'nin yüksek deprem tehlikesi taşıyan bir coğrafyada yer alması, köprüler ve yüksek binalar gibi kritik mühendislik yapılarının güvenliğini ve servis ömrünü sağlamada YSİ sistemlerini merkezi bir konuma yerleştirmiştir (Çelebi, 2019; Aytulun ve Soyöz, 2020). YSİ, yapıların hasar durumunu, modal periyotlar ve mod şekilleri gibi dinamik özelliklerdeki değişimleri gözlemleyerek geleneksel görsel değerlendirmelere göre daha hızlı ve tarafsız bir biçimde belirler (Aytulun ve Soyöz, 2020). Bu yaklaşımların, tasarım varsayımlarını doğrulama ve hasar tespitinde önemli katkılar sağladığı uluslararası literatürde yaygın olarak kabul görmektedir (Brownjohn vd., 2000; Uebayashi vd., 2015).

Küresel ölçekte elde edilen bu tecrübeler (Yi vd., 2013), Türkiye'deki YSİ uygulamalarının kronolojik gelişimine de yön vermiş ve süreç öncelikle jeodezik tekniklerin adaptasyonu ile başlamıştır. Özellikle düşük frekanslı hareketlerin ve mutlak yer değiştirmelerin ölçümünde GNSS teknolojisi, ivmeölçer verilerindeki entegrasyon hatalarını ortadan kaldırarak daha güvenilir sonuçlar sunma potansiyeli göstermiştir (Akpınar vd., 2017). Ulusal sürekli gözlem ağlarının (CORS-TR gibi) kurulmasıyla birlikte, Ağ RTK GNSS yöntemi mühendislik yapılarında yüksek hassasiyetle yer değiştirme tespiti için yaygın bir araç haline gelmiştir (Akpınar vd., 2017; Kurt vd., 2013; Eren vd., 2009).

Büyük ölçekli ulaşım yapılarından elde edilen bu deneyimler, sismik riskin yüksek olduğu kent merkezlerine taşınmış ve YSİ sistemlerinin yüksek binalarda kurulumu, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) tarafından yasal bir zorunluluk haline getirilmiştir (Aytulun ve Soyöz, 2020). Bu kapsamda, İstanbul'daki yüksek binalarda dinamik özelliklerin sürekli izlenmesi için gerçek zamanlı analiz yazılımları geliştirilmiştir. Bu yazılımlar, titreşim verilerini otomatik işleyerek alarm verebilme kapasitesine sahiptir (Çelebi vd., 2004; Çelebi, 2019). Eşzamanlı olarak, Haliç Metro Geçiş Köprüsü gibi kompleks yapılar 61 sensör içeren kalıcı YSİ ağlarıyla donatılmış (Temur vd., 2017) ve bu verilerin işlenmesinde doğrusal olmayan ileri dinamik analiz metodolojilerine (Felber, 1993) başvurulmuştur.

Tüm bu teknolojik ve yasal gelişmelerin ışığında, son yıllarda YSİ'nin odak noktası salt hasar tespitinden ziyade, yapısal güvenilirliğe dayalı Yaşam Döngüsü Yönetimi (LCM) çerçevesinde gelecekteki performans tahminine doğru kaymıştır (Yıldırım, 2023). Yapısal tanılama (SEMG) süreçlerindeki epistemik belirsizlikleri (modelleme ve ölçüm hataları) yönetmek ve model parametrelerini

optimize etmek için Genetik Algoritmalar (GA) ve Bulanık Mantık gibi akıllı hesaplama teknikleri kullanılmaktadır (Erdoğan, 2013). Bu ileri yaklaşımlar, bakım maliyetlerini optimize etmeyi ve beklenen hasar tespit gecikmesini en aza indirmeyi amaçlayan LCM stratejilerini desteklemektedir (Okasha ve Frangopol, 2012; Kim ve Frangopol, 2018).

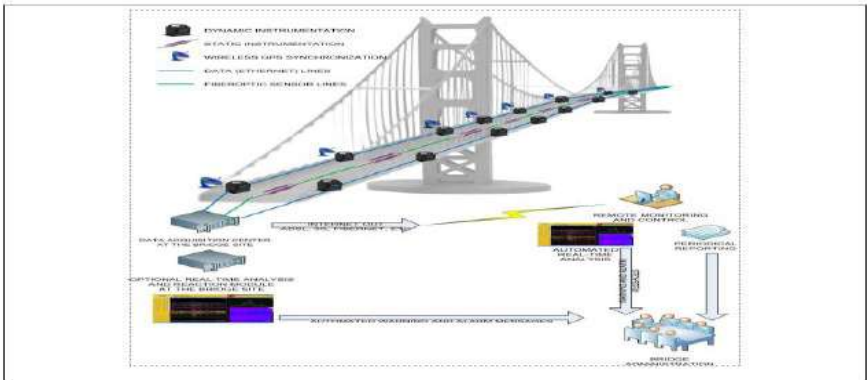
Literatürde Türkiye'deki belirli yapıları tekil olarak inceleyen değerli çalışmalar bulunmasına rağmen; donanım teknolojilerindeki evrimi, veri işleme algoritmalarındaki gelişimi ve yasal mevzuatın (TBDY 2018) getirdiği dönüşümleri tek bir çerçevede sunan bütüncül bir kaynak eksikliği göze çarpmaktadır. Bu derleme çalışması, Türkiye'deki YSİ ve tahmin sistemlerinin belirtilen kronolojik ve çok boyutlu gelişimini incelemeyi ve bu literatür boşluğunu doldurmayı amaçlamaktadır.

2.YAPI SAĞLIĞI İZLEME ÇALIŞMALARINDA KULLANILAN ARAÇ, GEREÇ, MAKİNA VE EKİPMANLAR

2.1 Ölçüm ve Algılama Ekipmanları (Sensörler)

2.1.1 İvmeölçer (Accelerometer)

İvmeölçerler, bir yapıya yerleştirilen ve titreşim veya hareketten kaynaklanan ivme verilerini toplayan sensörlerdir. Yapısal sağlık izleme sistemlerinin temel bileşenlerinden olan bu cihazlar, geleneksel olarak yapıdaki deplasmanların, dinamik özelliklerin ve olası hasarların belirlenmesinde kullanılırlar. Yapıdan toplanan ivme ölçümlerinin analizi sonucunda binanın modal periyot, şekil ve sönümlenme katsayısı gibi özellikleri belirlenebilir. Ayrıca, gerçek zamanlı yer değiştirme ve ötelenme oranlarını hesaplamak için ivme zaman serisi verilerinin çift integrasyonu yoluyla kullanılırlar. Burulma modlarını tanımlamak amacıyla yüksek binaların üst ve orta katlarında, yapının merkezinden uzak noktalara ek ivmeölçerler yerleştirilir (Aytulun ve Soyöz, 2020) (bkz. Şekil 1).



Şekil 1. İvme Ölçer

2.1.2 GNSS (Global Navigation Satellite System) ve KKS Alıcıları ile Ağ RTK Yöntemi

GNSS alıcıları, uydu sinyallerini kullanarak yüksek hassasiyetle konum ve zaman bilgisi elde eden cihazlardır; KKS (Küresel Konumlama Sistemi) terimi de benzer sistemler için kullanılmaktadır. GNSS tekniği, mühendislik yapılarındaki deplasmanların belirlenmesinde sağladığı yüksek doğruluk ve kullanım kolaylığı nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Özellikle yüksek binaların çatısına yerleştirilen diferansiyel KKS sistemleri, zemindeki referansa göre göreceli yer değiştirmeleri doğrudan ölçmek için kullanılır (Çelebi, 2019). Düşük frekanslı salınımlarda ve yarı-statik hareketlerde GNSS/KKS teknolojisi, ivmeölçer verilerindeki entegrasyon kaynaklı sapmaları (drift) ortadan kaldırdığı için mutlak deplasman miktarlarını çok daha doğru tespit edebilmektedir (Akpınar vd., 2017). Şekil 2'de gösterilen GNSS teknolojisine dayanan Ağ RTK (Network RTK) yöntemi ise, sabit GNSS referans istasyon ağları (CORS-TR, İSKİ-UKBS gibi) kullanarak yapısal hareketleri yüksek doğrulukta izlemeyi sağlayan bir ölçme tekniğidir. Ağ RTK, YSİ çalışmalarında deplasman ve titreşim frekanslarının belirlenmesinde oldukça uygundur. Türkiye'de CORS-TR (TUSAGA-Aktif) gibi ulusal sürekli gözlem ağları, 24 saat boyunca anlık RTK düzeltmeleri göndererek yatayda 2-3 cm, düşey yönde ise 3-4 cm civarında konum belirleme doğruluğu sağlamaktadır. Bu yöntem, salt deplasmanların ve yapı dinamik özelliklerinin belirlenmesini sağlaması açısından ivmeölçerlere dayalı geleneksel ölçümlere göre avantajlı konumdadır (Akpınar vd., 2017; Eren vd., 2009; Kurt vd., 2013).



Şekil 2. GNSS Konumlandırma

2.1.3 LVDT (Lineer Yer Değişim Algılayıcısı)

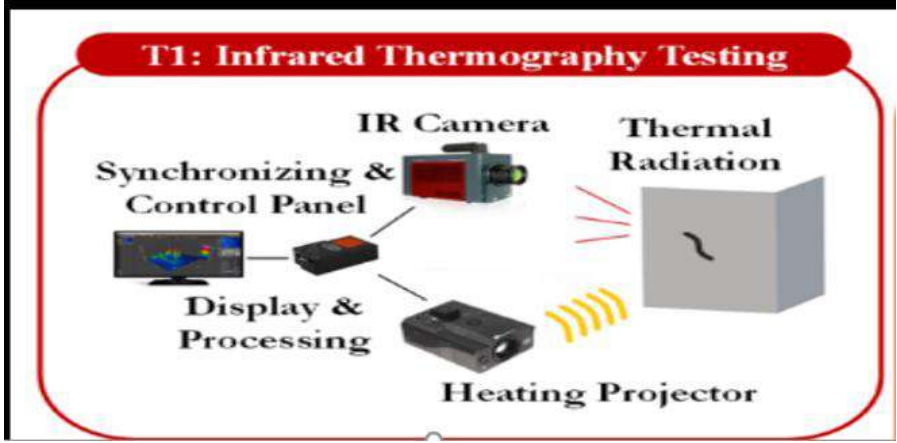
LVDT (Lineer Yer Değişim Algılayıcısı) Lineer değişken diferansiyel transformatör, fiziksel yer değiştirmeyi yüksek hassasiyetle ölçen elektromekanik bir cihazdır (bkz. Şekil 3). Genellikle laboratuvar ortamında, örneğin sarsma tablası testlerinde, uygulanan protokol kapsamında oluşturulan gerçek deplasman değerlerini yüksek doğrulukla belirlemek için kullanılır. Bu sayede, GNSS gibi yeni ölçüm yöntemlerinden elde edilen deplasman verilerinin doğruluğu, bu bilinen gerçek değerlerle karşılaştırılarak test edilebilir (Akpınar vd., 2017)



Şekil 3. Yer Değişim Algılayıcısı

2.1.4 Sıcaklık, Rüzgâr ve Yer Değişirme / Eğim (Tilt) Sensörleri

Yapının çevresel ve statik durumunu izleyen ve genellikle kalıcı olarak kurulan bu sensörler, yapının sıcaklık ve rüzgâr gibi çevresel şartlar ile deprem gibi dış kuvvetler altındaki hareketlerini ve büyüklüğünü belirlemek için kullanılır. Örneğin, Haliç Köprüsü gibi büyük yapılarda yapısal sıcaklık, meteorolojik veriler ve eğim verileri sürekli kaydedilmektedir. Bu çevresel veriler, mod frekanslarındaki değişim gibi yapısal davranışların çevresel etkiler altında nasıl değiştiğini incelemeye olanak tanır (Aytulun ve Soyöz, 2020; Temur vd., 2017) (bkz. Şekil 4).



Şekil 4. Sıcaklık algılama yöntemleri

2.1.5 Lazer Yer Değiştirme Sensörü

Lazer teknolojisini kullanarak temassız olarak uzaktan yer değiştirmeyi ölçen sensörlerdir. Özellikle laboratuvar ortamında, kompozit malzemelerden imal edilen kirişler gibi yapılara darbe kuvveti (çekiç ile ani kuvvet vb.) uygulandığında ortaya çıkan salınımların ve yer değiştirmelerin alınmasında kullanılır (Pekedis ve Yıldız, 2016).

2.1.6 Fiber Optik ve Piezoelektrik Sensörler

Fiber Optik Sensörler (FOS), hafif olmaları, küçük boyutları, elektromanyetik girişime karşı bağımsızlıkları ve korozyon dirençleri nedeniyle YSİ sistemlerinde etkili bir alternatif olarak giderek daha fazla tercih edilmektedir (Mardanshahi, 2025). Özellikle Fiber Bragg Izgarası (FBG) tabanlı sensörler, köprü ve binalarda gerinim (strain) ve sıcaklık değişimlerini yüksek hassasiyetle ölçmek için yaygın olarak kullanılır. Diğer yandan piezoelektrik sensörler (transdüserler) ise malzemelerin piezoelektrik etkisini kullanarak basınç, korozyon, gerinim ve ivme değişimlerini tespit eder. Bu akıllı sensör tipleri, yüksek frekanslı titreşimlerin ve yapısal çatlakların erken tespitinde oldukça başarılı sonuçlar vermektedir (Sundravel vd., 2025).

2.2 Test ve Veri İşleme Donanımı

2.2.1 Sarsma Tablası (Shake Table)

Yapı modellerine veya test numunelerine kontrollü hareketler (titreşimler, deplasmanlar) uygulayan büyük bir elektro-mekanik cihazdır. Sarsma tablası, Şekil 5'te de görülebileceği üzere YSİ projelerinde geliştirilen ölçme sistemlerinin (örneğin GNSS modülleri) performansını test etmek amacıyla

kullanılır. Tek eksen üzerinde harmonik ve rastgele genlikli ivme veya deplasman protokolleri uygulayabilme yeteneğine sahiptir (Akpınar vd., 2017).



Şekil 5. Sarsma tablası ve karşı ağırlık düzeni.

2.2.2 Veri Toplama Cihazları (Data Acquisition Systems)

Sensörlerden gelen analog verileri dijital formata dönüştürerek işlenmeye hazır hale getiren donanımdır. YSİ sistemleri, yapıdan yüksek kaliteli verilerin toplanmasına olanak sağlayan veri toplama cihazlarını içerir. Laboratuvar testlerinde NI 9234 tipi cihazlar kullanılarak titreşim verileri alınabilirken (Pekedis ve Yıldız, 2016), gerçek zamanlı izleme sistemlerinde sunucular analog verileri sayısallaştırır, ön işlemden geçirir ve yayımlar (Çelebi, 2019).

Elektriksel sistemlerde ölçüm doğruluğunu etkileyen harmonik bozunumlar ve sinyal kalitesi problemlerinin giderilmesi, veri toplama ve analiz süreçlerinin güvenilirliği açısından kritik bir öneme sahiptir (Palta ve Güldemir, 2019).

2.2.3 IoT Tabanlı Mikrodenetleyiciler

Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı mikrodenetleyiciler, sistem geliştiricileri için sıklıkla tercih edilen, düşük maliyetli ve küçük boyutlu donanımlardır. YSİ literatüründe akıllı sensör düğümleri olarak da geçen bu cihazlara en iyi örneklerden biri Raspberry Pi'dir. Yapı taşıyıcı birimlerin anlık takibini gerçekleştiren prototip sistemlerde ölçüm takibini yapmak ve verileri merkezi bir bilgisayara/sunucuya göndermek amacıyla kullanılır. Taşıyıcı elemanlardaki gerilim veya fiziksel bütünlük değişimlerini gerçek zamanlı izlemek için tercih edilmektedir (Kaymakçı vd., 2023).

2.3 Analiz, Modelleme Ve Raporlama Yazılımları

2.3.1 Yapı Sağlığı İzleme Yazılımları (YSİ Yazılımı)

Yapılardan toplanan verileri otomatik olarak analiz eden, uzaktan veri transferini gerçekleştiren, sonuçları arşivleyen ve yapının durumu hakkında uyarı mesajları üretebilen özel programlardır. Bu yazılımlar; frekans ve zaman uzayında modal analiz yaparak modal frekanslar ve sönümlenme oranları gibi dinamik özellikleri elde eder. Filtreleme metotları kullanarak deplasman ile katlar arası öteleme oranlarını hesaplar ve olası bir deprem sırasında dalga yayılım hızını tahmin eder. Ayrıca, hesaplanan değerleri önceden tanımlanmış eşiklerle karşılaştırarak alarm sistemlerini otomatik olarak devreye sokma kapasitesine sahiptirler (Çelebi, 2019; Celebi vd., 2004).

Yapı Sağlığı İzleme sisteminin genel mimarisi ve veri akışı Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) Sisteminin Genel Mimarisi ve Veri Akışı

Aşama	Amaç ve İşlev	Kullanılan Teknolojiler ve Yöntemler	Kaynaklar
1. Veri Toplama ve Algılama	Fiziksel sinyallerin (titreşim, deplasman, gerinim) ölçülmesi.	İvmeölçerler (MEMS), GNSS alıcıları, Fiber Optik Sensörler (FOS), Piezoelektrik transdüserler.	(Sofi vd., 2022)
2. Veri İletimi ve Yönetimi	Verilerin merkezi bir sisteme (sunucu/bulut) aktarılması ve ön işleme (gürültü filtreleme, sıkıştırma).	Kablosuz Sensör Ağları (WSN), Nesnelerin İnterneti (IoT), 5G teknolojileri.	(Malekloo vd., 2022)
3. Sağlık Değerlendirmesi (Tanılama)	Veri analizi ve hasar tespiti. YSİ aksiyomlarına göre hasar varlığı, konumu ve şiddetinin belirlenmesi.	Modal Analiz (Frekans/Mod Şekli), Yapay Sinir Ağları (ANN), Temel Bileşen Analizi (PCA), Zaman Serileri Modellemesi.	(Rytter, 1993)
4. Tahmin ve Karar Desteği	Yapının gelecekteki performansının (kalan ömür) tahmin edilmesi ve bakım/müdahale kararı verilmesi.	Makine Öğrenimi (ML), Derin Öğrenme (DL), Dijital İkiz (DT) simülasyonları.	(Wang, 2024)

(Not: Bu tablonun genel mimarisi ve veri akışı yaklaşımları Zhang vd. (2025), Sundravel vd. (2025) ve Wang vd. (2025) çalışmalarından temel alınmış olup; tablodaki aşamaların detayları sırasıyla Sofi vd. (2022), Malekloo vd. (2022), Rytter (1993) ve Wang (2024) çalışmalarından derlenmiştir.)

3.YAPI SAĞLIĞI İZLEME SİSTEMLERİNDE KULLANILAN ANALİZ METOTLARI VE ALGORİTMALAR

3.1 Sistem Tanımlama ve Dinamik Analiz Yöntemleri

Yapısal Tanılama (Structural identification), deneysel veriler ışığında girdi ve çıktılar arasındaki ilişkiyi karakterize etmek amacıyla gözlemler yardımıyla matematiksel modeller geliştirme alanıdır ve yapının modal parametrelerini belirlemeyi amaçlar (Erdoğan, 2013). Bu alanda en sık başvurulan yöntemler aşağıda özetlenmiştir.

