
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

TARİHÎ BİNALARDA MALZEME BAZLI YANGIN YÜKÜ ANALİZİ İÇİN BIM-CBS ENTEGRELİ BİR MODEL (YAN-SIM) ÖNERİSİ

Bilgehan BAKIRHAN

DOKTORA TEZİ
MİMARLIK ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2026

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Bilgehan BAKIRHAN

16/01/2026

TARİHÎ BİNALARDA MALZEME BAZLI YANGIN YÜKÜ ANALİZİ İÇİN BIM-CBS ENTEGRELİ BİR MODEL (YAN-SIM) ÖNERİSİ

(Doktora Tezi)

Bilgehan BAKIRHAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2026

ÖZET

Tarihî binalar, toplumların kültürel kimliğini temsil eden değerli varlıklardır ancak yangın tehlikesine karşı son derece kırılgandırlar. Notre-Dame Katedrali ve Brezilya Ulusal Müzesi gibi dünya çapındaki yangınlar, kültürel mirasın korunmasında yangın güvenliğinin kritik önemini ortaya koymaktadır. Türkiye'de de Haydarpaşa Garı ve Safranbolu'daki tarihî binalarda meydana gelen yangınlar bu acil ihtiyacı vurgulamaktadır. Bu doktora tezi, tarihî binalardaki yangın risklerinin malzeme bazlı yangın yükü hesaplamaları üzerinden değerlendirilmesini ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile entegre edilebilir kapsamlı bir metodolojinin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, Yangın Simülasyon Aracı (YAN-SIM) adlı özgün bir yazılım sistemi geliştirilmiştir. Yazılım, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) modellerinden otomatik veri çekme, yangın yükü hesaplama, İspanya RSCIEI standardına göre sekiz seviyeli risk sınıflandırma, UNESCO, ICOMOS ve NFPA gibi uluslararası standartlara uygun koruma önerileri sunma ve Open Street Map (OSM) altyapısı üzerinden interaktif risk haritaları oluşturma kapasitelerine sahiptir .Çalışmanın uygulama aşamasında, UNESCO Dünya Mirası Listesi'ndeki Safranbolu'da dört tescilli tarihî konut üzerinde vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. Binaların BIM modelleri oluşturulmuş ve YAN-SIM sistemine aktarılmıştır. Yazılım, her bina için malzeme bazlı yangın yükü hesaplamaları yapmış, risk seviyelerini belirlemiş ve yapıya özgü yangın güvenlik önerileri üretmiştir. Araştırma bulguları, YAN-SIM yazılımının geleneksel manuel yöntemlere kıyasla önemli bir zaman verimliliği sağladığını göstermiştir. Geliştirilen sistem, yerel yönetimlere ve koruma kurullarına stratejik planlama için bilimsel temelli bir araç sunmaktadır. Bu çalışma, tarihî binalarda yangın güvenliği değerlendirmesinde standart tabanlı ve tekrarlanabilir nicel yöntemlere geçişi kolaylaştıran yenilikçi bir altyapı sunmaktadır.

Bilim Kodu	:	80136
Anahtar Kelimeler	:	Tarihî bina yangın güvenliği, yangın yükü, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), kültürel miras koruması
Sayfa Adedi	:	87
Danışman	:	Prof. Dr. Figen BEYHAN

A BIM-GIS INTEGRATED MODEL PROPOSAL (YAN-SIM) FOR MATERIAL-BASED FIRE LOAD ANALYSIS IN HISTORIC BUILDINGS

(Ph. D. Thesis)

Bilgehan BAKIRHAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2026

ABSTRACT

Historic buildings are valuable assets representing societies' cultural identity but are highly vulnerable to fire hazards. Fire incidents at world-renowned sites such as Notre-Dame Cathedral and the National Museum of Brazil underscore the critical importance of fire safety in cultural heritage preservation. In Turkey, fires at Haydarpaşa Station and historic buildings in Safranbolu highlight the urgent need for systematic fire risk management. This doctoral dissertation aims to assess fire risks in historic buildings through material-based fire load calculations and develop a comprehensive methodology integrated with Geographic Information Systems (GIS). An original software system named Fire Simulation Engine (YAN-SIM) has been developed. The software possesses capabilities including automatic data extraction from Building Information Modeling (BIM) models, fire load calculation, eight-level risk classification according to the Spanish RSCIEI standard, provision of protection recommendations aligned with international standards such as UNESCO, ICOMOS, and NFPA, and generation of interactive risk maps through Open Street Map (OSM) infrastructure. In the application phase, a case study was conducted on four registered historic residential buildings in Safranbolu, a UNESCO World Heritage Site. BIM models were created and transferred to the YAN-SIM system. The software performed material-based fire load calculations, determined risk levels, and generated building-specific fire safety recommendations for each structure. Research findings demonstrate that YAN-SIM software provides significant time efficiency compared to traditional manual methods. The developed system offers local governments and conservation boards a scientifically-based tool for strategic planning. This study provides an innovative infrastructure that facilitates the transition to standard-based and reproducible quantitative methods in fire safety assessment of historic buildings.