3.1.1 Transfer Fonksiyonu Tepe Noktası Seçimi

Yapıya etkileyen çevresel titreşimlerin (rüzgâr, trafik vb.) frekans alanında analiz edilerek yapının doğal titreşim frekanslarının bulunması yöntemidir (Temur vd., 2017). Bu yöntem, çevresel salınımın frekans alanında çözümü yapılarak frekans piklerinin seçilmesiyle modlara ait frekans değerlerinin bulunmasını içerir (Temur vd., 2017; Felber, 1993). Bir sinyalin frekans içeriği, Fourier dönüşümü kullanılarak araştırılır (Temur vd., 2017; Fourier, 1822). Frekans spektrumunda görülen pik değerler, incelenen yapıdaki salınımın hangi titreşim modunda daha baskın olduğunu gösterir. Sinyalin alınan parçasının genlik ortalaması sıfır olmayabileceği için, genellikle “detrend” işlemi uygulanarak sinyal genlik ortalaması sıfıra çekilir. Bu yöntem, uygulama kolaylığı ve mod frekanslarının bulunmasında yeterli olması nedeniyle sıkça tercih edilmektedir (Temur vd., 2017).

3.1.2 Özgün Sistem Gerçekleştirme Algoritması (ERA)

Sisteme ait girdi ve çıktı verilerini kullanarak sistem parametrelerini (frekans, mod şekli, sönüm) belirleyen ve matematiksel sistemin gerçekleştirilmesini sağlayan bir zaman alanı yöntemidir. ERA, esasında Ho-Kalman algoritmasının geliştirilmiş olup, sistem parametrelerini belirlemekle kalmayıp sistemin gerçekleştirilmesini de sağlar (Temur vd., 2017; Juang ve Pappa, 1985). Bu yöntem, sinyal gürültüsünün etkisinin yok edilmesi için Tekil Değer Ayırıştırma (SVD) yöntemini kullanır (Temur vd., 2017).

3.1.3 Frekans Alanında Ayırıştırma Metodu (FDD)

Modal tanımlama için frekans alanında çalışan ve çevresel titreşim ölçümlerindeki gürültünün etkisini azaltarak modal özellikleri yüksek kesinlikte bulmayı sağlayan bir yöntemdir (Temur vd., 2017). FDD yönteminde, pik seçiminin basitliği korunarak ölçümler içeriğindeki gürültünün çok olduğu durumda dahi yüksek hassasiyette modal özelliklerin bulunabilmesi hedeflenir (Temur vd., 2017; Brincker vd., 2000, 2001).

3.2 Model Tabanlı Hasar Tespit Algoritmaları

Hasar tespiti, yapıdaki rijitlik düşüşlerinin doğal frekansları değiştirmesi prensibine dayanır. Yerel hasarları tanımak için yapının mod şekillerinin incelenmesi gerekir; bu durum, deformasyonların yapının eğrilik (curvature) parametrelerini değiştirmesi anlamına gelir. Bu aşamada hesaplamalar için ihtiyaç duyulan eğrilik ve gerinim verileri, ivmeölçerlerden alınan zaman serisi yer değiştirme verilerinin entegrasyonu ile dolaylı olarak hesaplanabileceği gibi, günümüzde Fiber Optik Sensörler (FBG) veya modern elektriksel gerinim ölçerler (strain gauges) yardımıyla çok daha yüksek doğrulukla ve doğrudan sahada ölçülebilmektedir. (Pekedis ve Yıldız, 2016).

3.2.1 Aralıklı Düzgünleştirme Metodu (ADM)

Hasarlı bir yapıya ait mod şekilleri kullanılarak interpolasyon tekniğiyle sağlıklı yapının mod şekillerini tahmin etme ve bu tahmin ile ölçülen hasarlı durum arasındaki farkı kullanarak hasar bölgesini tespit etme yöntemidir (Pekedis ve Yıldız, 2016). ADM tekniğinde, sağlıklı bir yapıya ait mod şekillerinin düzgün bir yüzeye sahip oldukları kabul edilir (Pekedis ve Yıldız, 2016). Hasara uğramış yapının mod şekilleri (yer değiştirme), düğüm noktaları arasındaki mesafe (Δx) dikkate alınarak eğrilik mod şekline (κ) dönüştürülür (Pekedis ve Yıldız, 2016). Ardından, hasarlı yapının eğrilik modu ($\kappa_{\text{Ölçülen}}$) ile tahmin edilen sağlıklı yapının eğriliği (κ_{Tahmin}) arasındaki farkın karesi alınarak hasar endeksi ($ADM_D(x, y)$) hesaplanır (Pekedis ve Yıldız, 2016):. Bu durum Eşitlik 1'de verilmiştir.

$$ADM_D(x, y) = (\kappa_{\text{Ölçülen}} - \kappa_{\text{Tahmin}})^2 \quad (1)$$

Eğer yapının hasarsız durum verileri bilinmiyorsa, hasarlı yapıya ait eğrilik modları, yüzey uydurma algoritmasıyla (örneğin dördüncü dereceden polinom ile) sağlıklı hale getirilmiş gibi kabul edilerek tespitler yapılır (Pekedis ve Yıldız, 2016).

3.2.2 Birim Şekil Değiştirme Enerjisi Yaklaşımı (BŞDE)

Yapıdaki hasarın sebep olduğu eğilme rijitliğindeki değişimin, mod şekillerindeki değişime etkisini temel alarak hasar bölgesini belirleyen model tabanlı bir yöntemdir. Bu yaklaşım, hasardan kaynaklanan eğilme rijitliğinin değişmesi ve buna bağlı olarak mod şekillerinde oluşan değişimlerle hasarı belirler. BŞDE'de hasar, Eşitlik 2'de sunulduğu üzere, ölçülen eğrilik ($\kappa_{\text{Ölçülen}}$) ile sağlam yapıya ait eğrilik ($\kappa_{\text{Sağlam}}$) arasındaki farkın karesinin entegrasyonuna dayanan bir formülle belirlenir (Pekedis ve Yıldız, 2016):

$$B\text{ŞDE} = \int (\kappa_{\text{Ölçülen}} - \kappa_{\text{Sağlam}})^2 dx \quad (2)$$

Eğer yapının hasar görmeden önceki κ değerleri bilinmiyorsa, tıpkı ADM'de olduğu gibi eğri uydurma teknikleriyle, eğrideki lineer olmayan kısımlar düzleştirilerek sağlıklı durum tahmin edilebilir (Pekedis ve Yıldız, 2016). ADM ve BŞDE algoritmaları, model tabanlı YSİ tekniklerinde kompozit kiriş ve levhaların iç bölgelerinde oluşan delaminasyonlar gibi hasarları tahribatsız bir şekilde tahmin etmek için kullanılır (Pekedis ve Yıldız, 2016).

3.3 YAPISAL PERFORMANS VE GÜVENİLİRLİK DEĞERLENDİRME UYGULAMALARI

3.3.1 Gerçek Zamanlı Ötelenme Oranları ve Kullanılabilirlik Kararı

Yapının hasar durumunu, ardışık katlar arasındaki nispi yer değiştirme miktarları üzerinden izleyerek, kritik bir sarsıntı sonrası yapının derhal kullanılabilirliğine karar verme yöntemidir (Çelebi, 2019). Ötelenme oranları, bir yapının hasar durumunun ana parametrik göstergesidir ve performans seviyesiyle doğrudan ilişkilidir (Çelebi, 2019; Aytulun ve Soyöz, 2020). Gerçek zamanlı yer değiştirme bilgisi, ivmeölçer zaman serisi verilerinin çift entegrasyonu veya yüksek binaların çatılarına yerleştirilen diferansiyel Küresel Konumlama Sistemi (KKS) ile elde edilir. Hesaplanan ötelenme oranları, önceden tanımlanmış eşik seviyeleri aşıldığında alarm vererek binanın iskâna uygun olup olmadığına dair karar almayı kolaylaştırır ve mal sahiplerine pratik alternatifler sunar (Çelebi, 2019).

3.3.2 Yapı İçi Dalga Yayılım Hızı / Süresi Hesabı

Deprem sırasında yapı boyunca ilerleyen sismik dalgaların hızını veya seyahat süresini tespit ederek, yapısal sistemdeki çatlak veya hasarların varlığını dolaylı yoldan belirleme tekniğidir (Aytulun ve Soyöz, 2020; Çelebi, 2019). Yapısal sistemde çatlaklar varsa dalgaların seyahatleri gecikeceği için bu değişimler hasar tespitinde kritik rol oynar (Çelebi, 2019; Safak, 1999). Yüksek binalarda, sensör bulunan katların titreşim verisi çapraz ilişki ve ters evrişim metotlarıyla ayrıştırılarak yapıdaki dalga yayılım formu oluşturulur ve yapı yüksekliği dikkate alınarak dalga yayılım hızı hesaplanır (Aytulun ve Soyöz, 2020).

3.3.3 Yapısal Güvenilirliğe Dayalı Değerlendirme

Yük ve dayanım gibi yapısal parametrelerin rastgele doğasını hesaba katarak, yapının belirli bir sınır durumunda (nihai dayanım kaybı veya servis verilebilirlik) yetersiz kalma olasılığının matematiksel olarak formüle edilmesidir (Yıldırım, 2023). Yapısal güvenilirlik, performans fonksiyonu $g = R - L$ 'nin (R:

Dayanım, L: Yük etkisi) olasılıksal bir değerlendirme yapmak için kullanılır (Yıldırım, 2023). Yetersizlik olasılığının (p_f) tahmini, Güvenilirlik Endeksi (β) aracılığıyla yapılır; burada Güvenilirlik = $1 - p_f$ dir (Yıldırım, 2023). Genellikle, Birinci Dereceden Güvenilirlik Yöntemi (FORM) ve Monte Carlo Simülasyonu gibi teknikler kullanılır (Yıldırım, 2023). YSİ teknolojileri, yapının deformasyon/şekil değiştirme miktarı ve tepkileri gibi gerçek verileri yakalayarak, bu güvenilirlik değerlendirme modellerindeki rastgele değişken girdi parametrelerini doğrulamak veya iyileştirmek için kullanılır (Yıldırım, 2023). Bu yaklaşım, köprü yöneticilerine maliyet, güvenlik ve ömür tahminlerine dair rasyonel, proaktif yönetim stratejileri sunar (Yıldırım, 2023)

3.4 İleri Hesaplama Ve Optimizasyon Teknikleri

3.4.1 Sonlu Eleman Modeli Güncellemesi (SEMG)

Yapıdan toplanan deneysel ölçümler ile yapının Sonlu Eleman (SE) modelinden elde edilen tahminler arasındaki farkı minimize ederek, model parametrelerini (rijitlikler, kütleler, sınır koşulları) gerçek yapıya uyacak şekilde optimize etme yöntemidir. SEMG, çıktıları bilinen bir sistemin girdi parametrelerinin arandığı bir "ters problem" olarak bilinir. Çözüm uzayının yerel minimumlar içermesi nedeniyle klasik gradyan tabanlı yöntemler yerine Genetik Algoritmalar (GA), Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ve Harmoni Araştırması (HA) gibi popülasyon tabanlı global optimizasyon yöntemleri tercih edilir. (Erdoğan, 2013).

3.4.2 Bulanık Sonlu Eleman Modeli Güncellemesi (BSEMG)

SEMG problemine, modelleme ve ölçüm hatalarından kaynaklanan epistemik belirsizlikleri (bilgi eksikliği) nicelendirmek için olasılık tabanlı olmayan bulanık analiz yöntemlerinin dâhil edilmesidir. Bulanık yöntemlerde problemin parametreleri, üyelik fonksiyonları veya bulanık sayılar ile tanımlanır. BSEMG’de, ölçülen deneysel verilerin güncellenen bulanık modelden elde edilen bulanık çıktı kümesine belirli bir üyelik derecesiyle ait olması gerektiği kısıtıyla optimizasyon yapılır. Bu yaklaşım, modelin kesin olmadığı durumlarda uzman görüşlerinin sisteme dâhil edilmesine olanak tanır (Erdoğan, 2013).

3.4.3 Yapay Sinir Ağları (ANN) ve Makine Öğrenimi (ML) Yaklaşımları

Son yıllarda toplanan devasa boyutlardaki sensör verilerinin analizinde ve YSİ süreçlerinin otomlaştırılmasında Makine Öğrenimi (ML) ve Yapay Zeka destekli yaklaşımlar kilit bir role sahip olmuştur (Malekloo vd., 2022; Wang, 2024).

Özellikle Yapay Sinir Ağları (ANN) ve Derin Öğrenme (DL) metotları, karmaşık yapısal sensör verilerindeki gizli örüntüleri (pattern) çıkarmada ve geleneksel algoritmaların çevresel değişkenlik ile gürültü kaynaklı zayıflıklarını aşmada yüksek dayanıklılık (robustness) göstermekte olup, bu tür yaklaşımların farklı veri türlerinin analizinde performansı artırdığı da literatürde ortaya konmuştur (Wang, 2024; Palta, 2026).

Sınırlı sayıda algılayıcının bulunduğu ağlarda, hasarlı elemanların (kolon, perde duvar vb.) bölgesel lokalizasyonu ve hasar şiddetinin doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için Gözetimli (Supervised) Öğrenme algoritmaları veya yapının hasarsız referans verisinden yola çıkarak anomali tespiti yapan Gözetimsiz (Unsupervised) Öğrenme modelleri (Temel Bileşen Analizi - PCA vb.) yaygın olarak kullanılmaktadır (Rytter, 1993; Nguyen, 2022).

Pratikte gerçek ölçekli altyapılardan (köprüler veya yüksek binalar) doğrudan yeterli miktarda "hasarlı durum" verisi elde etmek oldukça zor olduğundan, güncel uygulamalar fiziksel model ve verinin entegre edildiği hibrit yaklaşımlara evrilmiştir (Nguyen, 2022). Bu tür yaklaşımlarda; Sonlu Eleman Modelleri (FEM) kullanılarak yapının çok sayıda sanal hasar senaryosu üretilmekte, ANN bu sentetik veriler kullanılarak ön eğitime tabi tutulmakta ve sonrasında sahadaki gerçek zamanlı sensör verileriyle eşleştirilerek yapısal sağlığı kısıtlı sensör sayısına rağmen yüksek bir doğruluk payıyla tahmin edebilmektedir (Nguyen, 2022). Söz konusu ML ve DL algoritmaları, Yaşam Döngüsü Yönetimi (LCM) ve kestirimci bakım (predictive maintenance) konseptleri için yapı sağlığını sürekli ve otomatik olarak değerlendiren, siber-fiziksel sistemlerle entegre bir karar destek mekanizması sunmaktadır (Yıldırım, 2023; Wang vd., 2025).

4. TÜRKİYE'DE YAPI SAĞLIĞI İZLEME SİSTEMLERİNİN KRONOLOJİK GELİŞİMİ VE İYİ UYGULAMA ADIMLARI

Türkiye'de Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) sistemlerinin iyi uygulama adımları; yapısal hasarı önleme ve can kaybını en aza indirme amaçlarına odaklanarak, yapıların dinamik özelliklerinin belirlenmesi ile başlar (Şafak, 2007). Bu süreç, temel titreşim analizlerinden karmaşık yaşam döngüsü yönetim stratejilerine kadar uzanan aşamalı bir yapı sergilemektedir (Şafak, 2007; Yıldırım, 2023).

4.1. 2005-2007: Temel Titreşim Analizi ve Jeodezik (RTK GPS) Ölçümlerin Başlaması

Türkiye'deki büyük ölçekli altyapı yapılarının hareketlerinin izlenmesine dair ilk önemli uygulamalardan biri, 2005 yılında gerçekleştirilen Avrasya Maratonu sırasında yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında, dönemin adıyla Boğaziçi Köprüsü'nün (günümüzde 15 Temmuz Şehitler Köprüsü) hareketlerini

belirlemek amacıyla RTK GPS yöntemi ile ölçümler gerçekleştirilmiş; koşu, yürüyüş ve araç geçişi gibi aktiviteler karşısında köprü hareketleri zaman serileri analizi ile incelenmiştir. (Kalıcı izleme ağlarına dair güncel veriler Bölüm 5.2'de detaylandırılmıştır). Bu tür jeodezik yöntemler, yapısal deplasmanların belirlenmesinde yüksek doğruluk ve kullanım kolaylığı sağlamaktadır. 2007 öncesi dönemin iyi uygulama standartları, sensörlerin yapı üzerinde stratejik konumlandırılmasını ve toplanan verilerin Fourier dönüşümü ile bant-geçişli filtreleme gibi basit yöntemlerle analiz edilmesini gerektirir. Analitik modellere veya laboratuvar testlerine göre daha ekonomik ve daha doğru sonuçlar veren bu yerinde inceleme alternatifi sayesinde yapının modal karakteristikleri, burulma titreşimlerinin genliği ve yapı-zemin etkileşiminin mertebesi tayin edilebilmektedir. (Şafak, 2007).

4.2. 2013: Yapısal Tanılama ve İleri Optimizasyon Tekniklerinin Entegrasyonu

Süreç içerisinde sistemler salt hasar tespitinden çıkıp, gözlemler yardımıyla matematiksel modeller geliştirme alanı olan "Yapısal Tanılama" aşamasına geçmiştir (Erdoğan, 2013; Erdoğan ve Bakır, 2013). Bu aşamada temel iyi uygulama, deneysel veriler ile sonlu eleman modelinden elde edilen tahminler arasındaki farkı minimize etmeyi hedefleyen Sonlu Eleman Modeli Güncellemesi (SEMG) olmuştur (Erdoğan, 2013). Mekanik bir ters problem olan SEMG'nin çözümünde, çok modlu ve süreksiz fonksiyonların optimizasyonu için ideal olan Genetik Algoritmalar (GA) ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) gibi akıllı hesaplama teknikleri uygulanmıştır (Erdoğan, 2013).

Ayrıca, modelleme (kabuller, 3 boyutlu geometri zorlukları) ve sensör kaynaklı ölçüm hatalarından doğan epistemik belirsizlikleri nicelendirmek için Bulanık Sonlu Eleman Modeli Güncellemesi (BSEMG) formüle edilmiştir (Erdoğan, 2013). Karmaşık hasar modelleri yerine kiriş rijitliğinin düzgün azalması gibi basit hasar modellerinin kullanılması, hesaplama zamanı açısından daha avantajlı olduğu için tercih edilmiştir (Erdoğan ve Bakır, 2013; Erdoğan, 2013).

4.3. 2014-2016: Kritik Yapılarda Kalıcı İzleme ve Ulusal Ölçme Sistemleri

Kritik ve yüksek yatırım maliyetli altyapı projelerinde kalıcı sensör ağlarının kurulması, Türkiye'deki iyi uygulamaların önemli bir aşamasıdır (Temur vd., 2017). 15 Şubat 2014 tarihinde hizmete açılan Haliç Metro Geçiş Köprüsü üzerinde; sıcaklık, rüzgâr, yer değiştirme, eğim, ivme ve GPS sensörlerini

barındıran toplam 61 sensörlü kalıcı bir sağlık izleme ağı kurulmuştur (bkz. Şekil 6) (Temur vd., 2017).