Science	:	80136
Key Words	:	Historic building fire safety, fire load, Geographic Information Systems (GIS), cultural heritage conservation
Page	:	87
Supervisor	:	Prof. Dr. Figen BEYHAN

TEŞEKKÜR

Her şeyden önce, bu zorlu süreçte beni başarıya ulaştıran, bilgi ve sağlık veren, ailem ve sevdiklerimle birlikte olmamı sağlayan yüce Allah'a (c.c) sonsuz şükürlerimi sunarım. Doktora eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, akademik gelişimime yön veren ve her aşamada yapıcı eleştirileriyle bana yol gösteren değerli danışmanım Prof. Dr. Figen BEYHAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez çalışmamı titizlikle inceleyen, değerli görüş ve önerileriyle araştırmamın niteliğini artıran saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Çiğdem Belgin DİKMEN, Prof. Dr. Hüseyin Güçlü YAVUZCAN, Prof. Dr. Arzu ÖZEN YAVUZ ve Prof. Dr. Aslı ER AKAN'a içtenlikle teşekkür ederim. Bu zorlu süreçte her daim yanımda olan, sabır ve anlayışıyla beni destekleyen, en zor anlarda motivasyon kaynağım olan sevgili eşim Arş. Gör. Ebru KILIÇ BAKIRHAN'a teşekkür ederim. Onun varlığı, bu tezin ve diğer pek çok çalışmamın tamamlanmasında en büyük güç kaynağım olmuştur. Bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan, bana verdikleri değerlerle hayata hazırlayan ve her zaman arkamda duran sevgili annem Ayten BAKIRHAN'a ve babam Abdurrahman BAKIRHAN'a, desteklerini esirgemeyen abim Mahmut BAKIRHAN, ablam Neslihan BEKMEZCİ ve ailelerine sonsuz teşekkür ve sevgilerimi sunarım. Son olarak Karabük Üniversitesi'nde birlikte çalıştığım, akademik ve sosyal anlamda katkılarını esirgemeyen tüm değerli meslektaşlarıma, hocalarıma ve öğrencilerime içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında doğrudan ya da dolaylı olarak emeği geçen herkese şükranlarımla…

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xii

HARİTALARIN LİSTESİ xiii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. KAYNAK TARAMASI 11

2.1. Tarihî Binalarda Yangın Örnekleri 11

2.1.1. Dünyadan yangın örnekleri 11

2.1.2. Türkiye'den yangın örnekleri 13

2.2. Tarihî Binalarda Yangın Riski ve Değerlendirme Yöntemleri 16

2.2.1. Çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımı 17

2.2.2. Nitel risk analizi yaklaşımı 18

2.2.3. İndeks tabanlı yaklaşım 18

2.2.4. Olasılıksal ve istatistiksel yaklaşım 19

2.2.5. Makine öğrenmesi yaklaşımı 20

2.2.6. Dinamik risk değerlendirme yaklaşımı 21

2.2.7. Yangın önleme yaklaşımı 21

2.3. Yangın Yükü Hesaplama Metodolojileri ve Yapı Malzemelerinin Etkileri 22

2.4. Yangın Modellemesi ve Simülasyon 23

Sayfa

2.5. BIM ve HBIM Uygulamaları 24
2.6. Yangın Risk Haritalandırması 25
2.7. Yangın Güvenlik Standartları 27
2.7.1. Uluslararası yangın güvenlik standartları 28
2.7.2. Türkiye'deki yangın güvenlik düzenlemeleri 31
2.8. Bölüm Değerlendirmesi 32
3. MATERYAL VE YÖNTEM 35
3.1. YAN-SIM Yazılımının Tasarımı ve Çalışma Prensibi 35
3.2. YAN-SIM Yazılımının Validasyonu 46
4. VAKA ÇALIŞMASI VE YANGIN RAPORU SÜRECİ 49
4.1. Çalışma Alanının Belirlenmesi 49
4.2. Tescilli Tarihî Binaların Mimari Projelerinin Temini 50
4.3. Binaların BIM Modellerinin Oluşturulması 50
4.4. YAN-SIM ile Yangın Yükü Analizi 52
4.5. Risk Seviyelerinin Belirlenmesi 53
4.6. CBS Tabanlı İnteraktif Risk Haritalarının Üretilmesi 54
4.7. Yangın Raporunun Oluşturulması 56
4.8. Vaka İncelemesi 57
5. BULGULAR 61
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 71
KAYNAKLAR 75
EKLER 81
EK-1. YAN-SIM tarafından oluşturulan TB01 yangın raporu 82
EK-2. YAN-SIM tarafından oluşturulan TB02 yangın raporu 83
EK-3. YAN-SIM tarafından oluşturulan TB03 yangın raporu 84
EK-4. YAN-SIM tarafından oluşturulan TB04 yangın raporu 85

Sayfa

ÖZGEÇMİŞ 86

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Dünyada meydana gelen tarihî bina yangınları (1992-2023) 12

Çizelge 2.2. Türkiye'de meydana gelen tarihî bina yangınları (2002-2024) 14

Çizelge 2.3. Yangın yükü yoğunluğuna göre yangın çıkma riski 30

Çizelge 3.1. YAN-SIM veri tabanındaki malzemelerin alt ısıl değerleri ve yoğunlukları 38

Çizelge 3.2. Yangın yükü yoğunluğuna dayalı risk sınıflandırması ve renk kodlaması 42