Şekil 6. Haliç Metro Köprüsü

Söz konusu donanımların yüksek ithalat maliyetlerini kırmak amacıyla 2016 yılında TÜBİTAK (115Y250) desteğiyle ulusal ölçme sistemi projeleri başlatılmıştır (Akpınar vd., 2016). Bu kapsamda geliştirilen yerli prototipler sarsma tablalarında test edilmiş ve Ağ RTK GNSS yönteminin (bkz. Şekil 2) yapı sağlığı izleme çalışmalarında deplasman ve titreşim frekanslarının belirlenmesinde son derece uygun olduğu kanıtlanmıştır (Akpınar vd., 2016). Büyük veri sorununu çözmek için tehlikeli durum gözlenmediğinde ham verilerin silinmesi gibi modern kayıt stratejileri de bu dönemde planlanmıştır (Akpınar vd., 2016). YSİ sistemlerinin 1990'lardaki geleneksel donanımlardan, günümüzdeki büyük veri ve yapay zeka entegreli modern izleme ağlarına doğru geçirdiği bu evrim Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. YSİ Yaklaşımlarının Gelenekselden Güncele Evrimi ve Odak Noktaları

Kategori	Geleneksel Yaklaşım (1990'lar - 2000'ler)	Modern Yaklaşım (2010'lar - Günümüz)	Kaynaklar
Sensörler ve Veri	Geleneksel ivmeölçerler, uzaktan algılama (GNSS-RTK). Daha düşük örnekleme hızları.	FOS (Fiber Optik Sensör), WSN, MEMS ivmeölçerler, GNSS. Yüksek veri hacmi (Büyük Veri).	(Malekloo vd., 2022)
Analitik Metotlar	Model Tabanlı: Sonlu Elemanlar Modeli Güncellemesi (FEMU). Fiziksel modellere yüksek bağımlılık.	Veri Güdümlü: Yapay Zeka (AI), Makine Öğrenimi (ML), Derin Öğrenme (DL) algoritmaları.	(Wang, 2024)
Amaç ve Tahmin	Hasar tespiti (Seviye 1) ve sistem karakterizasyonu (modal özellikler).	Hasar tahmini (prognostik, Seviye 4), kestirimci bakım optimizasyonu.	(Wang, 2024; Wang vd., 2025)
Dijital Entegrasyon	Veri toplama ve depolama.	Dijital İkiz (DT): Fiziksel ve sanal sistemler arasında çift yönlü, gerçek zamanlı veri akışı ve simülasyon.	(Wang vd., 2025)

(Not: Bu tablo, YSİ yaklaşımlarındaki tarihsel evrimi göstermek amacıyla Wang (2024), Wang vd. (2025) ve Malekloo vd. (2022) çalışmalarından derlenerek oluşturulmuştur).

4.4. 2018 Sonrası: Yüksek Binalarda Yönetmelik Zorunluluğu ve Gerçek Zamanlı Performans İzleme

Sistemin yasal afet yönetimi boyutundaki en büyük dönüşümü, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) ile yüksek binalarda gerçek zamanlı YSİ sistemlerinin mecburi kılınmasıdır (Aytulun ve Soyöz, 2020; Çelebi, 2019). AFAD'ın desteklediği projeler kapsamında İstanbul'daki yüksek binalara YSİ sistemleri kurulmuş ve veriyi düzenli alıp otomatik transfer ve analiz eden yazılımlar geliştirilmiştir (Aytulun ve Soyöz, 2020; Akpınar vd., 2016).

Yazılım, ivme verilerinin integralinden filtreleme metotları kullanarak sensör bulunan katların deplasman değerlerini hesaplar ve doğrusal interpolasyon ile sensör bulunmayan katların bile katlar arası öteleme oranlarını (drift ratio) hızlı bir şekilde elde eder (Akpınar vd., 2017). Ötelenme oranları, bir yapının hasar durumunun ana parametrik göstergesidir (Aytulun ve Soyöz, 2020). Hesaplanan öteleme oranlarının önceden belirlenmiş eşik seviyeleriyle (örneğin %0.2–0.3) otomatik olarak kıyaslanması, olası bir deprem sonrası yapının iskâna uygunluğuyla ilgili güvenilir ve hızlı şekilde karar alınmasını sağlar (Aytulun ve Soyöz, 2020; Çelebi, 2019). Yazılım ayrıca yapının dalga yayılım hızını ve süresini de hesaplayabilmektedir (Aytulun ve Soyöz, 2020).

4.5. Günümüz (2022+): Hibrit Hasar Tespiti ve Yaşam Döngüsü Yönetimi (LCM)

Günümüzde YSİ sistemleri, yüksek enstrümantasyon maliyetlerini azaltmak amacıyla Modal Analiz Tabanlı Hibrit Hasar Tespiti yaklaşımlarına evrilmiştir (Nguyen, 2022). Ekonomik sorunlar nedeniyle kısıtlı sayıda sensör kullanılabilen bu yöntemde, hasarsız durumdaki matrisler Guyan statik yoğunlaşma prosedürü kullanılarak küçültülmektedir (Nguyen, 2022). Hasarlı katları tespit etmek için özdeğer probleminin ters çözümüne dayalı bir prosedür uygulanır; ardından Yapay Sinir Ağı (ANN) yöntemi ile hasarlı bileşenlerin (kolonlar, kirişler, perde duvarlar) yeri ve şiddeti yüksek duyarlılıkta tahmin edilir (Nguyen, 2022).

Bununla birlikte, modern YSİ vizyonu fiziksel yapı ile sanal model arasında gerçek zamanlı, çift yönlü veri akışını ve simülasyonu sağlayan Dijital İkiz (Digital Twin - DT) teknolojileri ile entegre olmaya başlamıştır (Wang vd., 2025). Türkiye'deki uygulamaların ulaşmayı hedeflediği en üst düzey iyi uygulama seviyesi ise bu tür siber-fiziksel sistemlerle desteklenen "Yapısal Güvenilirliğe Dayalı Değerlendirme" ve Yaşam Döngüsü Yönetimidir (Yıldırım, 2023). YSİ teknolojileriyle elde edilen yapısal tepkiler doğrudan eyleme geçirilebilmesi adına güvenilirlik endeksine (β) ve yetersizlik olasılığına (pf) dönüştürülmektedir (Yıldırım, 2023). Birinci Dereceden Güvenilirlik Yöntemleri veya Monte Carlo Simülasyonu kullanılarak yapılan bu güvenilirlik analizi, köprü yöneticilerine maliyet, güvenlik ve ömür tahminlerine dayalı proaktif ve akıllı yönetim stratejileri sunar (Yıldırım, 2023).

Türkiye'deki YSİ uygulamalarının ulaşmayı hedeflediği bu analiz derinliği ve hasar tespiti hiyerarşisi ise Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Yapısal Sağlık İzleme (YSİ) Hiyerarşisi: Hasar Tespiti Seviyeleri

Seviye	Tanımlama Görevi	Gerekli Analiz Türü	Türkiye Uygulama Örneği (Hedeflenen)
Seviye 1	Hasar Tespiti (Hasar Var/Yok)	Anomali Tespiti, Modal Frekans Değişimi	2019 Silivri Depremi sonrası yüksek binaların hızlı durum değerlendirmesi (Aytulun ve Soyöz, 2020).
Seviye 2	Hasar Lokalizasyonu (Yeri)	Mod Şekli Eğriliği, Deplasman/Gerinim Haritaları.	Haliç Köprüsü'nde doğrusal olmayan model ile hasar lokasyonunun belirlenmesi (Temur vd., 2017).
Seviye 3	Hasar Kantifikasyonu (Şiddeti)	Hasar İndekslerinin nicel tahmini, Rijitlik Azalma Miktarı.	Kirişlerin hasar görmüş bölgelerinde güvenilirlik endeksi tahmini (Yıldırım, 2023).
Seviye 4	Prognostik (Kalan Ömür Tahmini)	Yaşam Döngüsü Yönetimi (LCM), Yorulma Modellemesi, Risk Analizi.	FSM Köprüsü gibi uzun ömürlü yapılarda kestirimci bakım stratejilerinin geliştirilmesi (Bas vd., 2018).

(Not: Bu tablodaki yapısal sağlık izleme ve hasar tespiti hiyerarşisi Rytter (1993) ve Malekloo vd. (2022) çalışmalarından temel alınmış olup; tablodaki Türkiye uygulama örnekleri sırasıyla Aytulun ve Soyöz (2020), Temur vd. (2017), Yıldırım (2023) ve Bas vd. (2018) çalışmalarından derlenmiştir).

5. YAPI SAĞLIĞI İZLEME SİSTEMLERİNİN TÜRKİYE'DEKİ İYİ UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Türkiye'de Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) sistemleri, yüksek sismik tehlike taşıyan bir coğrafyada yer alan köprüler ve yüksek binalar gibi kritik mühendislik yapılarının güvenliğini ve servis ömrünü sağlamak amacıyla farklı yapı tipolojilerinde başarıyla uygulanmaktadır (Çelebi, 2019; Aytulun ve Soyöz, 2020). Sistemin uygulanması, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) ile yasal bir çerçeveye oturtulmuş ve belirli yapılarda mecburi kılınmıştır (Aytulun ve Soyöz, 2020). Önceki bölümlerde detaylandırılan veri toplama algoritmaları ve değerlendirme metotlarının sahaya yansımalarını gösteren ulusal düzeydeki iyi uygulama örnekleri aşağıda kategorize edilerek sunulmuştur.

5.1. Yüksek Binalarda Yönetmelik Tabanlı Gerçek Zamanlı İzleme

TBDY 2018'in getirdiği yasal zorunlulukların sahadaki en somut yansımaları, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) desteğiyle İstanbul'da projelendirilen ve YSİ sistemleri kurulan yüksek binalardır (Aytulun ve Soyöz, 2020). Bu kapsamda Şekil 7'de gösterilen AFAD Binası ve Şekil 8'de yer alan Zorlu Center gibi yapılar, modern izleme teknolojilerinin en yetkin örneklerini teşkil etmektedir. Bu yapılarda kurulan ve genellikle 200 Hz frekansında sürekli veri toplayan ivmeölçer ağları, deprem anında veya sonrasında binanın performansını hızlı, uzaktan ve objektif bir şekilde değerlendirmektedir (Aytulun

ve Soyöz, 2020). Sisteme entegre edilen yazılımlar; toplanan ivme verilerinin çift entegrasyonu yardımıyla sensör bulunmayan katların katlar arası öteleme oranlarını (drift ratio) ve yapı içi dalga yayılım hızlarını saniyeler içinde hesaplayabilmektedir (Akpınar vd., 2017; Aytulun ve Soyöz, 2020; Çelebi, 2019). Elde edilen verilerin, önceden tanımlanmış eşik seviyeleriyle (örn. %0.2–0.3) otomatik olarak kıyaslanması sayesinde, bu yüksek binaların sarsıntı sonrası iskâna uygunluğu (kullanılabilirliği) hakkında karar alıcılara anlık ve nesnel yönergeler sunulmaktadır (Aytulun ve Soyöz, 2020; Çelebi, 2019).



Şekil 7. AFAD Binası



Şekil 8. Zorlu Center

5.2. Mega Ulaşım Yapılarında Kalıcı ve Proaktif İzleme Ağları

Büyük mühendislik yapılarının ömürleri boyunca maruz kaldıkları çevresel ve dinamik etkileri gözlemek amacıyla kurulan kalıcı sensör ağları, ulaşım projelerinde kritik bir rol oynamaktadır (Temur vd., 2017). Bölüm 4.1'de de kronolojik başlangıcı verilen Türkiye'deki büyük ölçekli yapılara dair ilk önemli izleme adımlarından biri, Şekil 9'da görülen 15 Temmuz Şehitler Köprüsü'nde atılmıştır. 2005 yılında gerçekleştirilen bu çalışmalarda, köprü'nün dinamik hareketleri Ağ RTK GPS teknolojisi kullanılarak ivmeölçerlere kıyasla çok daha mutlak ve yüksek bir doğrulukla ($\pm 2-3$ cm) kayıt altına alınmış, farklı yükler (araç geçişi, yaya titreşimi) altındaki davranışı zaman serileri analizi ile incelenmiştir (Akpınar vd., 2017). Benzer şekilde, yüksek yatırım maliyetli ve stratejik öneme sahip Avrasya Tüneli (bkz. Şekil 10) gibi mega projelerde veya Fatih Sultan Mehmet Köprüsü gibi uzun ömürlü yapılarda kurulan sistemler, yalnızca anlık hasar tespiti yapmakla kalmayıp kestirimci bakım stratejilerinin geliştirilmesine de katkı sağlar (Bas vd., 2018). Toplanan YSI verilerinin doğrudan eyleme geçirilebilir Güvenilirlik Endeksine (β) ve yetersizlik olasılığına (pf) dönüştürülmesiyle, proaktif Yaşam Döngüsü Yönetimi (LCM) ve kestirimci bakım (Seviye 4) stratejilerinin sahada rasyonel bir şekilde uygulanması mümkün olmaktadır (Yıldırım, 2023).



Şekil 9. 15 Temmuz Şehitler Köprüsü



Şekil 10. Avrasya Tüneli

5.3. Tarihi Yapıların Sağlık İzlemesi ve Korunması

Türkiye'nin kültürel mirasının korunması bağlamında YSİ sistemleri, tahribatsız değerlendirme prensipleri sayesinde tarihi yığma ve kâgir yapılar için de vazgeçilmez bir araçtır. Sivas Divriği Ulu Cami (Şekil 11) ve Erzurum Oşki Kilisesi (Şekil 12) gibi asırlık mimari eserlerin izlenmesinde, çevresel titreşim analizleri (rüzgâr, trafik vb.) ve Transfer Fonksiyonu Tepe Noktası Seçimi gibi temel dinamik analiz yöntemleri kullanılarak yapısal karakteristikler tespit edilebilir (Şafak, 2007). Bu yapılar üzerinde gerçekleştirilen frekans alanı analizleri ve Fourier dönüşümleri, tarihi dokuya zarar vermeden mevcut modal özelliklerin (periyotlar, mod şekilleri, sönüm oranları) belirlenmesini ve yapı-zemin etkileşiminin tayin edilmesini sağlayarak, olası hasarların erken teşhisi ve doğru restorasyon müdahalelerinin planlanması için sağlam bir bilimsel zemin oluşturmaktadır (Şafak, 2007).



Şekil 11. Sivas Divriği Ulu Cami



Şekil 12. Oşki Kilisesi (Erzurum)

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Türkiye'nin yüksek sismik tehlike kuşağında yer alması, köprüler ve yüksek binalar gibi kritik mühendislik yapılarının dinamik davranışlarının sürekli izlenmesini ve hasar tespitlerinin nesnel verilere dayandırılmasını zorunlu

kılmaktadır. Bu çalışmada gerçekleştirilen bütüncül değerlendirme, Türkiye'deki Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) sistemlerinin 2005 yılında 15 Temmuz Şehitler Köprüsü'ndeki (eski adıyla Boğaziçi Köprüsü) RTK GPS ölçümleriyle başlayan tekil uygulamalardan, günümüzde çok sensörlü ağlara ve akıllı tahmin modellerine uzanan teknolojik evrimini ortaya koymaktadır. Başlangıçta ağırlıklı olarak yapısal periyot ve deplasman ölçümü odaklı olan bu sistemlerin, zamanla ivmeölçerler, LVDT, rüzgâr ve sıcaklık sensörlerinin entegrasyonu ile çevresel ve dinamik faktörleri eşzamanlı hesaba katan karmaşık izleme ağlarına dönüştüğü görülmektedir.

Büyük ölçekli yapılardan toplanan titreşim verilerinin işlenmesi safhasında, temel frekans ayrıştırma (FDD) yöntemlerinin ötesine geçilerek belirsizlik nicelendirmesi yapabilen ileri optimizasyon tekniklerinin kullanıma girmesi sistemin güvenilirliğini artırmıştır. Sonlu Eleman Modeli Güncellemesi (SEMG) yaklaşımıyla oluşturulan yapısal tanılama süreçleri, modelleme ve ölçümden kaynaklanan epistemik hataları minimize etmek üzere Bulanık Mantık (BSEMG) ile desteklenmiştir. Bununla birlikte, maliyet kısıtları nedeniyle sınırlı sayıda sensör kullanılabilen durumlarda dahi, özdeğer probleminin ters çözümü ve Yapay Sinir Ağları (ANN) tabanlı hibrit hasar tespiti metodlarıyla yapısal kusurların kolon veya perde duvar gibi eleman düzeyinde yüksek doğrulukla yerelleştirilebildiği saptanmıştır.

Sistemin yasal ve operasyonel afet yönetimi boyutundaki en belirgin dönüşümü, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) ile yüksek binalarda gerçek zamanlı YSİ sistemlerinin mecburi kılınmasıyla gerçekleşmiştir. Bu yasal standartlar çerçevesinde sistemler; deprem anında toplanan ivme verilerini çift entegrasyon ile işleyerek katlar arası öteleme oranlarını hesaplayan ve yapının sarsıntı sonrası iskâna uygunluğuna dair anlık alarmlar üreten otonom karar destek mekanizmaları haline almıştır. Mevcut veriler ışığında, Türkiye'deki modern YSİ vizyonunun yalnızca mevcut hasarı tespit eden reaktif stratejileri aşarak, yapının kalan ömrünü modellemeyi hedefleyen Yaşam Döngüsü Yönetimi (LCM) aşamasına evrildiği görülmektedir. Yapısal deformasyon verilerinin doğrudan eyleme geçirilebilir Güvenilirlik Endeksine (β) ve yetersizlik olasılığına (pf) dönüştürülmesini sağlayan bu proaktif yaklaşım, yapıların hizmet ömrünü ve bakım maliyetlerini optimize etmektedir. Sonuç olarak, ulusal sürekli gözlem istasyonlarının (CORS-TR) doğruluğu ve yapay zeka entegreli kestirimci algoritmaların gelişimiyle desteklenen bu veri altyapısı, yapısal güvenliliğin sürdürülebilirliği açısından Türkiye'nin afet dirençli şehirler hedefine sağlam bir teknik zemin oluşturmaktadır.

7. KAYNAKÇA

- AFAD (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı). (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY)*. Resmi Gazete (Sayı: 30364 Mükerrer), Ankara.
- Akpınar, B., Aykut, N. O., Dindar, A. A., Gürkan, K., ve Gülal, E. (2017). Ağ RTK GNSS yönteminin yapı sağlığı izleme çalışmalarında kullanımı. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(3), 1030–1040.
- Akpınar, B., Gülal, E., Dindar, A. A., Gürkan, K., ve Aykut, N. O. (2016). Yapı sağlığı izlenmesine yönelik ulusal ölçme sistemi geliştirilmesi projesi: İlk sonuçlar. *HKMO – Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu 8. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu*, 1–7.
- An, X., Meng, X., Hu, L., Xie, Y., Zhang, F., ve Pan, S. (2025). GNSS integrated displacement and attitude determination for structural health monitoring of long-span bridges. *Satellite Navigation*, 6, Article 19.
- Aytulun, E., ve Soyöz, S. (2020). Deprem öncesi, sırası ve sonrasında bir yüksek binanın yapı sağlığının izlenmesi. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, 2(1), 61–75.
- Bas, S., Apaydin, N. M., Ilki, A., ve Catbas, F. N. (2018). Structural health monitoring system of the long-span bridges in Turkey. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(4), 425–444.
- Brincker, R., Zhang, L., ve Andersen, P. (2000). Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition. *Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference*, 625–630.
- Brincker, R., Zhang, L., ve Andersen, P. (2001). Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart Materials and Structures*, 10(3), 441–445.
- Brownjohn, J. M. W., Pan, T. C., ve Deng, X. Y. (2000). Vibration monitoring of civil infrastructure systems. *Engineering Structures*, 22(12), 1620–1631.
- Çelebi, M. (2019). Gerçek zamanda bir deprem olayında binaların kullanılabilirlik kararı için sürekli ötelenme ölçümü. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, 1(1), 15–25.
- Palta, O., & Güldemir, H. (2019). Elimination of the single phase parallel active power filter harmonic in distribution network. *International Journal of Research*, 6(1), 185–190.
- Çelebi, M., Gürpınar, A., ve Sanlı, A. (2004). Real-time seismic monitoring needs of a building owner and the solution: A cooperative effort. *Earthquake Spectra*, 20(2), 333–346.