Çizelge 4.1. Analiz edilen tarihi binaların yapısal ve işlevsel özellikleri 58

Çizelge 5.1. Binaların taban alanı, yangın yükü yoğunluğu ve risk sınıflandırması 67

Çizelge 5.2. İncelenen binalarda kullanılan ahşap türlerinin kütleleri ve alt ısıl değerlerine göre dağılımı 67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Safranbolu Tarihi Çarşı'daki tarihî binalarda meydana gelen yangınların yıllık dağılımı 4

Şekil 1.2. Çalışmanın metodolojik akış şeması 10

Şekil 3.1. YAN-SIM yazılımının temel çalışma prensibi 35

Şekil 3.2. YAN-SIM ana grafik kullanıcı arayüzü 36

Şekil 3.3. YAN-SIM arayüzünde IFC dosyasından çıkarılan malzeme ve hacim bilgileri 37

Şekil 3.4. YAN-SIM kullanıcı arayüzünde malzeme kategorileri ve hesaplama modülleri 37

Şekil 3.5. YAN-SIM arayüzünde yangın yükü hesaplama özeti ve sonuç bildirimi 40

Şekil 3.6. YAN-SIM arayüzünde yangın yükü yoğunluğu ve risk seviyesinin belirlenmesi 41

Şekil 3.7. YAN-SIM arayüzünde OSM tabanlı yangın risk haritası oluşturma..... 42

Şekil 3.8. YAN-SIM yazılımının ürettiği yangın yükü analiz raporu..... 44

Şekil 3.9. YAN-SIM yazılımının tam süreç çalışma prensibi 45

Şekil 3.10. Tarihî Jufu Hall binasının yangın yükünün YAN-SIM üzerinden analizi.... 47

Şekil 5.1. TB01'in yangın yükü yoğunluğu ve risk seviyesi 61

Şekil 5.2. TB01'e ait ahşap türlerinin yangın yükü dağılımı 62

Şekil 5.3. TB02'nin yangın yükü yoğunluğu ve risk seviyesi 63

Şekil 5.4. TB02'ye ait ahşap türlerinin yangın yükü dağılımı 63

Şekil 5.5. TB03'ün yangın yükü yoğunluğu ve risk seviyesi 64

Şekil 5.6. TB03'e ait ahşap türlerinin yangın yükü dağılımı 65

Şekil 5.7. TB04'ün yangın yükü yoğunluğu ve risk seviyesi 66

Şekil 5.8. TB04'e ait ahşap türlerinin yangın yükü dağılımı 66

Şekil 5.9. Binalardaki ahşapların türlerine göre oluşturduğu yangın yükü dağılımı 68

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 1.1. 15 Nisan 2019'da meydana gelen Notre Dame Katedrali yangını 2

Resim 1.2. 2 Eylül 2018'de meydana gelen Brezilya Ulusal Müzesi yangını..... 2

Resim 1.3. 31 Ekim 2019'da meydana gelen Shuri Kalesi yangını..... 3

Resim 1.4. 28 Kasım 2010'da meydana gelen Haydarpaşa Tren Garı yangını 3

Resim 1.5. 16 Ağustos 2022'da meydana gelen ipek fabrikası yangını 4

Resim 3.1. Jufu Hall Binası'na ait görseller Beijing/Çin..... 46

Resim 4.1. Analiz edilen tarihi binaların mevcut durumu ve BIM modelleri 59

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita **Sayfa**

Harita 3.1. YAN-SIM arayüzünde yangın risk haritası ve interaktif bina bilgi penceresi 43

Harita 5.1. İncelenen tarihi yapıların YAN-SIM yazılımı ile oluşturulmuş kümülatif yangın risk haritası 69

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A_{tf}	Toplam mekân alanı
c	Alt ısıl değer
D	Yoğunluk
kg	Kilogram
m	Kütle
m^2	Metrekare
m^3	Metreküp
MJ	Megajoule
Q_{fd}	Toplam yangın yükü yoğunluğu
Q_t	Toplam yangın yükü
V	Hacim

Kısaltmalar	Açıklamalar
AHP	Analitik Hiyerarşi Süreci
BIM	Yapı Bilgi Modelleme
BN	Bayes Ağları
BSI	İngiliz Standartları Enstitüsü
BYKHY	Binaların Yangından Korunması Hakkındaki Yönetmelik
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
CFD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CFPA-E	Avrupa Yangın Koruma Dernekleri Konfederasyonu
CPT	Koşullu Olasılık Tabloları
CSS	Basamaklı Stil Sayfaları
ÇKKV	Çok Kriterli Karar Verme
EWM	Entropi Ağırlık Yöntemi
FAHP	Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci

Kısaltmalar	Açıklamalar
FDS	Dinamik Yangın Simülasyonu
FRI	Yangın Risk Endeksi
HBIM	Tarihî Yapı Bilgi Modelleme
HTML	Hiper Metin İşaretleme Dili
ICOMOS	Uluslararası Anıtlar ve Sitler Konseyi
IoT	Nesnelerin İnterneti
JSON	JavaScript Nesne Gösterimi
LOD	Detay Seviyesi
NFPA	Ulusal Yangından Korunma Birliği
OSM	Açık Sokak Haritası
RSCIEI	Endüstriyel Tesislerde Yangın Güvenliği Yönetmeliği
SFPE	Yangın Koruma Mühendisleri Derneği
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UNESCO	Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Örgütü
VR	Sanal Gerçeklik
YAN-SIM	Yangın Simülasyon Aracı