- Dinçer, S., Aydın, E., ve Gencer, H. (2014, 11-13 Ağustos). A real-time instrumentation approach for structural health monitoring of bridges [Bildiri sunumu]. *Istanbul Bridge Conference*, İstanbul, Türkiye.
- Erdoğan, Y. S. (2013). *İnşaat mühendisliği yapılarında akıllı hesaplama teknikleri ile yapısal tanımlama ve parametre tahmini* [Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. İTÜ.
- Erdoğan, Y. S., ve Bakır, P. G. (2013). Yapı sağlığı izleme verileri ile hasar tespitinde kullanılan hasar modellerinin bulanık analiz ile belirsizlik açısından incelenmesi. *XVIII. Ulusal Mekanik Kongresi*, 237–246.
- Eren, K., Acar, U., ve Ekinci, H. (2009). Continuous GPS monitoring for structural deformation analysis. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 29(4), 115–121.
- Felber, A. J. (1993). *Development of a methodology for the dynamic testing and modelling of bridges* [Doktora tezi, University of British Columbia]. UBC.
- Fourier, J. (1822). *Théorie analytique de la chaleur*. Chez Firmin Didot, père et fils.
- Juang, J. N., ve Pappa, R. S. (1985). An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 8(5), 620–627.
- Kaymakçı, S., Şişeci Çeşmeli, M., ve Aydın, C. (2023). Raspberry Pi ile gerçek zamanlı yapı taşıyıcı birimlerin takip sisteminin tasarlanması. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 7(2), 162–170.
- Kim, C. W., ve Frangopol, D. M. (2018). Cost-effective maintenance planning of deteriorating structures using structural health monitoring information. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(5), 1–12.
- Kurt, A., Yıldırım, T., Ayan, T., ve Gürbüz, N. (2013). GNSS tabanlı yapı sağlığı izleme uygulamaları. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 108, 23–34.
- Linear Motion Tips. (2023). *How do magnetostrictive sensors work?* <https://www.linearmotiontips.com/how-do-magnetostrictive-sensors-work/>
- Malekloo, A., Homaei, M. H., ve Ghaffari, A. (2022). Wireless sensor networks and IoT-based structural health monitoring systems: A review. *Sensors*, 22(11), 4330.
- Mardanshahi, A. (2025). Sensing techniques for structural health monitoring: A state-of-the-art review on performance criteria and new-generation technologies. *Sensors*.
- Nguyen, Q. T. (2022). *Yüksek yapılar için modal analiz tabanlı hasar tespiti ve yapı sağlığı izleme yaklaşımı* [Doktora tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi]. Uludağ Üniversitesi.

- Okasha, N. M., ve Frangopol, D. M. (2012). Lifetime-oriented multi-objective optimization of structural maintenance considering system reliability. *Journal of Structural Engineering*, 138(3), 461–472.
- Pekedis, M., ve Yıldız, H. (2016). Tabakalı kompozit bir kiriş ve levhada hasar tespitinin model tabanlı yapı sağlığı izleme teknikleriyle belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(4), 813–831.
- Rytter, A. (1993). *Vibration based inspection of civil engineering structures* [Doktora tezi, Aalborg University]. Aalborg University.
- Sofi, A., Regita, J. J., Rane, B., ve Lau, H. H. (2022). Structural health monitoring using wireless smart sensor network—an overview. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 163, 108113.
- Sundravel, K. V., Jagadeesan, R., Dhanush, A., ve Sanjay Kumar, A. (2025). A review of innovations, challenges, and future directions in structural health monitoring using smart materials. *Journal of Environmental Nanotechnology*, 14(1), 464–478.
- Şafak, E. (2007). Yapı titreşimlerinin izlenmesi: Nedir, neden yapılır ve ne elde edilir? *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 286–292.
- Şafak, E. (1999). Wave propagation in structures with uncertain properties. *Journal of Engineering Mechanics*, 125(12), 1406–1413.
- TDG (Teknoloji Geliştirme Grubu). (2023). *Yüksek yapılarda yapı sağlığı izleme çözümleri*. <https://tdg.com.tr/tr/cozumler/yapi-sagligi-izleme/yuksekyapilar>
- Temur, E. (2019). *Evaluation of seismic health monitoring system of Golden Horn Metro Bridge* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. İTÜ.
- Temur, E., Pınar, Ö. G., Erkuş, B., ve Çağlayan, B. Ö. (2017). Haliç köprüsü sağlık izleme sisteminin geliştirilmesi. *Uluslararası Katılımlı 7. Çelik Yapılar Sempozyumu*, 179–191.
- Uebayashi, H., Maeda, S., ve Sugiyama, S. (2015). Structural health monitoring using vibration-based techniques. *Journal of Structural Engineering*, 141(4), 1–10.
- Wang, L., Liu, H., Zhang, F., Guo, L., ve Chen, Z. (2024). Spatial structure digital twins: Application in intelligent health monitoring of cable dome structures. *Automation in Construction*, 165, Makale 105489.
- Palta, O., Çıbuk, M., & Güldemir, H. (2026). Illumination-aware deep learning for white blood cell classification: A CBAM and texture feature fusion approach. *Light & Engineering*, 2026

- Wang, Q., Huang, B., Gao, Y., ve Jiao, C. (2025). Current status and prospects of digital twin approaches in structural health monitoring. *Buildings*, 15(7), 1021.
- Yi, T. H., Li, H. N., ve Gu, M. (2013). Recent research and applications of structural health monitoring for civil infrastructure in China. *Structural Monitoring and Maintenance*, 1(1), 1–14.
- Yıldırım, U. (2023). Kirişi hasarlı köprülerin yapısal güvenilirliğe dayalı değerlendirmesi. *Afet ve Risk Dergisi*, 6(2), 415–433.
- Zhang, B., Ren, Y., He, S., Gao, Z., Li, B., ve Song, J. (2025). Review of methods and applications in structural health monitoring (SHM) for bridges. *Measurement*, 245, 116575.

5. Bölüm

Sürdürülebilir Gelecek: Akıllı Sistemler ve Yeşil Bina Teknolojileri Sinerjisi

Nusret BOZKURT¹, Saffet SOYUGÜZEL²

Öz

Günümüzde binalar, küresel enerji tüketiminin yaklaşık %40'ından ve sera gazı emisyonlarının büyük bir kısmından sorumlu tutulmaktadır. Bu durum, yapı sektöründe çevresel etkileri minimize eden yeşil bina teknolojilerinin ve akıllı sistemlerin entegrasyonunu zorunlu kılmaktadır. Yeşil binalar, kaynak verimliliği ve ekolojik denge prensipleri çerçevesinde tasarlanarak kullanıcı refahını ve enerji tasarrufunu optimize etmeyi amaçlayan yapılar olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, enerji ana başlığı altında yeşil bina teknolojilerinin mevcut durumu, LEED ve BREEAM gibi sertifikasyon sistemlerinin yönlendirici rolü ve akıllı teknolojilerin sürdürülebilirlik süreçlerine katkıları kapsamlı bir şekilde incelenmektedir.

Araştırma, bina kabuğu iyileştirmeleri ve doğru yönelim gibi pasif tasarım stratejileri ile yüksek verimli Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme (HVAC) sistemleri ve yenilenebilir enerji kaynaklarının oluşturduğu aktif sistemlerin hibrit kullanımının enerji verimliliği üzerindeki kritik etkisini vurgulamaktadır. Yapay zeka ve Nesnelerin İnterneti (IoT) destekli enerji yönetim sistemleri (BEMS), binaların operasyonel performansını gerçek zamanlı izleyerek adaptif kontrol mekanizmaları ile enerji israfını %30-50 oranında azaltabilmektedir. Ayrıca, faz değiştiren malzemeler (PCM) ve Etylen Tetra Fluoro Etylen (ETFE) gibi akıllı yapı materyallerinin kullanımı, binaların çevresel koşullara uyum yeteneğini artırmaktadır. Dijital ikizler ve 5G teknolojileri ise binaların sadece enerji tüketicisi değil, aynı zamanda akıllı şebekeler üzerinden enerji üreticisi konumuna geçmesini sağlayarak "Net Sıfır Karbon" hedefini desteklemektedir.

Buna karşın, yüksek başlangıç maliyetleri, uzman iş gücü eksikliği ve teknik entegrasyon zorlukları bu teknolojilerin yaygınlaşması önündeki temel engeller olarak tanımlanmaktadır. Sonuç olarak, yeşil bina dönüşümünün başarısı;

¹ Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Bitlis, Türkiye
<https://orcid.org/0000-0002-3737-8205>

² Bitlis Eren Üniversitesi, Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bitlis, Türkiye /
<https://orcid.org/0009-0004-4328-9630><https://orcid.org/0009-0004-4328-9630>

tasarımcılar, mühendisler ve politika yapıcılar arasında disiplinler arası bir iş birliğini ve kullanıcı davranışlarının teknolojik sistemlerle uyumunu gerektirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yeşil Bina, Enerji Verimliliği, Yenilenebilir Enerji, Sürdürülebilirlik

A Sustainable Future: The Synergy of Smart Systems and Green Building Technologies

Abstract

In the modern world, the construction and operation of buildings account for approximately 40% of global energy demand and a significant portion of greenhouse gas emissions. This environmental impact necessitates the integration of green building technologies and intelligent systems that prioritize ecological preservation. Green buildings are defined as functional structures designed under the principles of resource efficiency and ecological consideration, aiming to optimize occupant well-being and energy performance. This paper provides a comprehensive review of the current state of green building technologies, the guiding role of certification systems such as LEED and BREEAM, and the contribution of smart technologies to sustainable architectural practices.

The research underscores the critical impact of hybrid approaches that combine passive design strategies, such as building envelope optimization and orientation, with active systems involving high-efficiency HVAC and renewable energy integration. Energy management systems (BEMS) powered by Artificial Intelligence and the Internet of Things (IoT) enable real-time operational monitoring, allowing for adaptive control mechanisms that can reduce energy waste by 30-50%. Furthermore, the use of smart materials like phase change materials (PCM) and ETFE cushions enhances a building's ability to adapt to environmental fluctuations. Emerging innovations such as Digital Twins and 5G networks facilitate a shift from buildings being passive energy consumers to active energy producers within smart grids, thereby supporting the "Net Zero Carbon" objective.

However, factors such as high initial investment costs, a shortage of skilled labor, and technical interoperability issues remain primary barriers to widespread adoption. In conclusion, the success of the green building transition depends on interdisciplinary collaboration among architects, engineers, and policymakers, as well as the alignment of occupant behavior with technological innovations.

Key Words: Green Building, Energy Efficiency, Renewable Energy, Sustainability

1. GİRİŞ

Hızla ilerleyen teknolojik gelişmelerle birlikte, yapıların çevreye karşı daha duyarlı ve sürdürülebilir olma gerekliliği büyük önem kazanmıştır (Sağır 2024). Dünya genelindeki toplam enerji tüketiminin büyük bir kısmı, binalarda ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma gibi kullanıcı konforunu sağlama amaçlı sistemler için kullanılmaktadır (Sert 2010; Sağır 2024). Yapı sektörü, küresel enerji tüketiminin yaklaşık %40'ından, suyun %16'sından ve atıkların %50'sinden sorumlu olduğundan, çevresel etkileri en aza indiren tasarımlar zorunluluk arz etmektedir (İnanç 2010; Aktaş 2019). Bu durum, plansız kaynak tüketiminin mevsimsel değişiklikler ve sera gazı oranının artması gibi sorunlara yol açmasıyla ilişkilidir (Sağır 2024).

Bu çevresel endişeler ve sınırlı doğal kaynakların tükenme riski, sürdürülebilirlik kavramını inşaat sektörünün merkezine taşımıştır (Gür 2007; Sağır 2024). Sürdürülebilirlik, gelecek nesillere yaşanabilir bir dünya bırakma hedefiyle ele alınması gereken bir kavramdır (Sağır 2024). Bu bağlamda, yeşil binalar, çevresel etkileri minimize etmeyi, kaynakları verimli kullanmayı ve sürdürülebilirlik prensiplerine uygun şekilde tasarlanmayı, inşa edilmeyi ve işletilmeyi hedefleyen yapılar olarak tanımlanır (Sağır 2024; Sert 2010; Kara 2017). Yapı tasarımında, yenilenebilir enerji kaynaklarından maksimum düzeyde faydalanılması, doğaya verilen zararın en aza indirilmesi açısından kritik bir gerekliliktir (Gür 2007; Altan ve Kalemci 2024).

Türkiye'nin enerji tüketimi, nüfus artışı, kentleşme ve sanayileşme gibi etkenlerle sürekli yükselmektedir. Ülkenin kullandığı enerjinin yaklaşık %70'ini dış kaynaklardan ithal etmesi (İnanç 2010; Sert 2010), enerjide dışa bağımlılığı azaltmayı ulusal bir öncelik haline getirmiştir (Aktaş 2019; Demir 2007). Bina sektörü, 2018 verilerine göre Türkiye'nin toplam nihai enerji tüketiminin önemli bir payını (%39) oluşturmaktadır (Aktaş 2019; Sert 2010; Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2018-e). Bu durum, binalarda enerji verimliliğini sağlamaya yönelik çalışmaların bir zorunluluk haline gelmesini sağlamıştır (Soğuksu 2019).

Türkiye'de yeşil bina teknolojilerinin kronolojik gelişimi ve yasal çerçevesi, özellikle 2000'li yılların başından itibaren hız kazanmıştır. Enerji verimliliğine yönelik ilk adımlar, 1998 yılında yayımlanan TS 825 “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları” ve 2000 yılında yürürlüğe giren “Isı Yalıtım Yönetmeliği” gibi teknik standartların kabul edilmesiyle atılmıştır (Görgün 2012; TS 825 1998; T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı 2000). Ancak yasal süreç, 2007 yılında yürürlüğe giren 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu ile yoğunlaşmıştır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2007; Şenol 2009). Bu Kanun, enerjinin üretim, dağıtım ve tüketim aşamalarında verimliliğin artırılmasını ve yenilenebilir

kaynak kullanımının desteklenmesini amaçlamıştır (Narin ve Akdemir 2006). Kanunu takiben, binalar için minimum enerji performans kriterlerini belirleyen ve Enerji Kimlik Belgesi (EKB) düzenlenmesini zorunlu kılan “Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği” (BEP) 2008 yılında yayınlanmıştır (T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2008; ÇŞB 2014; Görgün 2012). Yeni binalar için EKB zorunluluğu ise 1 Temmuz 2010 itibarıyla başlamıştır (T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı 2010; Yapı İşleri Genel Müdürlüğü 2010).

Kurumsal alanda ise, ulusal bir sertifika sistemi oluşturma ihtiyacı, Çevre Dostu Binalar Derneği (ÇEDBİK)’in 2007’de kurulmasıyla somutlaşmıştır (Şenol 2009; Çelik 2009; ÇEDBİK, 2007). ÇEDBİK, uluslararası sistemleri inceleyerek, Türkiye koşullarına uygun, yerel bir yeşil bina sertifika sistemi geliştirmeyi amaçlamıştır (Çelik 2009; Sev ve Canbay 2009). Bu yerel girişimler, LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) ve BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) gibi uluslararası sertifikasyon sistemlerinin Türkiye’deki uygulamaları ile birlikte ilerlemiştir.

2. YEŞİL BİNA TEKNOLOJİLERİ VE KAVRAMLAR

Son yıllarda küresel iklim değişikliğinin ve doğal kaynakların hızla tükenmesinin yarattığı çevresel kaygılar, inşaat sektörünü sürdürülebilir uygulamaları benimsemeye zorunlu kılmıştır (Aktaş 2019; Umoh ve ark. 2024). Binalar, dünya genelinde enerji tüketiminin yaklaşık %40’ından ve sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünden sorumlu olduğundan, yapı sektöründeki dönüşüm, iklim hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynamaktadır (Umaroğulları ve ark. 2020; Aktaş 2019; Maçin 2025). Bu zorunluluk, “Yeşil Bina” (YB) kavramının, enerji verimliliğini, kaynak tasarrufunu ve iç mekân kalitesini merkeze alan disiplinler arası bir yaklaşım olarak ortaya çıkmasına neden olmuştur (Umoh ve ark. 2024; Rostami 2025). Geleneksel yapıların olumsuz çevresel etkilerini en aza indirmeyi amaçlayan YB hareketi, günümüzde akıllı teknolojilerin (Yapay Zekâ, Nesnelerin İnterneti) entegrasyonu ile daha da gelişerek “Akıllı Yeşil Binalar” (AYB) gibi yeni paradigmlar oluşturmaktadır (Umoh ve ark. 2024; Yang ve ark. 2022). Bu çalışma, yeşil bina teknolojilerinin temelini oluşturan sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve akıllı sistemler gibi kavramları derinlemesine inceleyerek, bu alanlardaki güncel akademik tartışmaları ortaya koymayı amaçlamaktadır.

2.1. Sürdürülebilirlik ve Yeşil Bina Kavramlarının Temeli

Sürdürülebilirlik (S) kavramı, ilk olarak 1987 tarihli Brundtland Raporu'nda, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden bugünün ihtiyaçlarını karşılamak olarak tanımlanmıştır (Brundtland 1987; Geçer ve ark. 2019). Bu kavram, ekonomik, sosyal ve çevresel olmak üzere üç temel boyutu (üçlü kar hanesi) kapsar (Sev 2009; Kazancı 2017). Sürdürülebilirlik, kaynakların verimli kullanımını, karbon salınımının azaltılmasını ve kullanıcıların yaşam standartlarının yükseltildiği bir ortamı ifade eder (Kayapınar 2017). Sürdürülebilir mimari ise, ekolojik dengeye saygı gösteren, enerji tüketimini azaltan, geri dönüştürülebilir malzemeleri tercih eden ve doğal enerji kaynaklarından maksimum düzeyde faydalanan bir tasarım yaklaşımıdır (Hasanlı 2024).

Yeşil Bina (YB), sürdürülebilir yapı pratiğinin temel uygulaması olarak görülmektedir (Kibert 2016). YB, yapının arazi seçiminden başlayarak tüm yaşam döngüsü boyunca (tasarım, inşaat, işletme ve yıkım) çevresel etkileri en aza indirmeyi amaçlayan bir yapıdır (U.S. Environmental Protection Agency, 2016; Yetkin, 2020). Temel hedefleri arasında doğal kaynakların etkin kullanımı, enerji ve su tasarrufu, atık minimizasyonu, sağlıklı iç mekânlar ve düşük çevresel etki yer alır (Zhu 2024; Umoh ve ark. 2024). YB'ler, geleneksel binalara göre %24 ila %50 arasında enerji tasarrufu ve %33 ila %39 arasında karbondioksit (CO₂) emisyonu azaltımı sağlama potansiyeline sahiptir (Esmer 2019; Ding 2008).

2.2. Enerji Verimliliği ve Temel Stratejiler

Yeşil bina teknolojilerinin temel odak noktası, inşaat sektöründe enerji tüketiminin yüksek olması nedeniyle enerji verimliliğidir (Umaroğulları ve ark. 2020; Aktaş 2019). Binalarda enerji tüketiminin azaltılması, enerji etkin tasarım ve enerji performansı kavramlarının önemini vurgulamaktadır (Soğuksu 2019; Cevahir 2017).

Enerji verimliliği (EV), bina kullanıcılarının konforundan ödün vermeden enerji tüketimini minimize etmeyi hedefler (Görgün 2012; Tetik 2014). Bu, sadece enerji tasarrufundan değil, aynı zamanda iç ortam kalitesinin (termal, görsel ve akustik konfor) sağlanmasından da bahsedildiği anlamına gelir (Karimi ve ark. 2023; Görgün 2012). EV, pasif ve aktif tasarım stratejilerinin bütünleşik kullanımıyla sağlanır (Tetik 2014; Shabsavar 2025).

- Pasif Tasarım Stratejileri: Bu yöntemler, binanın enerji ihtiyacını azaltmak için doğal iklimsel koşullardan yararlanır. Pasif sistem parametreleri arasında binanın konumu, yönelimi, formu, dış cephesi, çevresel ışık düzeyi ve doğal havalandırma sistemleri bulunmaktadır; bu tür çevresel faktörlerin sistem

performansı üzerindeki etkileri literatürde de ortaya konmuştur (Yılmaz 2006; Kayın 2019; Palta, 2026).