1. GİRİŞ

Bir ülkenin sahip olduğu değerler, kendi kültürel kimliğini oluşturan en önemli varlıklardır. Bu bakımdan, geçmişin izlerini taşıyan bu değerler, yalnızca o ülkede yaşayanların değil tüm insanlığın ortak mirasıdır ve dolayısıyla da korunmaya muhtaçtır. Tarihî binalar da içerdikleri yaşanmışlıkları ve mimari özellikleriyle dönemlerinin izlerini günümüze aktaran kültürel miraslardandır [1]. Tarihî binalar, geçmişte yaşayan insanların yaşam biçimlerini, bilgi birikimini, sanat anlayışını ve teknolojik yönlerini günümüze taşıyarak toplumsal hafızanın korunmasına hayati derecede katkı sağlar.

Tarihî binaların sahip olduğu değerler ve bu değerlerin korunması gerekliliği, söz konusu binaların özgün karakteriyle doğrudan ilişkilidir. 1994 yılında Japonya'da gerçekleştirilen Uluslararası Anıtlar ve Sitler Konseyi (ICOMOS) toplantısında, bir anıtın özgünlüğü kavramı, o anıta ait çok sayıda bilgi kaynağının mevcudiyetiyle ifade edilmiştir [2]. Söz konusu bilgi kaynakları; malzeme ve nesne arasındaki ilişki, işlevsellik, inşa teknikleri, tasarım ve biçimsel özellikler, konumlandırma ve yerleşim özellikleri, mekânın atmosferi ile tarihsel gelişim süreçlerini kapsamaktadır. Uğurlu ve Böke (2009)' ye göre bu bilgi kaynaklarının oluşturduğu bütünsel bakış sayesinde kültürel mirasın çok boyutlu bir perspektifle tanımlanması mümkün olmaktadır [3]. Bu bağlamda, ait oldukları döneme ilişkin tarihî, siyasi, sosyal, kültürel, ekonomik ve teknolojik verilerin yanı sıra bina-insan-çevre ilişkisine dair bilgileri barındıran tarihî binaların korunması, çok yönlü bilgi kaynaklarının sağlıklı bir biçimde kuşaklararası aktarımının gerçekleştirilmesinde kritik önem taşımaktadır.

Ancak tarihî binalar yaşları, yapısal özellikleri ve içerdikleri malzemelerin doğal yapıları nedeniyle yangın tehlikesine karşı oldukça kırılgandır. 15 Nisan 2019'da Paris'te bulunan Notre-Dame Katedrali'ndeki yangın, dünya genelinde büyük bir üzüntüye neden olmuş ve tarihî binalardaki yangın tehdidinin ne kadar kritik olduğunu bir kez daha gözler önüne sermiştir [4] (Resim 1.1).



Resim 1.1. 15 Nisan 2019'da meydana gelen Notre Dame Katedrali yangını

2 Eylül 2018'de Rio de Janeiro'daki Brezilya Ulusal Müzesi'nde benzer bir trajedi meydana gelmiş; 20 milyon tarihî eserden sadece yüzde 10'u kurtarılabilmiştir [5] (Resim 1.2). Japonya'nın Okinawa şehrinde yer alan Shuri Kalesi 31 Ekim 2019'da bir elektrik kaçağının tetiklediği yangınla büyük ölçüde tahrip olmuştur [6] (Resim 1.3).



Resim 1.2. 2 Eylül 2018'de meydana gelen Brezilya Ulusal Müzesi yangını



Resim 1.3. 31 Ekim 2019'da meydana gelen Shuri Kalesi yangını

Türkiye'de ise 28 Kasım 2010'da tarihî Haydarpaşa Garı'nda restorasyon çalışmaları esnasında çıkan yangın, çatının tamamen yanmasına, taşıyıcı ve kaplama malzemelerin ısı nedeniyle bozulmasına yol açmıştır. Ayrıca söndürme çalışmaları sırasında kullanılan suyun bezeme ve taş yüzeylerde ek hasar oluşturmasına sebep olmuştur [7] (Resim 1.4). Bursa'nın Osmangazi ilçesinde bulunan 92 yıllık ahşap ipek fabrikası, 16 Ağustos 2022 tarihinde meydana gelen yangında, itfaiye ekiplerinin alana ulaşımındaki zorluklardan ve alevlerin hızlı yayılımı nedeniyle kontrol altına alınamadığından dolayı kullanılamaz hâle gelmiştir [8] (Resim 1.5).