Örneğin, pencerelerin yönü, büyüklüğü ve camların yalıtım değerleri (U-değeri) dikkatlice tasarlanarak ısı kaybı ve kazanımı optimize edilir (Berköz ve ark. 1995; Kayın 2019). Güneş ışınımından en fazla yararlanmayı sağlamak için imar adalarının ve binaların yönelimleri dikkate alınmalıdır (Yalçın ve ark. 2024).

- Aktif Sistemler ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK): Pasif önlemlerin ardından, kalan enerji ihtiyacını karşılamak için yüksek verimli mekanik sistemler (HVAC, aydınlatma) ve YEK kullanılır (Shahsavar 2025). YEK kullanımı (güneş enerjisi, rüzgâr, jeotermal) binaların şebekeye bağımlılığını azaltır ve sıfır enerji hedeflerine ulaşmaya yardımcı olur (; Kayın 2019). Fotovoltaik (PV) sistemler, güneş enerjisini elektrığe dönüştürerek, binanın enerji ihtiyacını karşılamada önemli bir rol oynar (Sağır 2024).

2.3. Akıllı Binalar ve Teknolojik Entegrasyon

Geleneksel YB yöntemlerinin çevresel ve kullanım koşullarındaki değişimlere gerçek zamanlı adapte olma yeteneğinin sınırlı olması, Akıllı Bina (AB) teknolojilerinin entegrasyonunu zorunlu kılmıştır (Apriyanto ve Hidayat 2025; Umoh ve ark. 2024).

Akıllı Bina (AB), enerji verimliliği, güvenlik, konfor ve işlevselliği artırmak amacıyla modern teknoloji ve otomasyonun kullanıldığı sistemlerdir (Sağır 2024). Bu sistemler, sensörler, kontrol cihazları ve iletişim altyapıları aracılığıyla verileri toplayıp analiz eder; bu süreçte veri kalitesi ve sinyal doğruluğu, sistem performansının güvenilirliği açısından kritik bir rol oynamaktadır (Sağır 2024; Minoli ve ark. 2017; Palta ve Güldemir, 2019).

Akıllı binalar, kaynakları en düşük maliyetle yönetmeyi ve kullanıcı etkinliğini artırmayı hedefler.

Akıllı Yeşil Binalar (AYB/IGB): AB ve YB kavramlarının entegrasyonu, Akıllı Yeşil Binaları (Intelligent Green Buildings - IGB) ortaya çıkarır. Bu bütünleşme, binanın operasyonel verimliliğini ve çevresel sürdürülebilirliğini önemli ölçüde artırır (Umoh ve ark. 2024; Zhu 2024).

- Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Yapay Zekâ (AI): IoT sensörleri, binaların çeşitli noktalarından (sıcaklık, doluluk, enerji tüketimi) gerçek zamanlı veri toplar. AI ve Makine Öğrenimi (ML) bu verileri işleyerek bina performansını dinamik olarak optimize eder (Apriyanto ve Hidayat 2025; Umoh ve ark. 2024; Gilner ve ark. 2019). Örneğin, AI, HVAC sistemlerinin ve aydınlatmanın ayarlarını doluluk verilerine göre anlık olarak düzenleyerek enerji israfını önler (Mahmoodian ve Sharifikheirabadi 2020; Semeraro ve ark. 2025).

- Bina Bilgi Modellemesi (BIM) ve Dijital İkiz (DT): BIM, statik geometrik ve anlamsal verileri sağlarken; Dijital İkiz (DT) teknolojisi, gerçek zamanlı sensör entegrasyonu ve geri bildirim döngüleri ekleyerek BIM'i operasyonel zekâ platformuna dönüştürür (Semeraro ve ark. 2025; Sameer 2024). DT'ler, binaların enerji yönetiminde, kestirimci bakımda ve arıza tespitinde kritik rol oynar (Yang ve ark. 2022; Adhikari ve ark. 2024). BIM 6D simülasyonu, mevcut binaların rehabilitasyonunda bile enerji davranışını taklit ederek %50'ye varan enerji tasarrufu sağlayan optimizasyon seçenekleri sunabilir (Sameer 2024).
- Enerji Yönetim Sistemleri (EKY/BEMS): Akıllı teknolojilerle entegre EKY'ler, enerji tüketimini izler, analiz eder ve optimize eder (Adhikari ve ark. 2024; Sinoplu ve Ceyhan 2023). Bu sistemler, özellikle PV paneller ve akü depolaması gibi YEK ile donatılmış hibrit yeşil binalarda, elektrik şebekesinden alınan enerji maliyetinin değişkenliğine ve mevsimsel faktörlere göre en ucuz ve en temiz enerji kaynağını seçmek için senaryolar geliştirir (Kalmış 2019).

2.4. Yeşil Bina Değerlendirme Sistemleri (YBSDS)

Yapıların çevresel etkilerini nesnel ve somut olarak ortaya koymak amacıyla YBSDS'ler geliştirilmiştir (Sev ve Canbay 2009; Rostami 2025). Bu sistemler, binaları belirli kriterler üzerinden derecelendirerek, enerji ve çevreye duyarlı yapıların inşasını teşvik eder (Bulut 2014; Akşar 2025).

Başlıca küresel YBSDS'ler arasında LEED (ABD, 1998), BREEAM (İngiltere, 1990), CASBEE (Japonya, 2004) ve DGNB (Almanya, 2009) yer almaktadır (Sev ve Canbay 2009; Umaroğulları ve ark. 2020). LEED, küresel olarak en yaygın kullanılan sistem olup, Türkiye'de de en sık tercih edilen sertifikadır (Akşar 2025; Umaroğulları ve ark. 2020).

- Kriter Ağırlıkları: Çoğu sertifikasyon sisteminde enerji verimliliği (%40 civarında) en yüksek ağırlığa sahip konudur (Görgün 2012; Esmer 2019). Örneğin, LEED'de Enerji ve Atmosfer kategorisi maksimum 33 puana sahiptir (Kayın 2019).
- Yerel Adaptasyon: Her sistem, ortaya çıktığı ülkenin iklimsel, coğrafi ve yasal koşullarını yansıtır (Rostami 2025; Umaroğulları ve ark. 2020). Bu nedenle, bu sistemlerin başka ülkelerde doğrudan uygulanması adaptasyon sorunları yaratabilir (Esmer 2019; Şenol 2009). Türkiye'de bu ihtiyaca yanıt olarak ÇEDBİK tarafından B.E.S.T (Binalarda Ekolojik ve Sürdürülebilir Tasarım) sertifikası geliştirilmiştir (Umaroğulları ve ark. 2020; Geçimli ve Yamaçlı 2019).

3. BULGULAR

3.1. Sürdürülebilirlik ve Yeşil Bina Kavramlarının Temeli

Küresel iklim krizi, çevre felaketleri ve sınırlı enerji kaynaklarının hızla tükenmesi gibi çağımızın büyük sorunları, tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de sürdürülebilirlik ve yeşil bina uygulamalarını zorunlu bir gündem maddesi haline getirmiştir (Sağır 2024; Görgün 2012; Altan ve Kalemci 2024). Dünya genelinde toplam enerji tüketiminin yaklaşık %40’ını ve sera gazı salınımının büyük bir bölümünü binalar oluşturduğundan (Kayın 2018; Gültekin ve Bulut 2015), inşaat sektörünün bu çevresel etkileri en aza indirecek çözümlere yönelmesi kritik öneme sahiptir. Yeşil binalar, yapının arazi seçiminden başlayarak yaşam döngüsü süreci içinde değerlendirildiği (Şenol 2009), yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan ve atık oluşumunu en aza indiren çevre dostu yapılar olarak tanımlanmaktadır (Sev 2009; Bayat ve Küçükali 2024).

Türkiye’nin yapı stokunda eski ve enerji verimsiz binlerce bina bulunması ve hala büyük bir konut açığı olması sebebiyle, yeşil bina kavramı ülke için büyük bir fırsat teşkil etmektedir (Altan ve Kalemci 2024). Türkiye’deki yeşil bina teknolojilerinin ve uygulamalarının kronolojik gelişimi, yasal düzenlemeler, sivil toplum örgütlerinin çabaları ve ulusal sertifikasyon sistemlerinin oluşturulma süreçleri üzerinden incelenmelidir.

Türkiye’de Yeşil Bina Kavramının Kökeni ve Erken Dönem Fikirleri

Yeşil bina terimi, bilgi teknolojilerinin hızla yayıldığı 1980’li yılların başında ortaya çıkmış küresel bir kavram olsa da (Kayın 2018; Yılmaz 2019), Türkiye’de inşaat sektörünün sürdürülebilirlik ilkeleriyle tanışması ve buna yönelik somut adımlar atılması 2000’li yılların ortalarına denk gelmektedir.

Geleneksel mimaride 1930’lu yıllardan itibaren yeni teknolojilerin kullanılmasıyla (havalandırma sistemleri, floresan lambalar gibi) uzmanlaşmalar yaşanmış, ancak bu durumlar bazen iklimsel koşulların göz ardı edilmesine yol açmıştır. 1970’li yıllara gelindiğinde ise, ileri görüşlü mimarlar ve çevre bilimciler binaların tasarımları üzerine fikirler geliştirmeye başlamıştır (Şenol 2009). Bu dönemler, modern yapılaşmanın çevresel etkileri hakkında erken dönem farkındalıkların olduğu temel zeminleri oluşturur.

2006 yılında ODTÜ Mimarlık Fakültesi Dekanı Prof. Dr. Haluk Pamir tarafından, bina ölçeğinden bölge ölçeğine kadar mimarlık, tasarım, planlama ve uygulamayı kapsayan Mimarlık, Araştırma, Tasarım, Planlama ve Uygulama Merkezi (MATPUM) kurulmuştur (Çelik 2009).

Yasal Çerçevenin Oluşumu ve İlk Resmi Uygulamalar (2007-2010)

Türkiye’de yeşil bina uygulamalarının yaygınlaşması ve teknolojinin bu yöne kaymasını hedefleyen resmi süreçler 2007 yılından sonra yoğunlaşmıştır (Aktaş 2019).

2007: Enerji Verimliliği ve İlk Sertifika Enerji Verimliliği Kanunu: 2007 yılında yürürlüğe giren bu kanun, enerjinin üretim, iletim, dağıtım ve tüketim aşamalarında verimliliğin artırılmasına odaklanmıştır (Sümer 2013; Yılmaz 2019).

Yeşil Yıldız Sertifikası: İlk yerel sertifikalandırma sistemi sayılabilen, Kültür ve Turizm Bakanlığı tarafından 2007 yılında turistik tesisler için oluşturulan “Yeşil Yıldız” Sertifikası’dır (Yılmaz 2019). Bu sistem, tesislerin enerji, su tüketimi ve atık miktarını azaltmasını, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmeyi amaçlamaktadır (Çelik 2009).

2008: BEP Yönetmeliği ve Uluslararası Başvurular Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği (BEP): 2008 yılında yayımlanan bu yönetmelik, binalarda enerji kaynaklarının verimli kullanılmasına ve çevrenin korunmasına ilişkin usul ve esasları düzenlemiştir (Aktaş 2019; Anbarcı ve ark. 2012; Görgün, 2012). Yönetmeliğin amacı, ülkesel bazda bir yeşil bina sertifikasyon sistemi oluşmasına altyapı sağlamaktır (Aktaş 2019).

İlk Kurumsal Örnekler: Türkiye’deki ilk yeşil bina örnekleri çoğunlukla alışveriş merkezleri ve rezidanslar olmuştur (Topçu, 2010; Yılmaz, 2014). Örneğin, 2008 yılında Siemens'in Gebze’de yaptığı ve LEED-Altın sertifikasına başvuran projesi, maliyetin standart bir binaya göre yalnızca %1 yüksek olduğunu göstererek, maliyet bariyerini aşma potansiyelini işaret etmiştir (Erten 2009; Çelik 2009; Yılmaz 2019).

2009: STK’ların Etkinliği ve Yerel Çabalar ÇEDBİK’in Kuruluşu ve Uluslararası İşbirlikleri: Türkiye’de sürdürülebilir gelişmeyi destekleyen uygulamaların somutlaşmasında en önemli kurumsal adım, 2007 yılında kurulmuş olan Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği’nin (ÇEDBİK) 2009 yılında resmi olarak faaliyete geçmesi ve uluslararası sertifikasyon sistemleriyle anlaşmalar yapmaya başlamasıdır (Yılmaz 2019; Şenol 2009).

ÇEDBİK, Eylül 2009’da BRE Global ile iyi niyet anlaşması imzalamıştır. Amaç, BREEAM’i Türkiye koşullarına göre adapte ederek ulusal bir yeşil bina sistemi oluşturmaktır (Kobaş 2011; Sev ve Canbay 2009).

ÇEDBİK, bu anlaşmaların ardından 2010’da DGNB ve 2011’de LEED INTERNATIONAL ile de iyi niyet anlaşmaları imzalamıştır (Akşar 2025).

Toplu Konut Projelerinde Girişim: Toplu Konut İdaresi (TOKİ), 2009 yılında İstanbul Kayabaşı’nda geliştireceği 40 bin konutluk projede çevreye duyarlı olarak planlama yapmış ve güneş, rüzgâr ve toprak enerjisinden yararlanmayı sağlayan teknolojilerin geliştirilmesi ve pazarın oluşturulması açısından önemli bir aşama olarak görülmüştür (Çelik 2009; Yılmaz 2019).

Ulusal Sertifikasyon Sistemine Doğru İlerleyiş (2011-2019)

2011: Enerji Kimlik Belgesi Zorunluluğu BEP Yönetmeliği kapsamında, 01 Ocak 2011 tarihi itibarıyla yeni binalar için Enerji Kimlik Belgesi (EKB) uygulaması zorunlu hale gelmiştir (Anbarcı ve ark. 2012; Sümer 2013). EKB, binanın enerji ihtiyacı, tüketim sınıflandırması ve yalıtım özellikleri hakkında bilgi vermektedir (Anbarcı ve ark. 2012).

2014-2018: Ulusal Kılavuz ve Yerli Malzeme Gelişimi 2014 yılında “Sürdürülebilir Yeşil Binalar ve Sürdürülebilir Yerleşmelerin Belgelendirilmesi” yönetmeliği oluşturulmuştur. Bu, ulusal bazda bir yeşil bina sertifikasyon sistemi altyapısını kurma amacını taşır (Aktaş 2019). Aynı yıl, LEED Gold Sertifikalı Şişecam Bilim ve Teknoloji Merkezi yerleşkesi kullanıma geçmiştir (Bayat ve Küçükali 2024).

2014'ten sonra yeşil yapı malzemelerinin üretimi, uluslararası bağlantısı olan firmaların adaptasyonu ile artış göstermiştir (Gökçen 2020).

2016 yılında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ile İTÜ arasında, Türkiye koşullarına uygun “Ulusal Değerlendirme Kılavuz” geliştirilmesine yönelik protokol imzalanmıştır (Akşar 2025).

2018 yılında bu kılavuz çerçevesinde Türkiye'ye özgü bin ve yerleşim ana kategorileri içeren Sertifika Sistemi Kılavuzu hazırlanmıştır (Akşar 2025).

2019: YeS-TR'nin Ortaya Çıkışı; 2019 yılı itibarıyla Ulusal Yeşil Sertifika Sistemi (YeS-TR) yazılım alt yapısı oluşturulmuştur (Akşar 2025).

YeS-TR'nin temel amacı, Türkiye genelinde enerji verimliliği ve çevre dostu bina uygulamalarını teşvik etmektir. Bir bina veya yerleşke, Bakanlık tarafından yetkilendirilmiş bir değerlendirme kuruluşu tarafından Ulusal Değerlendirme Kılavuzu doğrultusunda puanlanır ve sertifika seviyesi belirlenir (Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği 2024).

Bu dönemde, Türkiye LEED sertifikalı bina sayısında Avrupa'da 6. sıraya yerleşerek (Aktaş, 2019; Gökçen, 2020), uluslararası alandaki konumunu güçlendirmiştir. Türkiye, LEED sertifika sayısı en yüksek olan ikinci ülke olmuştur (Akşar 2025).

Tablo 1: Türkiye'deki ve Dünya'daki Yapı Sektörüne İlişkin Enerji Gelişmelerinin Karşılaştırmalı Kronolojik Tablosu

Tarih	Önemli Gelişme (Türkiye ve Uluslararası)	Kaynak
1974	IEA (Uluslararası Enerji Ajansı) kuruldu.	(Umaroğulları ve ark. 2020)
1990	BREEAM (Birleşik Krallık) yayımlandı – Dünyanın ilk Yeşil Bina Sertifika Sistemi.	(Umaroğulları ve ark. 2020; Rostami 2025)
1997	Kyoto Protokolü imzalandı.	(Umaroğulları ve ark. 2020)

1998	LEED (ABD) yayımlandı.	(Umaroğulları ve ark. 2020; Rostami 2025)
2002	AB Enerji Performans Yönetmeliği (EPBD) yürürlüğe girdi. CASBEE (Japonya) yayımlandı.	(Umaroğulları ve ark. 2020; Rostami 2025)
2007	DGNB (Almanya) yayımlandı.	(Umaroğulları ve ark. 2020)
2008	Türkiye’de Binalarda Isı Yalıtımı Yönetmeliği (TS825) zorunlu hale geldi. Türkiye’nin ulusal GBCS’i için ilk çalışmalar (SEEB-TR) başladı.	(Umaroğulları ve ark. 2020; Geçer 2015)
2009	AB 20/20/20 İklim ve Enerji Paketi kabul edildi.	(Umaroğulları ve ark. 2020)
2013	Türkiye’nin ulusal GBCS’i ÇEDBİK/B.E.S.T. (Konut) olarak yayımlandı.	(Umaroğulları ve ark. 2020)
2017	Türkiye’de Yerleşmeler ve Binalar İçin Yeşil Sertifika Yönetmeliği yürürlüğe girdi.	(Umaroğulları ve ark. 2020)
2019	ÇEDBİK/B.E.S.T. son güncellemesi yapıldı.	(Umaroğulları ve ark. 2020)
2019	Ulusal Yeşil Sertifika Sistemi (YeS-TR) yazılım alt yapısı oluşturuldu.	(Akşar S 2025)

Güncel Durum, Teknolojik Gelişmeler ve Teşvikler (2020 ve Sonrası)
Türkiye’de yeşil bina projelerinin sayısı hızla artmakta olsa da, sektör hala bazı zorluklarla mücadele etmektedir.

3.1.1. Piyasa Dalgalanmaları ve Zorluklar:

- **2016 yılından sonraki süreçlerde** LEED sertifika başvuru sayısı artış eğilimi göstermiş, ancak sertifika kabul oranı düşmüştür. Bu durum, LEED sertifika sisteminin kendini güncellemesiyle oluşan zorluklarla ilişkilendirilebilir (Yalçın ve ark. 2024).
- **2017’de** LEED sertifikasına olan talep popülariteye bağlı olarak çok fazlayken, **2018’de** Türkiye’deki ekonomik krizin etkisiyle bu talep azalmıştır (Gökçen 2020).
- **2020 ve 2021 yıllarında**, COVID-19 pandemisinin küresel ekonomik istikrarsızlık ve belirsizlik ortamı yaratması nedeniyle LEED sertifika alımında belirgin bir düşüş yaşanmıştır (EVA-Turkey 2025).

3.1.2. Teknolojik İlerlemeler ve Yönetim Yaklaşımları:

- Yeşil binalarda kullanılan teknolojiler; yüksek verimli pencere sistemleri, doğal havalandırma, akıllı termostatlar ve hareket sensörleri gibi akıllı kontrol sistemlerini kapsamaktadır (Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği 2024).

- Yapı Bilgi Modellemesi (YBM/BIM) kullanımı, sürdürülebilir yeşil bina projelerinde tasarım ve inşaat planlama entegrasyonu, çoklu tasarım projelerinde birlikte çalışabilirlik ve farklı disiplinler arası işbirliği gibi konularda önemli avantajlar sağlamaktadır (Gürgün ve ark. 2021). Türkiye’de, YBM'nin sürdürülebilir malzeme üretimindeki sıkıntılar, endüstri temel sınıfı geliştirme zorlukları ve güncel standartlardaki eksiklikler nedeniyle entegrasyonu zorlanmaktadır (Gürgün ve ark. 2021).
- Türkiye’de yeşil bina projeleri, daha çok ofis ve alışveriş merkezi projelerinde tecrübe edinilen uygulamalardır; bunları konut ve endüstriyel tesisler takip etmektedir (Yılmaz 2019). Ancak, konut yapılarında başvuru sayısı en yüksek olmasına rağmen kabul oranının düşük olması, Türkiye’de konut üretiminde sürdürülebilirlik politikalarının yetersizliğini düşündürmektedir (Yalçın ve ark. 2024).

3.1.3. Devlet Teşvikleri ve Uluslararası Rekabet:

- 2023 yılında Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’nın LEED sertifikasını Pazara Giriş Belgesi olarak kabul etmesi, sürdürülebilir endüstriyel dönüşümün ivme kazanmasına katkıda bulunan önemli bir teşvik olmuştur. Bu destek, özellikle yurt dışına mal ve hizmet tedariki yapan firmalar için önemlidir (EVA-Turkey 2025).
- Türkiye, Avrupa Birliği uyum süreci içerisinde olduğundan, enerji verimliliği konusundaki yasal düzenlemeler ve AB normlarına uyum süreci, yeşil bina sektörünün gelişimini desteklemektedir (Çelik 2009; Görgün 2012).
- Türkiye'nin sürdürülebilir bina sertifikasyonu konusunda küresel ölçekte rekabet edebilir bir konuma ulaşması için yasal çerçevenin güçlendirilmesi, finansal desteklerin artırılması ve bölgesel sürdürülebilir bina stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir (Yalçın ve ark. 2024).

3.2. Yeşil Bina Teknolojilerinin Sürdürülebilirlik Kriterleri

Küresel iklim değişikliği, doğal kaynakların hızla tükenmesi ve artan sera gazı emisyonlarının (GHG) neden olduğu çevresel krizler, inşaat sektörünü sürdürülebilir uygulamaları benimsemeye zorunlu kılmıştır (Umoh ve ark. 2024; Dedeoğlu 2020). Zira binalar, dünya genelindeki enerji tüketiminin yaklaşık %40’ından ve GHG emisyonlarının önemli bir bölümünden sorumludur (Umoh ve ark. 2024; Maçın 2025; Aktaş 2019; U.S. Environmental Protection Agency 2010; European Commission 2021; Allouhi ve ark. 2015). Bu bağlamda, Yeşil Bina (YB) kavramı, yapıların tüm yaşam döngüsü boyunca (tasarım, inşaat,

işletme ve yıkım) çevresel etkileri en aza indirmeyi amaçlayan, kaynak verimliliğini, enerji tasarrufunu ve iç mekân kalitesini merkeze alan disiplinler arası bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır (Umoh ve ark. 2024; Sağır 2024; Yetkin 2020; Sert 2010; Rostami 2025). Geleneksel mimarinin aksine, YB'ler sürdürülebilirlik ilkesini temel alarak hem çevresel hem de insana dayalı faydalar sunar (Karimi ve ark. 2023; Altan ve Kalemci 2024). Bu çalışma, yeşil bina teknolojilerinin temelini oluşturan sürdürülebilirlik kriterlerini, bu kriterlerin kapsamını ve bu hedeflere ulaşmada kullanılan teknolojik yaklaşımları akademik bir perspektifle incelemektedir.

Sürdürülebilirliğin Kavramsal Çerçevesi ve Temel Kriterler: Sürdürülebilirlik kavramının felsefi temeli, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden bugünün ihtiyaçlarını karşılamak olarak tanımlanan Brundtland Raporu'na (1987) dayanır (Sev 2009; Dedeoğlu 2020; Şenol 2009). Bu anlayış, ekonomik, sosyal ve çevresel olmak üzere üç temel boyutu (üçlü kar hanesi) dengede tutmayı gerektirir (Umaroğulları ve ark. 2020; Şenol 2009; Dedeoğlu 2020; Karimi ve ark. 2023; Rostami 2025). Yeşil binalar, bu çok boyutlu felsefenin inşaat sektöründeki pratik uygulamasını temsil ederken, temel amaçları kaynakları verimli kullanmak, kirliliği minimize etmek ve sağlıklı yaşam alanları yaratmaktır (Çelebi 2022; Görgün 2012; Hasanlı 2024; Umoh ve ark. 2024).

Yeşil bina tasarımında dikkate alınması gereken temel kriterler arasında en çok ağırlık verilenler genellikle enerji verimliliği ve atmosfer, su verimliliği ve malzeme/kaynak yönetimi olarak sıralanır (Umaroğulları ve ark. 2020; Görgün 2012; Dedeoğlu 2020). Bu kriterler, yapının arazi seçiminden başlayarak (Site Sustainability) ve tüm yaşam döngüsünü kapsayarak, karbon ayak izinin düşürülmesini hedefler (Sameer 2024; Aktaş 2019; Kayın 2019; Çelik 2016; Dedeoğlu 2020; Şenol 2009).

Tablo 2. Sürdürülebilir Yapılara İlişkin Temel Konular ve Boyutları

Başlık	Ana Konu	Temel Sorunlar	Kaynak
Ekonomik Sürdürülebilirlik	Yüksek ve sürdürülebilir ekonomik büyüme ve yerel istihdamın sürdürülmesi	Kârlılığın ve verimliliğin artırılması; maliyet etkin ve verimli hizmet sunumu; kusurların azaltılması; müşteri odaklı ticaret.	(Rostami 2025)
Çevresel Sürdürülebilirlik	Çevrenin etkin korunması, kirliliğin önlenmesi, biyoçeşitliliğin korunması ve güçlendirilmesi	Kirlilik emisyonlarının en aza indirilmesi; atık ve malzemelerin uygunsuz depolama ve yönetiminin önlenmesi; koruyucu çevresel izleme sistemlerinin kurulması.	(Rostami 2025)
Enerji Sürdürülebilirliği	Doğal kaynakların ihtiyatlı kullanımı, enerji verimliliğinin artırılması, kaynakların etkin kullanımı	Enerji kullanımının azaltılması; yerel malzeme kullanımı; uzun ömürlülük ve yeniden kullanılabilirlik için tasarım; operasyonel ve yaşam döngüsü enerji maliyetlerini düşüren tasarım/İNŞAAT stratejilerinin uygulanması.	(Rostami 2025)
Sosyal Sürdürülebilirlik	Herkesin ihtiyacını karşılayan sosyal ilerleme, işçilere saygı, yerel topluluklarla işbirliği	Eğitim ve etkin iletişim sağlanması; halk katılımı için araçların sağlanması; kamu konforu ve güvenliğinin korunması; yerel ekonominin ve iş yaratmanın desteklenmesi.	(Rostami 2025)

3.2.1. Enerji Verimliliği ve Teknolojik Entegrasyon (Enerji ve Atmosfer)

Enerji verimliliği, yeşil bina sertifikasyon sistemlerinde (GBRS) en yüksek ağırlığa sahip ana kriterdir; örneğin LEED’de toplam puanın yaklaşık %33’ünü oluşturur (Umaroğulları ve ark. 2020; Kayın 2019; Görgün 2012; Tetik 2014). Enerji etkinliğinin temel hedefi, kullanıcı konforundan ödün vermeden enerji tüketimini en aza indirmek ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmaktır (Sağır 2024; Karimi ve ark. 2023; Apriyanto Hidayat, 2025; Tetik 2014; Hasanlı 2024).

Bu hedefe ulaşmak için iki ana strateji kullanılır:

Pasif Tasarım Stratejileri: Bunlar, binanın konumunu, yönelimini, formunu, yalıtımını ve doğal aydınlatma olanaklarını optimize ederek enerjiyi en başta azaltmayı amaçlar (Kayın 2019; Tetik 2014; Umoh ve ark. 2024; Yalçın ve ark. 2024; Koca 2006; Demircan ve Gültekin 2017). Örneğin, pencere ve cephe tasarımının dikkatli yapılması, ısı kaybı ve kazanımını optimize eder (Kayın 2019). Pasif tasarım, enerji ihtiyacını azaltmanın yanı sıra, gün ışığından

yararlanmayı maksimize ederek insan sağlığına ve üretkenliğine de katkıda bulunur (U.S. Department of Energy Federal Energy Management Program, 2016; Karimi ve ark. 2023).

Aktif Sistemler ve Akıllı Teknolojiler: Pasif önlemlerin ardından kalan enerji ihtiyacını karşılamak için Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK) ve akıllı yönetim sistemleri devreye girer (Shahsavar 2025; Umoh ve ark. 2024; Kayın 2019).

◦ **YEK Entegrasyonu:** Güneş enerjisi (Fotovoltaik/PV) ve rüzgâr enerjisi gibi kaynakların kullanılması, binanın şebekeye bağımlılığını azaltır ve sıfır enerji hedeflerine ulaşmaya yardımcı olur (Kalmış 2019; Hasanlı 2024; Ragab ve Orhan 2024; Wang ve ark. 2025; Yılmaz 2006). PV sistemlerinin kurulumu, binaların yıllık enerji maliyetinin bir kısmını karşılayarak emisyonları düşürmeyi hedefler (Kalmış 2019; Umoh ve ark. 2024). Ancak YEK'in ilk yatırım maliyetinin yüksek olması, yaygınlaşmanın önündeki temel zorluklardan biridir (Sert 2010; Çelebi 2022).

◦ **Akıllı Bina Teknolojileri:** Akıllı binalar (AB), IoT (Nesnelere İnterneti), AI (Yapay Zekâ) ve otomasyon kullanarak operasyonel performansı, konforu ve enerji verimliliğini artırmayı hedefler (Umoh ve rk. 2024; Apriyanto ve Hidayat 2025; Yegireddy 2020; Ullah ve Irklı Eryıldız 2023). IoT sensörleri gerçek zamanlı veri toplarken, AI/ML algoritmaları bu verileri işleyerek ısıtma, soğutma ve aydınlatma sistemlerini dinamik olarak optimize eder, böylece enerji israfını önler (Apriyanto ve Hidayat 2025; Umoh ve ark. 2024; Gilner ve ark. 2019; Shahsavar 2025; Sinoplu ve Ceyhan 2023). Bina Enerji Yönetim Sistemleri (BEMS), enerji kullanımını izler, analiz eder ve optimize ederek maliyet tasarrufu sağlar (Adhikari vd., 2024; Kalmış, 2019). Bu akıllı sistemlerin entegrasyonu, yeşil binaların sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında kritik bir rol oynar (Apriyanto ve Hidayat 2025; Umoh ve ark. 2024; Zhu 2024).

3.2.2. Kaynak Verimliliği: Su ve Malzeme

Su Verimliliği (Water Efficiency): Su, YB kriterlerinin temel direklerinden biridir ve bu kriter, su kaynaklarının korunmasını, su tüketiminin azaltılmasını ve geri dönüşümünü hedefler (Dedeoğlu 2020; Çelik 2016; Sağır 2024). Yeşil binalar, geleneksel binalara göre %30-50 arasında su tüketimini azaltma potansiyeline sahiptir (Umoh ve ark. 2024; Ding 2008).

Temel uygulamalar şunları içerir:

- **Yağmur Suyu Hasadı:** Yağmur sularının toplanması ve peyzaj sulamasında kullanılması, şebeke suyu tüketimini azaltan önemli bir yöntemdir (Çelebi 2022; Dedeoğlu 2020; Yalçın ve ark. 2024; Adu Gyamfi ve ark 2025; Geçer ve ark. 2019; Ge ve Feng 2024).

- **Gri Su Geri Kazanımı:** Lavabo ve duşlardan gelen suların toplanarak basit arıtmadan sonra tuvalet rezervuarlarında veya temizlikte kullanılması su tasarrufu sağlar (Çelebi 2022).
- **Verimli Armatürler:** Düşük debili, fotoselli veya sensörlü bataryaların ve susuz pisuarların kullanılması su tüketimini minimuma indirir (Çelebi 2022; Siemens 2009).

Malzeme ve Kaynak Yönetimi (Materials and Resources): Bu kriter, yapım aşamasında kullanılan malzemelerin çevresel etkisini en aza indirmeyi ve atık üretimini kontrol altına almayı amaçlar (Sağır 2024; Gökçen 2020; Şenol 2009). YB'ler, inşaat ve kullanım süreçlerinde oluşan katı atık miktarını %70'e kadar azaltabilir (Ding 2008; Umoh ve ark. 2024).

Temel stratejiler şunlardır:

- **Geri Dönüşüm ve Yeniden Kullanım (3R):** İnşaat ve yıkım atıklarının (İYA) azaltılması, yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesi teşvik edilir; bu ilke, atıkların düzenli depolama sahalarına gitmesini engeller ve çevresel yükü düşürür (Sönmez 2021;; Sameer 2024; Zhu 2024; Çelebi 2022).
- **Yerel ve Sorumlu Malzeme Temini:** Malzemelerin çıkarılması, işlenmesi ve imalatının proje sahasına yakın bir yarıçapta yapılması (örneğin LEED'de 800 km) teşvik edilir, böylece nakliyeden kaynaklanan gömülü karbon emisyonları azaltılır (Gökçen 2020; Şenol 2009; Çelik 2016; Umoh ve ark. 2024).
- **Düşük Emisyonlu Malzemeler:** Yapıştırıcı, boya, halı gibi iç mekân malzemelerinde uçucu organik bileşik (VOC) içeriğinin düşük olması, iç hava kalitesini ve insan sağlığını doğrudan etkilediği için kritiktir (Siemens 2009; Dedeoğlu 2020; Gökçen 2020).
- **Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA):** Malzemenin hammadde çıkarımından yıkımına kadar olan tüm çevresel yükünün hesaplanması (Embodied Energy/Gömülü Enerji dahil) ve karşılaştırılması, daha bilinçli malzeme seçimi yapılmasını sağlar (Yakalı 2011; Sert 2010; Aktaş 2019; Dedeoğlu 2020; Sameer 2024).

3.2.3. Sosyal ve Ekonomik Sürdürülebilirlik Kriterleri

Yeşil binalar sadece çevresel hedeflere değil, aynı zamanda kullanıcı sağlığı ve finansal sürdürülebilirlik gibi sosyal ve ekonomik hedeflere de hizmet eder (Karimi ve ark. 2023; Umoh ve ark. 2024).

- **İç Mekân Çevre Kalitesi (IEQ) ve Sağlık:** IEQ, termal, görsel ve akustik konforu ve iç hava kalitesini kapsar (Karimi ve ark. 2023; Zhu 2024). IEQ'nun iyileştirilmesi (doğal ışık, temiz hava, uygun sıcaklık) çalışanların

ve sakinlerin **sağlığını, üretkenliğini ve memnuniyetini** artırır (Karimi ve ark. 2023; Miller ve ark. 2009; Dedeoğlu 2020). Yeterli gün ışığı ve manzaraya erişim (LEED'in bir kriteri), psikolojik refahı artırır ve aydınlatma enerjisi tüketimini azaltır (Karimi ve ark. 2023; Görgün 2012).

- **Ekonomik Faydalar:** YB'ler genellikle geleneksel binalara göre daha yüksek **ilk yatırım maliyetine** sahiptirler (örneğin %1-8 arası) (Şenol 2009; Kats 2003; Uğur ve Leblebici 2015; Aktaş 2019). Ancak Yaşam Döngüsü Maliyeti (YDM/LCC) perspektifinden bakıldığında (30-50 yıllık bir dönemde), işletme, su ve enerji maliyetlerinde sağlanan büyük tasarruflar sayesinde, bu ilk yatırım farkı hızla amorti edilir ve hatta 10 katına kadar finansal getiri sağlayabilir (Şenol 2009; Aktaş 2019; Sert 2010; Kats 2020). Örneğin, enerji verimli uygulamalar sayesinde işletme maliyetlerinde %11'e varan düşüş sağlanabilir (DLA Piper 2014).

3.2.4. Yeşil Bina Sertifikasyon Sistemlerinin Rolü ve Adaptasyon Zorlukları

Yeşil Bina Değerlendirme Sistemleri (GBRS) (LEED, BREEAM, DGNB, CASBEE, BEST) yapıların çevresel etkilerini ölçmek ve YB kriterlerinin karşılandığını doğrulamak için kritik araçlardır (Umaroğulları ve ark. 2020; Rostami 2025; Çelik 2009). Bu sistemler, gönüllülük esasına dayalı olup, inşaat sektöründe çevresel farkındalığı artırarak piyasayı dönüştürmeyi amaçlar (Umaroğulları ve ark. 2020; Dedeoğlu 2020; Şenol 2009; Görgün 2012; Çelik 2009).

- **Küresel Sistemler (LEED ve BREEAM):** LEED (ABD, 1998) ve BREEAM (İngiltere, 1990) uluslararası alanda en yaygın kabul gören sistemlerdir (Umaroğulları ve ark. 2020; Rostami 2025; Akşar 2025; Görgün 2012). LEED'in yapısal olarak şeffaf olması ve geniş kitlelere hitap etmesi, küresel popülerliğinin ana nedenlerindedir (Umaroğulları ve ark. 2020; Dedeoğlu 2020). Her iki sistem de sertifika seviyelerine (Platin, Altın, Gümüş) göre puanlama yapar ve enerji, su, malzeme gibi kriterlere ağırlık verir (Umaroğulları ve ark. 2020; Akşar 2025; Görgün 2012).
- **Yerel Adaptasyon Zorlukları:** Küresel sistemler, çıktıkları ülkenin (ABD, İngiltere) iklim, coğrafya ve yasal koşullarını yansıttığı için, Türkiye gibi farklı koşullara sahip ülkelerde doğrudan uygulanmaları adaptasyon sorunları yaratabilir (Umaroğulları ve ark. 2020; Esmer 2019; Şenol 2009; Görgün 2012). Türkiye'nin enerjiye dışa bağımlılığı ve yapı stoku farklılıkları, ulusal bir sistem ihtiyacını doğurmuştur (Umaroğulları ve ark. 2020). Bu ihtiyaca yanıt olarak ÇEDBİK tarafından B.E.S.T. (Binalarda Ekolojik ve Sürdürülebilir Tasarım) sertifikası geliştirilmiştir

(Umaroğulları ve ark 2020; Çelik 2016). Bu ulusal sistemler, yerel malzeme tedariki (Gökçen 2020) ve iklimsel faktörler gibi yerel öncelikleri dikkate almayı amaçlar.