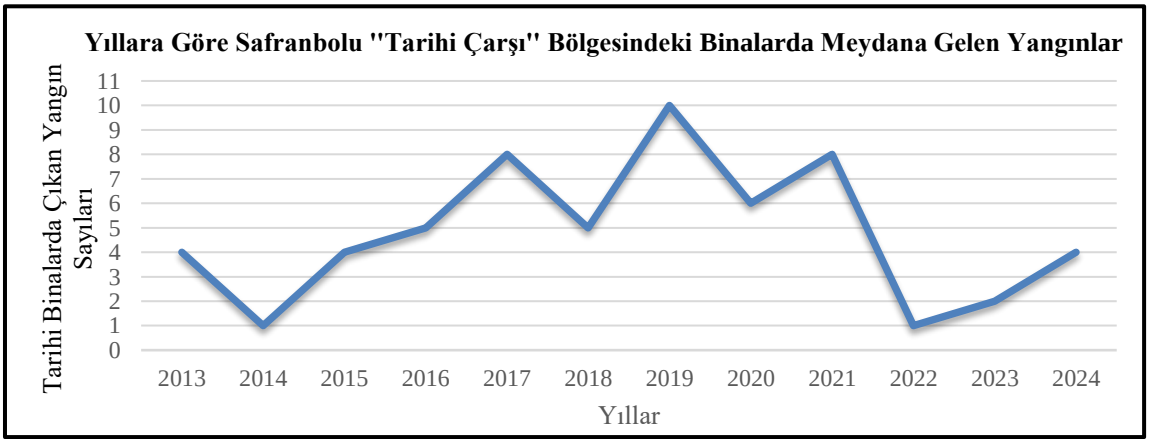


Resim 1.4. 28 Kasım 2010'da meydana gelen Haydarpaşa Tren Garı yangını



Resim 1.5. 16 Ağustos 2022’da meydana gelen ipek fabrikası yangını

18. ve 19. yüzyıl Anadolu Türk toplumunun yaşam biçimini yansıtan ve Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Örgütü (UNESCO) tarafından tamamı kentsel miras alanı olarak tescillenen Safranbolu’da, 2013–2024 yılları arasında elektrik kontağı, baca tutuşması ve vandalizm gibi başlıca nedenlerle 58 yangın vakası meydana gelmiştir. Bu yangınlar bazı tarihî binaların ağır hasar almasına veya yok olmasına yol açmış olup, miras alanlarında koruma bilincinin ve teknik yangın önlemlerinin yetersizliğini açık biçimde ortaya koymaktadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Safranbolu Tarihi Çarşı'daki tarihî binalarda meydana gelen yangınların yıllık dağılımı [9]

Problem durumu / Konunun tanımı

Dünya genelinde ve özellikle Türkiye'de pek çok tarihî bina, yapısal özellikleri, içerdikleri malzemeler nedeniyle ciddi yangın riskleriyle karşı karşıyadır. Geleneksel ahşap karkas sistemler, ahşap tavanlar, süslemeler ve tefrişler yüksek yangın yükü oluşturmakta, gizli boşluklar, şömineler/bacalar ve merdiven boşlukları yangının hızla yayılmasına neden olmaktadır. Ayrıca eskimiş ve standartlara uygun olmayan elektrik tesisatları, kalitesiz ısıtma sistemleri, bina içinde toz ve örümcek ağı birikmiş alanlar ile bina dışında biriken kuru ot, dal vb. yanıcı malzemelerin tutuşma tehlikesi ile bitişik nizamlı yapılaşma da yangının yayılma riskini artıran etmenlerdendir.

Tarihî değere sahip binaların yangın gibi bir felakette zarara uğraması, maddi hasarların yanı sıra manevi açıdan da olumsuz etkiler yaratmaktadır. Tarihî dokuyu oluşturan ögelerin genellikle benzersiz ve tek olması, yangın olaylarında telafisi olmayan kayıplara yol açabilmektedir [10].

Mevcut yangın risk değerlendirme metodolojileri, genellikle çağdaş binalar için geliştirilmiş olup tarihî binaların kendine özgü karakteristikleri yeterince dikkate alınmamaktadır. Geleneksel malzemelerin yangın davranışları genellikle göz ardı edilmekte ve yangın yükü hesaplamaları tahmine dayalı kalmaktadır. Önerilen güvenlik önlemleri sıklıkla tarihî binaların otantik karakterlerini zedeleyici olmakta, yerel yönetimler bölgesel yangın risk dağılımlarını görselleştirecek araçlardan yoksundur.

Türkiye'de tarihî binaların yangın güvenliği, diğer tüm binaları da kapsayan Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY)'e ait "On Birinci Kısım - Tarihî Yapılar" başlığı altında özel hükümlerle düzenlenmiştir [11]. Bu maddelerin dışında spesifik bir standart bulunmamaktadır.

Araştırmanın amacı

Bu çalışma, tarihî binalardaki yangın risklerinin malzeme bazlı yangın yükü hesaplamaları üzerinden değerlendirilmesini, binaların özgün karakterlerini koruyarak yangın güvenlik tedbirlerinin önerilmesini ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile entegre edilebilir kapsamlı bir metodolojinin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, geliştirilen

Yangın Simülasyon Aracı (YAN-SIM) yazılımı, Endüstri Temel Sınıfları (IFC) formatındaki Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) modellerinden otomatik hacim ve alan verisi çekme, yapı malzemelerini içeren gömülü veri tabanını kullanarak yangın yükü ve yoğunluğunu hesaplama, Endüstriyel Tesislerde Yangın Güvenliği Yönetmeliği (RSCIEI)'de yayınlanan yangın yükü yoğunluğu-risk metodolojisine göre sekiz seviyeli risk sınıflandırma, UNESCO, ICOMOS, NFPA ve Eurocode gibi uluslararası standartlara uygun koruma önerileri sunma ve Açık Sokak Haritası (OSM) altyapısı üzerinden interaktif risk haritaları oluşturma kapasitelerine sahiptir.