3.3. Yeşil Bina Teknolojilerinin Bölgesel Bağlamı ve Sertifikasyon Sistemlerine Yansımaları

Küresel iklim krizi ve enerji kaynaklarının sınırlı olması, inşaat sektörünü sürdürülebilirliğe yönelik çözümler geliştirmeye itmiştir (Umoh ve ark. 2024; Rostami 2025). Ancak, “Yeşil Bina” (YB) kavramının küresel çapta benimsenmesine rağmen, uygulamada ve değerlendirmede coğrafi, iklimsel, ekonomik ve yasal farklılıklar nedeniyle homojen bir yapı sergilenmediği görülmektedir (Umaroğulları ve ark. 2020; Rostami 2025). Yeşil binaların başarılı olabilmesi için, uygulanan teknolojilerin ve standartların, binanın bulunduğu bölgenin özgün koşullarına adapte edilmesi kritik bir öneme sahiptir (Yang ve ark. 2022; Sağır 2024). Küresel yeşil bina sertifikasyon sistemleri (GBRS), bu adaptasyon zorunluluğu nedeniyle zamanla yerel ihtiyaçlara yanıt verecek şekilde çeşitlenmiş veya ulusal sistemlerin oluşumuna yol açmıştır (Mattoni ve ark. 2018; Çelik 2009). Bu akademik tartışma, yeşil bina teknolojilerinin küresel ve yerel uygulamaları arasındaki bölgesel farklılıkları inceleyerek, bu farklılıkların ardındaki itici güçleri ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmadaki etkilerini analiz etmeyi amaçlamaktadır.

3.3.1. Yeşil Bina Sertifikasyon Sistemlerinin (GBRS) Bölgesel Çeşitliliği

Yeşil bina sertifikasyon sistemleri (GBRS), yapıların çevresel performansını objektif olarak ölçmek amacıyla geliştirilmiştir; ancak bu sistemler, ortaya çıktıkları ülkelerin politikalarını, iklimini ve ekonomik yapılarını yansıtır (Rostami 2025; Şenol 2009; Umaroğulları ve ark. 2020). Dünyada en yaygın kullanılan LEED (ABD), BREEAM (İngiltere), DGNB (Almanya) ve CASBEE (Japonya) gibi sistemlerin yanı sıra, her geçen gün artan sayıda yerel sistem (Türkiye'nin B.E.S.T.'i gibi) bu bölgesel gereksinimlere yanıt vermektedir (Rostami 2025; Umaroğulları ve ark. 2020; Çelik 2009).

Gelişmişlik Düzeyi ve Sürdürülebilirlik Boyutlarının Önceliklendirilmesi: Sürdürülebilirlik, genellikle çevresel, ekonomik ve sosyal olmak üzere üç boyutta ele alınır ve GBRS'lerin bu boyutlara verdiği ağırlıklar, ilgili ülkenin veya bölgenin gelişim seviyesine (DL) göre değişiklik gösterir (Umaroğulları ve ark. 2020).

- **Gelişmekte Olan Ülkelerin Odağı:** Gelişmekte olan bölgelerde hizmet veren bir GBRS'nin enerji kriterlerindeki temel kaygılar, çoğunlukla

çevresel ve ekonomik yönlerin kesişimine odaklanır (Umaroğulları ve ark. 2020; Potbhare vd., 2009). Bu ülkelerde ekonomik büyüme, gelişmenin anahtar faktörü olduğundan, enerji kriterlerinin ekonomik değeri büyük önem taşır (Umaroğulları ve ark. 2020). Örneğin, Türkiye'nin ilk ulusal GBRS'si olan B.E.S.T., yapısal olarak LEED'e benzese de, enerji kriterlerine verilen ağırlık ve önem açısından BREEAM ile benzer özellikler taşır ve çevresel-ekonomik yönlere %80 ile en yüksek payı verir (Umaroğulları ve ark. 2020). Gelişmekte olan diğer ülkelerdeki GBRS'lerde de, kısa vadeli tüketimi azaltıcı uygulamalara (örneğin yerinde Yenilenebilir Enerji Kaynakları-YEK kullanımı) öncelik verilmektedir (Umaroğulları ve ark. 2020).

- **Gelişmiş Ülkelerin Odağı:** Gelişmiş ülkelerde ise, sertifikasyon sistemlerinin sürdürülebilirlik boyutlarındaki motivasyonları, **sosyal** yönleri daha fazla vurgu yapar (Umaroğulları ve ark. 2020). Bu, sosyal farkındalığı gösterme ve iç mekân kalitesi gibi insan odaklı unsurlara daha fazla önem verilmesi anlamına gelir.

Yerel Koşullara Uyum ve Sertifikasyon Sistemleri: Uluslararası GBRS'lerin, çıktıkları ülkelerin (ABD, İngiltere) yasal, iklimsel ve kültürel koşullarını yansıtması, başka bölgelerde doğrudan uygulanmalarını zorlaştırmaktadır (Rostami 2025; Şenol 2009; Çelik 2009).

- **Türkiye Örneği:** Türkiye, enerjiye dışa bağımlı olması ve yapı sektöründe hızlı büyüme göz önüne alındığında, enerji verimliliğini önceliklendirmek zorundadır (Akşar 2025; Umaroğulları ve ark. 2020). Türkiye'deki LEED sertifikalı binaların büyük çoğunluğunun ticari yapılarla sınırlı kalması (Akşar 2025), yerel adaptasyon ihtiyacını göstermiştir. Bu adaptasyon eksiklikleri, yasal, ekonomik ve teknolojik bağlamların entegre edilmesini gerektiren ulusal bir sistem ihtiyacını ortaya çıkarmıştır (Umaroğulları ve ark. 2020; Çelik 2009).

3.3.2. İklimsel ve Coğrafi Farklılıkların Tasarım Kararlarına Etkisi

Yeşil binaların performansı, büyük ölçüde binanın yerleşimi, yönelimi ve yerel iklim verilerinden (mikroklima) nasıl faydalandığına bağlıdır (Karimi ve ark. 2023; Sağır 2024). Bölgesel bağlam, pasif ve aktif tasarım stratejilerinin etkinliğini doğrudan belirler.

Pasif Tasarım ve Yerleşim Optimizasyonu: Pasif tasarım stratejileri (bina formu, yönelim, gölgeleme), enerji tüketimini azaltmak için doğal iklim koşullarından yararlanır (Tetik 2014; Demircan ve Gültekin 2017). Bu stratejiler, binanın bulunduğu bölgeye özgü olmalıdır.

- **Bölgeye Özel Optimizasyon:** Isıtma yükünün baskın olduğu bölgelerde (Ankara örneği), pasif stratejilerin (yalıtım, pencere sistemleri) ve aktif sistemlerin birlikte kullanılması, enerji tasarrufu potansiyelini artırmaktadır (Tetik 2014).
- **Kentsel Ölçekte Planlama:** Geniş ölçekte, imar adalarının ve binaların yönelimlerinin, güneş enerjisinden maksimum yararlanmayı sağlayacak şekilde tasarlanması, bina ölçeğinde enerji verimliliğini artırmaktadır (Yalçın ve ark. 2024; Koca 2006). Samsun örneğinde yapılan analizler, imar adasının mevcut rotasyonunun veya hafifçe döndürülmesinin, duvarlarda biriken yıllık toplam güneş enerjisi miktarını optimize ettiğini göstermiştir (Yalçın ve ark. 2024). Bu, planlamanın enerji kazanımı sağlamak için ideal bir fırsat olduğunu gösterir (Yalçın ve ark. 2024).
- **Lokasyon Bazlı Verimlilik:** İzmir'de yapılan bir çalışma, aynı tipte tasarlanmış bir yapının, şehrin merkezi, kıyı ve yüksek bölgelerindeki farklı yerleşim noktalarında enerji verimliliğinin ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK) potansiyelinin büyük ölçüde değiştiğini ortaya koymuştur (Sağır 2024; Sağır 2024). Bu, tasarımcılar ve şehir plancıları için yer seçimi kararlarında detaylı bölgesel analizlerin ne kadar kritik olduğunu göstermektedir (Sağır 2024).

Yenilenebilir Enerji ve Yerel Potansiyel: Yenilenebilir enerji sistemlerinin (PV, rüzgar, jeotermal) entegrasyonu, bölgenin kaynak potansiyeline ve yasal/ekonomik teşviklerine bağlıdır (Wang ve ark. 2025; Sert 2010).

- **PV Sistemleri:** Fotovoltaik (PV) sistemlerin kurulumu, yerel iklim verilerine ve güneşlenme sürelerine göre farklılık gösterir. Örneğin, PV sistemlerinin ilk yatırım maliyetinin yüksek olması ve yeterli teşvik sistemlerinin bulunmaması, bu sistemlerin yapılabilirliğini olumsuz etkilemektedir (Sert 2010). Gelişen teknolojiler ve yasal destekler, hibrit yeşil binalarda PV sistemlerinin elektrik şebekesine bağımlılığı azaltarak enerji maliyetlerini düşürme potansiyelini artırmaktadır (Kalmış 2019).
- **Malzeme Tedariki:** Bölgesel koşullar, sadece enerji kaynaklarının değil, aynı zamanda yapı malzemelerinin tedarikini de etkiler. Yerel malzeme kullanımı (örneğin LEED'de 800 km yarıçap içinde çıkarılan/üretilen malzeme), nakliyeden kaynaklanan "gömülü enerji" miktarını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunur (Yakalı 2011; Gökçen 2020). Malzeme tedarik zincirindeki bölgesel farklılıklar ve yerel üreticilerin sertifikalı ürün sunma kapasitesi, yeşil bina projelerinin malzeme kategorisinden alabileceği puanları ve dolayısıyla maliyetleri doğrudan etkiler (Gökçen 2020).

3.4. Yeşil Bina Teknolojilerinin Dünya ve Türkiye'deki Örnekleri

Küresel iklim değişikliği ve doğal kaynakların sürdürülebilirliği konusundaki artan kaygılar, inşaat sektörünü çevresel etkileri minimize eden ve enerji verimliliğini maksimize eden Yeşil Bina (YB) uygulamalarına yöneltmiştir (Umoh ve ark. 2024; Aktaş 2019; Maçın 2025). Dünya genelinde binalar, enerji tüketiminin yaklaşık %40'ından ve sera gazı (GHG) emisyonlarının önemli bir bölümünden sorumlu olduğundan, YB teknolojilerinin yaygınlaşması, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kilit rol oynamaktadır (Umoh ve ark. 2024; Umaroğulları ve ark. 2020; Tetik 2014; Aktaş 2019). YB teknolojileri, pasif tasarım stratejilerinden (yönelim, yalıtım) akıllı ve yenilenebilir enerji sistemlerine (PV, Jeotermal) kadar geniş bir yelpazeyi kapsar (Umoh ve ark. 2024; Shahsavar 2025). Bu çalışma, bu kapsamlı teknolojik yaklaşımın uluslararası ve Türkiye'deki somut örneklerini inceleyerek, YB uygulamalarının mevcut durumunu ve kazanımlarını akademik bir bakış açısıyla tartışmayı amaçlamaktadır.

3.4.1. Uluslararası Yeşil Bina Örnekleri ve Uygulanan Teknolojiler

Dünya genelinde yeşil binalar, genellikle uluslararası Yeşil Bina Sertifikasyon Sistemleri (GBRS) (LEED, BREEAM, CASBEE, DGNB) aracılığıyla belgelendirilmekte ve bu sertifikalar, projelerin çevresel hedeflerine ulaştığını doğrulamaktadır (Umaroğulları ve ark. 2020; Rostami 2025). Bu sistemler, binaların enerji ve su verimliliğini, iç mekân kalitesini ve malzeme sürdürülebilirliğini değerlendirir (Umoh ve ark. 2024).

Enerji Verimliliği ve Akıllı Sistem Entegrasyonu: Çin ve ABD gibi büyük ekonomilerde yeşil binalar hızla yaygınlaşmaktadır (Umoh ve ark. 2024; Sameer 2024). Bu projeler, özellikle enerji tüketimini azaltmak için pasif tasarımla aktif teknolojilerin entegrasyonuna odaklanmaktadır (Shahsavar 2025).

- **Manama, Bahreyn - Dünya Ticaret Merkezi:** Bu yapı, dünyanın ilk rüzgâr gücüyle elektrik üreten rüzgâr türbini entegre yüksek binası olmasıyla öne çıkmaktadır (Sert 2010; Umoh ve ark. 2024). Yapının çatısına yerleştirilen 29 metre kanat çaplı üç yatay eksenli rüzgâr türbini, binanın yıllık elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık %15'ini karşılamaktadır (Sert, 2010).



Şekil 1. Manama, Bahreyn - Dünya Ticaret Merkezi

- **Londra, Crystal Gösteri Merkezi:** Bu bina, BREEAM Outstanding (Seçkin) ve LEED Platinum sertifikalarını alarak en üst seviyede YB kriterlerini karşılamıştır (Sert 2010; Umoh ve ark. 2024). Yapı, çevresel etkileri en aza indirilmiş, düşük CO₂ emisyonuna sahip bir örnek olarak gösterilmektedir (Sert 2010).



Şekil 2. Londra, Crystal Gösteri Merkezi

- **Pekin Havalimanı (Üçüncü Terminal):** 2008'de tamamlanan bu terminal, yerel mimari ile yüksek teknolojiyi birleştiren bir örnektir. Güneydoğu yönelimli çatı ışıklıkları, erken gün ışığından ısı kazanımını artırmakta ve entegre çevre kontrol sistemi enerji tüketimini minimize ederek karbon emisyonlarını en alt düzeyde tutmaktadır (Geçer 2015).
- **The Edge - Amsterdam, Hollanda:** Bu ofis binası, dünyanın en sürdürülebilir ofis binalarından biri olarak kabul edilmekte ve enerji verimliliği için güneş panelleri, LED aydınlatma ve akıllı ısıtma/soğutma sistemlerini kullanmaktadır (Sağır 2024). Bina içindeki sensörler, çalışanların konforunu optimize ederken enerji tüketimini gerçek zamanlı izler (Sağır 2024; Umoh ve ark. 2024).
- **ZOE (Sıfır Enerji) Laboratuvarı, University of North Texas (ABD):** Bu laboratuvar, Net Sıfır Enerjili Bina (ZEB) konseptinin geliştirilmesine yönelik bir renovasyon projesidir ve ileri teknoloji ürünü yeşil tasarım ve teknolojileri uygulamaktadır (Gültekin ve ark. 2014).

3.4.2. Türkiye'deki Yeşil Bina Uygulamaları ve Sertifikasyon Durumu

Türkiye'de yeşil bina hareketinin gelişimi uluslararası örneklere kıyasla daha geç başlamış olsa da, özellikle 2008 yılından itibaren büyük bir ivme kazanmıştır (Aktaş 2019; Dedeoğlu 2020; Esmer 2019). Türkiye'nin enerji tüketimindeki dışa bağımlılığı (Aktaş 2019) ve yapı sektörünün toplam enerji tüketimindeki yüksek payı (%36 civarında) (Aktaş 2019; Umaroğulları ve ark2020), bu alandaki çalışmaları zorunlu kılmaktadır (Maçin 2025).

Sertifikasyon Eğilimleri ve Türkiye'nin Konumu: Türkiye, küresel ölçekte LEED sertifikalı brüt metrekare bazında ilk 10 ülke arasında yer almaktadır (Sönmez 2021; Akşar 2025). Mart 2025 verilerine göre Türkiye'de en yaygın kullanılan uluslararası sertifika sistemi LEED olup, toplam 608 adet sertifikalı bina bulunmaktadır. BREEAM sertifikalı bina sayısı ise 71 adettir (Akşar 2025).

- **Ticari Odaklanma:** Türkiye'deki LEED sertifikalı yapıların büyük ölçüde ticari yapılarla sınırlı kaldığı görülmektedir; ofis binaları ve alışveriş merkezleri öne çıkarken, konutlarda sertifika oranı düşüktür (Akşar 2025; Sönmez 2021).
- **Ulusal Sistem Girişimi:** Küresel sistemlerin yerel iklim ve yasal koşullara adaptasyon zorlukları nedeniyle (Esmer 2019), Türkiye, Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği (ÇEDBİK) tarafından geliştirilen ulusal sistemi B.E.S.T. (Binalarda Ekolojik ve Sürdürülebilir Tasarım) ile bu ihtiyaca yanıt vermektedir (Umaroğulları ve ark.2020). BEST, yapısal olarak LEED'e benzemekle birlikte, enerji kriterlerine verdiği ağırlık ve önem açısından BREEAM'e benzer özellikler taşır (Umaroğulları ve ark. 2020).

Türkiye'den Öne Çıkan Yeşil Bina Projeleri Türkiye'deki YB uygulamaları, enerji verimliliği ve yenilenebilir kaynak entegrasyonu konularına yoğunlaşmaktadır:

- **Eser Yeşil Binası (Ankara):** Ankara'nın ilk LEED sertifikalı binası olan Eser Holding'in merkez ofisi, 2011 yılında LEED Platinum (Platin) sertifikası almıştır (Dedeoğlu 2020; Köteşli Aydın, 2013). Yapı, ısıtma ve soğutma için toprak kaynaklı ısı pompası sistemi (GSHP) ve su soğutmalı VRV sistemleri kullanmaktadır (Köteşli Aydın 2013; Dedeoğlu 2020; Sert 2010). Ayrıca, PV paneller ile elektrik üretimi sağlamış ve elde edilen atık gri sular arıtılarak tuvaletlerde yeniden kullanılmıştır (Köteşli Aydın 2013; Sert 2010).



Şekil 3. Eser Yeşil Binası (Ankara)

- **Siemens Gebze Tesisi (Kocaeli):** Siemens A.Ş.'nin bu üretim tesisi, LEED Altın sertifikası (LEED Gold) alan ilk tesislerden biridir (Esmer 2019; Sert 2010; Çelebi 2022). Tesis, çatı kaplamasının güneşi yansıtacak şekilde beyaz renkli seçilmesiyle ısı adası etkisini azaltmış, atık ve zehirli madde içermeyen (VOC değeri düşük) malzemeler kullanmış ve %40 yerel malzeme kullanarak nakliye kaynaklı karbon emisyonunu düşürmeyi hedeflemiştir (Çelebi 2022; Yaman 2009; Sert 2010). Bina, peyzaj ve iç mekânlarda %50 su tasarrufu ve %30 enerji tasarrufu sağlamıştır (Sert 2010).
- **Meydan Alışveriş Merkezi (İstanbul):** Türkiye'nin ilk yeşil alışveriş merkezi projesi olarak bilinen bu yapı, jeotermal enerji sistemini kullanarak fosil yakıt kullanmadan ısıtılıp soğutulan ilk alışveriş merkezidir (Şenol 2009). Bu sistem, yılda 1,3 milyon kilowatt enerji tasarrufu sağlamakta ve 350 ton karbondioksitin doğaya salınmasını önlemektedir (Şenol, 2009). Ayrıca, çimlendirilmiş yeşil çatı sistemine sahiptir (Şenol 2009; Göç Yener 2021).



Şekil 4. Meydan Alışveriş Merkezi (İstanbul)

- **35. Sokak Projesi (İzmir):** Türkiye'nin uluslararası BREEAM sertifikasına sahip ilk konut projesidir (Geçer 2015). Proje, güneş panelleri ile şebekeye bağımlılığı azaltmayı ve gri su geri kazanım sistemi ile yıllık yaklaşık 26 olimpik yüzme havuzunu dolduracak kadar su tasarrufu sağlamayı hedeflemiştir (Geçer 2015; Çelebi 2022).



Şekil 5. 35. Sokak Projesi (İzmir)

- **Varyap Meridian (İstanbul):** Türkiye'nin ilk LEED kayıtlı karma projesi olup, sürdürülebilirlik ilkelerine uygun olarak konumlandırılmıştır. Proje, gri su kullanımı ve yağmur suyu geri kazanımı gibi sistemlerle su tasarrufu sağlamayı hedeflemiş; enerji ihtiyacının bir kısmını rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklardan karşılamayı planlamıştır (Sert 2010; Esmer 2019; Umoh ve ark. 2024).
- **TED Rönesans Koleji (İstanbul):** 2014 yılında LEED Gold sertifikası alan bu eğitim binası, eğitim binalarının enerji verimliliği potansiyelini göstermektedir. Kampüs, çatı bitkilendirme uygulamasına sahiptir ve sulamada damlama yöntemi kullanılmıştır (Arpacı 2020).
- **Konya Tropikal Kelebek Bahçesi:** Bu yapı, 2015 yılında LEED Silver (Gümüş) sertifikası alan ve Türkiye'deki ilk yeşil müze örneği olarak kabul edilmektedir (Dedeoğlu 2020).