Çalışma, tekil yapı ölçeğinin ötesinde sokak, mahalle, ilçe ve il düzeyinde yangın risk haritalarının oluşturulmasını sağlayarak yerel yönetimler, AFAD, koruma kurulları ve afet koordinasyon merkezleri için stratejik planlama aracı niteliği taşımaktadır. Çalışmanın alt amaçları şu şekilde sıralanabilir:

- Tarihî binalarda kullanılan malzemelerin yangın yükü değişkenlerinin belirlenmesi,
- BIM teknolojisinin yangın risk değerlendirme süreçlerine entegre edilmesi,
- Yangın yükü yoğunluğu ile risk seviyeleri arasındaki ilişkinin modellenmesi,
- Uluslararası koruma standartlarıyla uyumlu ve tersine çevrilebilir güvenlik tedbirlerinin geliştirilmesi ve
- CBS tabanlı risk haritalarının kentsel koruma politikalarına katkı sağlayacak şekilde tasarlanması.

Araştırmanın önemi

Çalışmanın değeri, çok katmanlı bir bakış açısıyla incelendiğinde metodolojik açıdan, Eurocode 1 standardına dayalı yangın yükü hesaplama prosedürünün tarihî binalara özgü malzeme değişkenleriyle zenginleştirilmesi, literatüre özgün bir katkı sunmaktadır. Geleneksel ahşap türleri, yalıtım ve dolgu malzemelerinin alt ısıl değerleri ile özkütle verileri, kapsamlı bir veri tabanında toplanarak tarihî binaların yangın güvenliği alanındaki önemli bir boşluğun doldurulmasına olanak tanımaktadır. Teknolojik açıdan ele alındığında, IFC formatındaki BIM modellerinden otomatik veri çekme işlemi, manuel ölçüm hatalarını ortadan kaldırırken süreç verimliliğini yükseltmektedir. Aynı zamanda bu metodoloji, tarihî binaların dokümantasyonunda yeni bir standart oluşturma potansiyeli taşımaktadır. Coğrafi ölçekte ise, OSM altyapısı üzerinden gerçekleştirilen risk haritalaması, tekil bina

analizlerinin ötesine geçerek kentsel ölçekli koruma politikalarının geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır. UNESCO, ICOMOS ve NFPA gibi küresel standartları temel alarak hazırlanan tedbirler, tarihî binaların özgün kimliğini bozmadan güvenlik düzeylerini yükseltmeyi hedeflemektedir. En az müdahale ve geri dönüşüm ilkeleri çerçevesinde şekillendirilen bu tedbirler, kültürel mirasın korunması ile yangın güvenliği arasında hassas bir denge kurmayı amaçlamaktadır. YAN-SIM, geleneksel HBIM sürecinin dokümantasyon ve görselleştirme odağının ötesinde, BIM modellerinden otomatik veri çıkarımı, yangın yükü hesaplama ve CBS tabanlı risk haritalama işlevlerini tek bir platformda ele alarak, çok aşamalı süreçleri otomatize edilmiş bir yangın risk değerlendirme sistemine dönüştürmektedir. YAN-SIM'in modüler mimarisi ve açık kaynak yaklaşımı, yazılımın sadece tarihî binalarla sınırlı kalmayıp, gelecekte konut, hastane, ofis ve oteller gibi farklı işlevlere sahip tüm bina tiplerine sorunsuzca uyarlanabilmesini sağlamaktadır. Ayrıca ilerleyen periyotta mobil uygulama (*mobile application*), BIM eklentileri (*plug-in*) ve bulut tabanlı platform (*cloud*) gibi genişleme olanakları, sistemin hem ulusal hem de uluslararası ölçekte yaygınlaşmasına geniş bir zemin sunacaktır. Türkiye bağlamında, tarihî binaların yangın güvenliği için kapsamlı bir ulusal standardın eksik olduğu gerçeği göz önüne alındığında, bu araştırma metodolojisi ve YAN-SIM yazılımı, söz konusu boşluğu dolduracak kritik bir adım niteliği taşımaktadır.

Varsayımlar / Sayıltılar

Çalışmanın belirli varsayımları bulunmaktadır. İlk olarak, analiz edilen tarihî binaların mevcut durumlarının mimari projeleriyle uyumlu olduğu varsayılmıştır. Ayrıca binalarda zamanla oluşan eklentiler ve değişiklikler dikkate alınmamış olmakla birlikte, yerinde gözlemlerle kontroller yapılmış ve projesine ulaşılabilen dört binada yüksek doğruluk oranı tespit edilmiştir. Her bir yapı elemanının homojen malzeme kompozisyonuna sahip olduğu varsayılmıştır. Binalardaki malzemelerin nem içeriğinin normal iklim koşullarında olduğu kabul edilmiştir. Binaların normal kullanım yoğunluğunda olduğu ve aşırı mobilya veya depolama yükü olmadığı varsayılmıştır. Son olarak, IFC formatındaki BIM modellerinin Detay Seviyesi (LOD) 300 veya üzeri detay seviyesinde olduğu ve geometrik hataların minimum düzeyde olduğu varsayılmıştır.

Sınırlılıklar

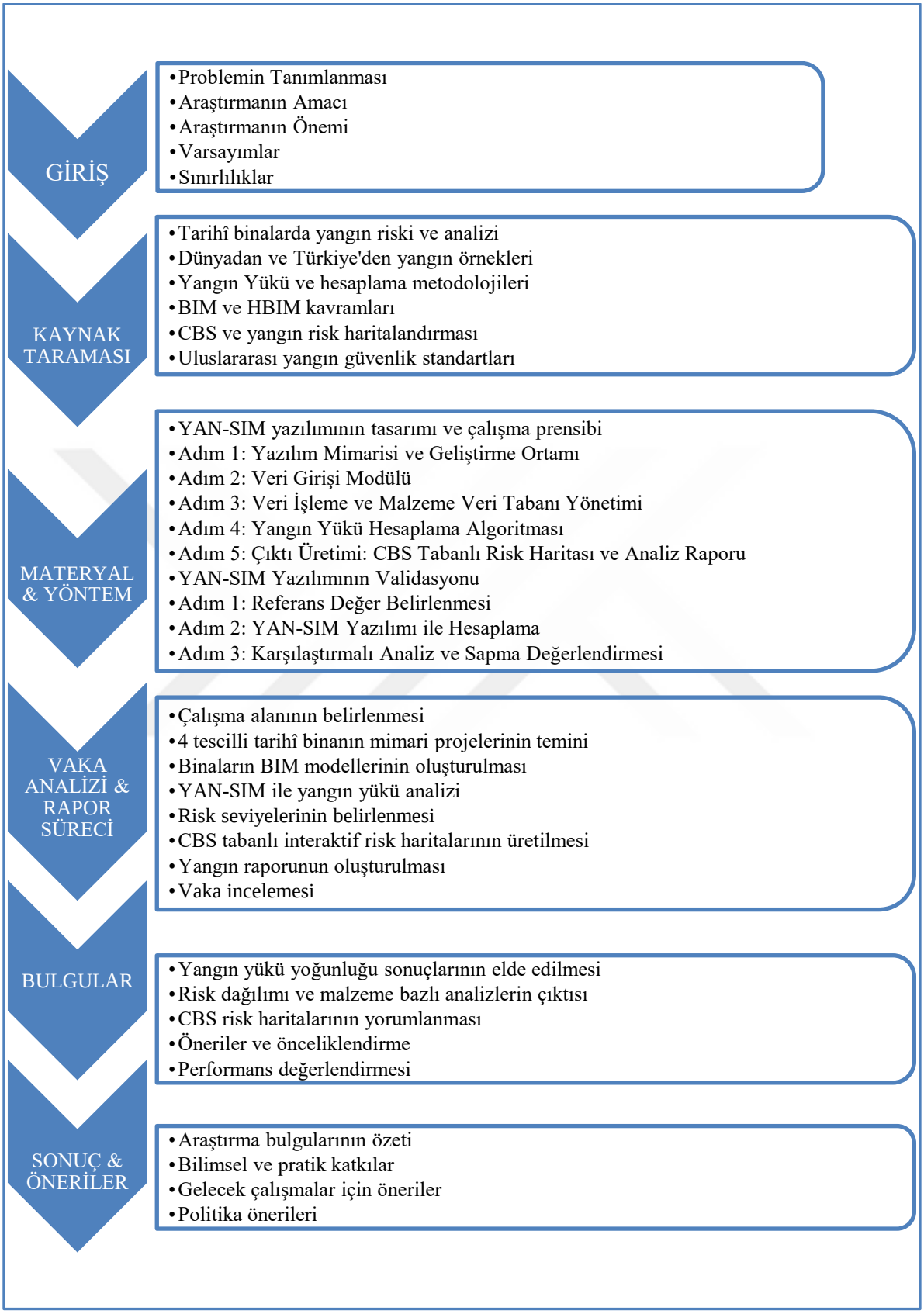
Çalışmada malzeme kapsamı açısından, veri tabanında yer alan malzemeler Türkiye'de yaygın olarak kullanılan geleneksel yapı malzemeleri ile sınırlıdır ve bölgesel malzemelerin deneyimlenmesinde kalibre edilmiş laboratuvar testleri gerekmektedir. BIM modeli gerekliliği açısından, sistemin çalışması için IFC formatında BIM modeli gerekmekte olup henüz modellemesi yapılmamış tarihî binalar öncelikle dokümante edilmelidir. Statik analiz açısından, geliştirilen metodoloji mevcut durum analizine odaklanmış olup Dinamik Yangın Simülasyonları'nı (FDS) içermemektedir. Coğrafi kapsam açısından, CBS entegrasyonu OSM veri tabanındaki bilgilerin kalitesine bağlıdır. Tam ölçekli deneysel malzeme validasyonu zaman kısıtı nedeniyle gerçekleştirilememiş, bunun yerine literatür çapraz doğrulaması ve manuel yöntemlerle karşılaştırmalı analiz yöntemleri uygulanmıştır. Maliyet analizi açısından, önerilen yangın güvenliği tedbirlerinin maliyet-fayda analizi araştırma kapsamı dışında bırakılmış olup gelecek çalışmalarda sanayilerle iş birliği yapılarak maliyet tahmin modülü eklenmesi planlanmaktadır. Örneklem büyüklüğü açısından, vaka çalışmaları Safranbolu Hükûmet Sokak'taki mimari projelerine ulaşılabilen dört tescilli tarihî bina ile sınırlı olup daha geniş örneklem üzerinde test edilmesi gelecek araştırmaların konusudur.