Şekil 4. Konya Tropikal Kelebek Bahçesi

Tablo 3. Türkiye'deki öne çıkan sertifikalı kullanılan somut yeşil teknolojileri ve elde edilen tahmini kazanımlar

Proje Adı (Sertifika Düzeyi)	Uygulanan Temel Teknolojiler	Kazanımlar (Tahmini)	Kaynak
Eser Yeşil Binası (LEED Platinum)	Toprak Kaynaklı Isı Pompası (GSHP), PV paneller, Gri su geri kullanımı, Yüksek yalıtım,	Enerji Tüketimi %50 düşüş, Gri sular tuvaletlerde yeniden kullanım,	(Köteşli Aydın 2013; Dedeoğlu 2020)
Siemens Gebze Tesisi (LEED Gold)	Yüksek yansıtıcı çatı (Isı adası azaltımı), Damlama sulama, %40 Yerel malzeme kullanımı	%50 Su Tasarrufu, %30 Enerji Tasarrufu,	(Yaman 2009; Sert 2010)
Meydan AVM (BREEAM Very Good)	Jeotermal enerji sistemleri, Yeşil Çatı uygulaması	Yılda 350 ton CO ₂ salınımı önleme, Fosil yakıt kullanmadan ısıtma/soğutma	(Şenol 2009)

KAYNAKLAR

- Abdulla FA, Al-Shareef, AW (2009). Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination*, 243(1-3):195-207.
- Adhikari S, Nguyen TD, Silverman E (2025). A Review of Smart Building Energy Management Systems (BEMS) to Enhance Building Sustainability. *Proceedings of Associated Schools of Con*, 6:342-351.
- Akşar S (2025). Türkiye’de Yeşil Bina Sertifikasyonu: LEED Verileri Üzerinden Bir Değerlendirme. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 8(1):45–60.
- Aktaş U (2019). Bina sektöründe enerji verimliliği ve yeşil bina süreçlerinin analizi. *Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi*.
- Allouhi A, El Fouih Y, Kousksou T, Jamil A, Zeraouli Y, Mourad Y (2015). Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends. *Journal of Cleaner Production*, 109:118–130.
- Altan MF, Kalemci BC (2024). İnşaat mühendisliğinde yeşil bina tasarımı ve inşaatı. *Journal of Technical and Applied Sciences*, 4(04):01–07.
- Altın M (2013). Sürdürülebilir Bina Kabuğu Tasarımı ve Fotovoltaik Paneller. 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi. İzmir, Türkiye.
- Anbarcı M, Giran Ö, Demir İH (2012). Uluslararası Yeşil Bina Sertifika Sistemleri ile Türkiye'deki Bina Enerji Verimliliği Uygulaması. *Engineering Sciences*, 7(1):368-383.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2018-a). Enerji Kaynakları Etüt İdaresi.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2018-e). Enerji Kaynakları Etüt İdaresi.
- Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği (ÇEDBİK) (2019). ÇEDBİK konut sertifikası
- Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği (ÇEDBİK) (2024). Denge V4S raporu.
- Apriyanto A, Hidayat D (2025). Integration of Smart Building Technology in Green Building Concepts to Improve Energy Efficiency. *West Science Information System and Technology*, 3(1):69–74.
- Arpacı GS (2020). Yeşil Bina Sertifika Sistemlerinde Yangından Korunma. *Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi*.
- Aygün M, Kılıç S, Beler FP (2021). Türkiye’deki Yeşil Bina Sertifikasyon Süreci ve Anket Uygulaması. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi - B*, 9(1):178–187.
- Bayat F, Küçükali UF (2024). Sürdürülebilirlik Bağlamında Yeşil Binaların Ulusal ve Uluslararası Örnekler Üzerinden İncelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 20(4):325-335.
- Berköz E, Küçükdoğu M, Yılmaz Z, Kocaaslan G, Ak F (1995). Enerji etkin konut ve yerleşme tasarımı. *Tübitak*.

- Bingöl B (2020). LEED sertifikasyon sisteminin değerlendirilmesi ve Türkiye verilerinin analizi. Mimarlık, planlama ve tasarım alanında teori ve araştırmalar II. Gece Kitaplığı.
- Bruntland GH (1987). Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development. Oxford University Press.
- Bulut B (2014). Yeşil Bina Sertifika Sistemleri: Türkiye için Bir Sistem Önerisi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi
- Cevahir AC (2017). Akıllı/yeşil binaların enerji verimliliğine etkisinin incelenmesi ve bir kontrol sistemi önerisi. Yüksek Lisans Tezi. Selçuk Üniversitesi.
- ÇEDBİK (2007). Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği Kuruluşu.
- Çelebi Y (2022). Sürdürülebilir Yeşil Bina ve Kazanımları. Yüksek Lisans Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
- Çelik E (2009). Yeşil Bina Sertifika Sistemlerinin İncelenmesi Türkiye’de Uygulanabilirliklerinin Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Dedeoğlu D (2020). Green Museums: An Introduction and a Possible Implementation in Ankara. Yüksek Lisans Tezi. İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi.
- Demircan RK, Gültekin AB (2017). Binalarda pasif ve aktif güneş sistemlerinin incelenmesi. TÜBAV Bilim Dergisi, 10(1):36–51.
- Diker M (2016). Kentsel dönüşüm kapsamında konutlarda ulusal yeşil bina sertifikasının değerlendirilmesi: Fikirtepe örneği. Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Ding GK (2008). Sustainable construction The role of environmental assessment tools. Journal of environmental management, 86(3):451-464.
- DLA Piper. (2014). Towards A Greener Future: Market Report on Sustainable Real estate. DLA Piper Report, UK.
- Doğancı S (2017). Yeşil Binalarda Evsel Atık Yönetimi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Elibüyük U, Üçgül İ (2014). Rüzgâr türbinleri, çeşitleri ve rüzgâr enerjisi depolama yöntemleri. Yekarum, 2(3).
- Erten D (2009). Türkiye için yeşil bina sertifikası ve çözüm önerileri. Yapı Dergisi Yapıda Ekoloji Eki. 329:50-55.
- Erten D (2011). Yeşil binalar için imar planı tasarımlarında güneş enerji verimliliğinin incelenmesi: Samsun örneği. Yeşil binalar, sürdürülebilir üretim ve tüketim (Yayın No: V, ss. 5–16). T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.

- Esmer M (2019). Yapısal konutlarda ulusal yeşil bina sertifikasyon sistemleri ve enerjilerinin sürdürülebilirliği. Yüksek Lisans Tezi. Beykent Üniversitesi.
- EVA-Turkey (2025). Yeşil Binalar Araştırma Raporu: Endüstriyel Binalar (Rapor).
- Geçer E (2015). Sürdürülebilir Su Yönetimi Çerçevesinde Yeşil Bina Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
- Geçer E, Şentürk İ, Büyükgüngör H (2019). Yeşil bina tasarımında su ve enerji yönetimi üzerine uygulama örneği. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(2):332-343.
- GEÇİMLİ M, YAMAÇLI R (2019). SÜRDÜRÜLEBİLİR TASARIM BAĞLAMINDA DEĞERLENDİRME SİSTEMLERİ: ÇEDBİK-Konut Örneği. SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA ROLÜYLE MİMARLIK, 41.
- Gilner E, Galuszka A, Grychowski T (2019). Application of artificial intelligence in sustainable building design-optimisation methods. In 2019 24th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR) (pp. 81-86).
- Göç Yener Ü (2021). Green roof as an element of green infrastructure and inferences for implementations in Turkey. Yüksek Lisans Tezi. Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Gökçen T (2020). Yeşil bina sertifikasyon sistemlerinde yapı malzemesi alt kategorisinin araştırılması ve Türkiye'deki durum. Yüksek Lisans Tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi.
- Görgün B (2012). Enerji verimli yeşil bina sertifikasyonunda yol haritasının belirlenmesi için LEED ve BREEAM örneklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Gültekin AB, Bulut B (2015). Yeşil Bina Sertifika Sistemleri: Türkiye İçin Bir Sistem Önerisi. Ankara, Türkiye.
- Gültekin B, Esmer M, Arpacı GS (2014). Fire Safety Challenges of Green Buildings. Worcester Polytechnic Institute. Springer.
- Gür NV, AYGÜN M (2009). Mimaride sürdürülebilirlik kapsamında değişken yapı kabukları için bir tasarım destek sistemi. İTÜDERGİSİ/a, 7(1).
- Gürgün AP, Koç K, Atabay Ş (2021). Yapı Bilgi Modellemesi Kullanımının Sürdürülebilir Yeşil Bina Projeleri Üzerine Etkileri. Teknik Dergi, 32(1):11858-11880.
- Hasanlı A (2024). Smart and green technologies in building and urban planning. Journal of Technology in Architecture Design and Planning, 4(04):13-17.
https://www.aksanyapi.com/tr_TR/satisi-devam-eden-projeler/35inci-sokak/
<https://www.arkiv.com.tr/proje/konya-tropikal-kelebek-bahcesi/7986>
<https://www.ardex.com.tr/referans/meydan-istanbul-avm-yenileme-projesi/>

<https://www.altensis.com/proje/eser-holding-merkez-ofisi-ilk-leed-platin-sertifikali-bina/>

<https://www.yesilodak.com/kristalden-esinlenen-surdurulebilir-yasam-merkezi>

<https://www.otis.com/tr/tr/our-company/global-projects/project-showcase/bahrain-world-trade-center>

İnanç, F. (2010). Binalarda Enerji Modellemesi, Enerji Performans Analizi ve Yenilenebilir Enerji Kullanımının Çevre Dostu Yeşil Bina Uygulama Örneği Kapsamında Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi.

İskender S (2019). Akıllı Binalar. 14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi. İzmir, Türkiye.

Jia M, Komeily A, Wang Y, Srinivasan RS (2019). Adopting Internet of Things for the development of smart buildings: A review of enabling technologies and applications. *Automation in Construction*, 101:111–126.

Kalmış HV (2019). Şebeke bağımlı güneş enerjili yeşil binalar için bir enerji bilişim sistemi tasarımı ve geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi.

Kara B (2017). Akıllı bina cephelelerinin sürdürülebilir kalkınma bağlamında irdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Karimi H, Adibhesami MA, Bazazzadeh H, Movafagh S (2023). Green Buildings: Human-Centered and Energy Efficiency Optimization Strategies. *Energies* 2023, 16, 3681.

Kats GH (2003). Kats, G. (2003). Green building costs and financial benefits (pp. 2-8). Boston. MA: Massachusetts technology collaborative.

Kayın Ö (2018). Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi Ek Derslik Binasının Enerji Modellemesi Örneği Kapsamında Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi.

Kayın Ö (2019). Binalarda enerji modellemesi, enerji performans analizi ve yenilenebilir enerji kullanımının çevre dostu yeşil bina uygulama örneği kapsamında değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi.

Kibert CJ (2016). Sustainable construction: green building design and delivery. John Wiley & Sons.

Kobaş B (2011). Oluşturulmakta Olan Türk Yeşil Bina Değerlendirme Sisteminin Malzeme Kategorisi İçin BREEAM ve LEED Örneklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi.

- Koca Ö (2006). Sıcak kuru ve sıcak nemli iklim bölgelerinde enerji etkin yerleşme ve bina tasarım ilkelerinin belirlenmesine yönelik yaklaşım. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Köteşli Aydın T (2013). Yeşil Bina Sertifikasyonları Kapsamında Yerel Sistem Gerekliliğinin Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi.
- Lv Q (2025). Intelligent building design based on green and low-carbon concept. *Energy Informatics*, 8(1):1-18.
- Maçın M (2025). Investigation of green buildings towards net zero carbon: Example in ITU Ayazağa Campus. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Technical University.
- Mahmoudian M, Sharifikheirabadi P (2020). Uses of New/Smart Materials in the Green Building with Sustainability Concerns. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, 11(1):1–13.
- Mattoni B, Guattari C, Evangelisti L, Bisegna F, Gori P, Asdrubali F (2018). Critical review and methodological approach to evaluate the differences among international green building rating tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82:950–960.
- Minoli D, Sohraby K, Occhiogrosso B (2017). IoT considerations, requirements, and architectures for smart buildings—energy optimization and next-generation building management systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(2):269–283.
- Narin M, Akdemir S (2006). Enerji verimliliği ve Türkiye. Türkiye Ekonomik Kurumu.
- Pan J, Jain R, Paul S, Vu T, Saifullah A, Sha M (2015). An internet of things framework for smart energy in buildings: Designs, prototype, and experiments. *Internet of Things Journal, IEEE*, 2(6):527–537.
- Potbhare V, Syal M, Korkmaz S (2009). Adoption of green building guidelines in developing countries based on U.S. and India experiences. *Journal of Green Building*, 4(2):158–174.
- Ragab KM, Orhan MF (2024). Evaluating conventional and renewable energy systems for green buildings: A case study on energy efficiency and cost optimization. *Case studies in thermal engineering*, 63,105233.
- Rostami R (2025). A Review of Green Building Certification Systems through the Lens of Sustainable Architecture. *Journal of Design Studio*, 7(1),:157–170.
- Sağır YC (2024). Akıllı ve yeşil bina tasarımında lokasyon bazlı verimlilik analizi. Yüksek Lisans Tezi. İzmir Bakırçay Üniversitesi.

- Said F (2017). Türkiye İçin En Uygun Yeşil Binalar Sertifikasyon Sistemini Belirlemeye Yönelik Analitik Hiyerarşi Süreci Tabanlı Yaklaşım. Yüksek Lisans Tezi. Çankaya Üniversitesi.
- Sameer M (2024). Converting Conventional Buildings into Green Buildings Using BIM Technology. *AURUM Journal of Engineering Systems and Architecture*, 8(2):235–248.
- Sartori I, Hestnes AG (2007). Energy Use in the Life Cycle of Conventional and Low-Energy Buildings: A Review Article. *Energy and Buildings*, 39:249–257.
- Semeraro C, Lezoche M, Panetto H, Dassisti M (2025). Digital twin-driven innovation in smart and green building: a structured literature review. *International Journal of Thermofluids*, 29,101393.
- Sert S Kaya (2010). Bina yaşam döngüsünde enerji analizi ve yeşil binalar. Yüksek Lisans Tezi. Ege Üniversitesi.
- Sev A (2009). Sürdürülebilir Mimarlık. YEM Yayın.
- Sev A, Canbay N (2009). Dünya Geneline Uygulanan Yeşil Bina Değerlendirme ve Sertifika Sistemleri. *Yapı Dergisi Yapıda Ekoloji Eki*, 329:42–47.
- Shahsavar F (2025). Integrating Sustainable Design, Smart Technologies, Certification in Green Hospital Architecture. *Journal of Design Studio*, 7(1):207–216.
- Palta, O., Çıbuk, M., & Güldemir, H. (2026). Illumination-aware deep learning for white blood cell classification: A CBAM and texture feature fusion approach. *Light & Engineering*.
- Sinoplu M, Ceyhan EB (2023). Akıllı Binalarda Yapay Zekâ Destekli Enerji Yönetimi: Bir İnceleme. *UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 5(1):39–63.
- Soğuksu S (2019). Türkiye’de Konut Yapılarında Yeşil Bina Üretim Sürecinin Paydaşlar Üzerinden Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Sönmez N (2021). Yeşil Bina Değerlendirme Sistemlerinde İnşaat Atıkları ve İnşaat Atık Yönetimi Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Sümer E (2013). Yeşil Bina Proje Yönetim Süreçleri ve Türkiye’de LEED ve BREEAM Uygulamalarında Proje Yönetimi Süreçlerine İlişkin Örnek Bir Çalışma. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Şenol S (2009). Gayrimenkul geliştirme sürecinde yeşil binaların sürdürülebilirlik kriterleri açısından incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi.

- T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. (2000, 8 Mayıs). Binalarda Isı Yalıtım Yönetmeliği. Resmî Gazete (Sayı: 24043).
- T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. (2008, 5 Aralık). Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği. Resmî Gazete (Sayı: 27075).
- T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. (2010, 10 Haziran). Enerji Kimlik Belgesi Uygulaması Başlangıcı Tebliği (Tebliğ No: YİG-16/2010-01). Resmî Gazete (Sayı: 27607).
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2014). Binalarda enerji performansı yönetmeliği. Resmî Gazete (Sayı: 29030), 25 Nisan 2014.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2007, 2 Mayıs). 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu. Resmî Gazete (Sayı: 26510).
- Turhan C, Bal Koçyiğit F, Zinkçi MA, Sayesthnom M (2019). Feasibility of Nearly-Zero Energy Building Retrofits by Using Renewable Energy Sources in an Educational Building. *International Rating Academy Journal of Scientific Perspectives*, 3(4):311–318.
- Ullah A, İrklı Eryıldız D (2023). The effectiveness of 5G technology for smart buildings' energy management. *Journal of Technology in Architecture Design and Planning*, 1(2):102–110.
- Umaroğulları F, Kartal S, Aydın D (2020). A Comparative Study on Turkey's National Green Building Certification System Under Energy Policy Developments. *ICONARP International Journal of Architecture and Planning*, 8(1):187–210.
- Umoh AA, Nwasike CN, Tula OA, Adekoya OO, Gidiagba J. (2024). A Review of Smart Green Building Technologies: Investigating the Integration and Impact of AI and IoT in Sustainable Building Designs. *Computer Science & IT Research Journal*, 5(1):141–165.
- Palta, O., & Güldemir, H. (2019). Elimination of the single phase parallel active power filter harmonic in distribution network. *International Journal of Research*, 6(1), 185–190.
98. U.S. Environmental Protection Agency. (2010). What is a green building? Fundamental principles of green building and sustainable site design. U.S. EPA.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2016). Green Building Basics.
- Wang S, Li Y, Cui Y, Yu J, Zhou C, Ametefe DS, Darboe T (2025). Integrating renewable energy into building energy systems: a systematic review of strategies, barriers, and policy interfaces. *Discover Sustainability*, 6(1):1-22.
- Yakalı Ö (2011). Material selection optimization model for green buildings. Master of Science Thesis. Boğaziçi Üniversitesi.

- Yalçın M, Deniz A, Korkmaz ME (2024). Yeşil Binalar için İmar Planı Tasarımlarında Güneş Enerji Verimliliğinin İncelenmesi; Samsun Örneği. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)*, 6(2):143–157.
- Yaman C (2009). Siemens Gebze Tesisleri Yeşil Bina. IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi. İzmir, Türkiye.
- Yaman Y (2007). Enerji Tasarrufu ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları. Birsen Yayınevi.
- Yang B, Lv Z, Wang F.(2022). Digital Twins for Intelligent Green Buildings. *Buildings*, 12(6):856.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Yapı İşleri Genel Müdürlüğü. (2010). Binalara sertifikasyon süreci.
- Yetkin EG (2020). Sürdürülebilir mimari bağlamında ülkemiz tarihi yapıları için yeşil bina değerlendirme modeli önerisi. Doktora Tezi. Konya Teknik Üniversitesi.
- Yılmaz B (2019). Türkiye için Sürdürülebilir Bina Performans Kriterleri ve Bütünleşik Tasarım Yönetim Modeli Oluşturulması. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Yılmaz Z (2006). Akıllı Binalar ve Yenilenebilir Enerji. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 91:7–15.
- Yılmaz Z (2014). Yeşil Bina Kavramı ve Yeşil Bina Sertifikasyon Süreci. *Aktüel*, 8(1):184-185.
- Zhu Y (2024). Application of Smart Energy Management Systems in Green Buildings. *Highlights in Science, Engineering and Technology ICMCE 2024*, 95.