Çalışma kapsamında, risk etmenleri bakımından malzeme esaslı yangın yükü hesaplamaları ve yapısal özellikler ele alınmış, kapsamlı yangın risk değerlendirmesinin diğer bileşenleri (yangın yayılımı, kullanıcı faktörü, çevresel bileşenler vb.) çalışma sınırları dışında bırakılmıştır. İncelenen binalarda bulunan aktif yangın söndürme sistemleri (sprinkler, gaz söndürme sistemleri, yangın dolapları vb.) ve pasif yangın koruma sistemleri (yangın kapıları, yangın duvarları vb.) ile ilgili varlık, etkinlik ve standartlara uygunluk değerlendirmeleri de bu araştırmanın kapsamına dahil edilmemiştir.

Ayrıca, yangın algılama ve uyarı sistemleri (duman dedektörleri, ısı dedektörleri ve manuel alarm butonları), acil aydınlatma ve yönlendirme sistemleri, kaçış yollarının genişliği ve uygunluğu, bina sakinlerinin yangın eğitimine dair seviyeleri ve hazırlık durumları, yangın tatbikatlarının etkinliği, binanın kullanım yoğunluğu ve ziyaretçi profili, itfaiye istasyonlarına olan mesafe ve müdahale zamanları, su kaynaklarının bulunması ve bu kaynakların yeterliliği gibi operasyonel ve organizasyonel faktörler de analiz kapsamının dışında bırakılmıştır. Binaların yangın sigortası kapsamı, bakım-onarım periyotları, geçmiş

restorasyon çalışmaları ve elektrik tesisatının güncelliği gibi idari unsurlar da değerlendirme çerçevesinin dışına alınmıştır. Bu sınırlamalar, araştırmanın malzeme ve yangın odaklı metodolojik yaklaşımının doğası gereği ortaya çıkan bir durumdur; bütüncül yangın güvenliği analizi yapılabilmesi için bu faktörlerin ayrıca detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir.

Çalışmanın metodolojik kurgusu; problemin tanımlanması ve araştırma çerçevesinin oluşturulmasıyla başlayan; literatürdeki kuramsal ve teknik yaklaşımların incelenmesiyle örneklendirilen; malzeme veri tabanı, BIM-CBS entegrasyonuna dayalı analiz süreciyle detaylandırılan ve vaka çalışmaları üzerinden risk değerlendirmesi ile somutlaştırılan bütüncül bir akışa dayanmaktadır. Süreç, elde edilen bulguların yorumlanmasıyla ve teknik-politika odaklı öneriler geliştirilmesiyle tamamlanmaktadır (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Çalışmanın metodolojik akış şeması

2. KAYNAK TARAMASI

Tarihî binalar bir toplumun kültürel kimliğini, mimari mirasını ve kolektif hafızasını somut biçimde temsil ederek insanlık tarihine ve yaşayışlarına ışık tutarlar. Bu bakımdan bu değerlerin korunarak nesiller boyunca güvenle aktarılmaları hayati önem taşımaktadır. Bu yapıların korunmasına yönelik en ciddi tehditlerden biri yangın riskidir. Yangınlar, tarihî binaların fiziksel ve manevî bütünlüğüne büyük zararlar vermekle kalmaz, aynı zamanda içerdikleri arşivlerin kaybına ve toplumsal hafızanın yok olmasına da yol açar. Bu nedenle, ortak mirasımızı korumak için tarihî binalarda yangın riskini ve yangın güvenliğini ele almak zorunludur.

2.1. Tarihî Binalarda Yangın Örnekleri

Bu bölümde uluslararası ve ulusal ölçekte tarihî binalarda meydana gelen yangın örnekleri incelenmiştir.

2.1.1. Dünyadan yangın örnekleri

Tarihî binalarda dünya genelinde meydana gelen yangınlar, ortak risk etmenlerini ve sistematik eksiklikleri ortaya koymaktadır. 1992-2023 yılları arasında dünya genelinde pek çok kültürel miras eserinde yangın meydana gelmiş ve bu vakaların büyük çoğunluğunun restorasyon çalışmaları veya elektrik arızaları sebebiyle gerçekleştiği bilinmektedir. Dünyadaki ve ülkemizdeki yangın vakaları analiz edildiğinde, üç ana risk kategorisi ortaya çıkmaktadır:

1. İnsan faktörü (ihmal, dikkatsizlik, vandalizm vb.)
2. Teknik arızalar (elektrik kaçağı, eskimiş tesisatlar vb.)
3. Yapısal kırılganlıklar (ahşap ağırlıklı yapı, gizli boşluklar, yangın algılama ve uyarı sistemlerinin eksikliği vb.) (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Dünyada meydana gelen tarihî bina yangınları (1992-2023)

No	Tarihî Bina	Yangın Tarihi	Ülke/Şehir	İnşa Yılı	Yapı Tipi	Risk Kategorisi
1	Windsor Castle	20.11.1992	İngiltere/Windsor	1070	Kraliyet Sarayı	Teknik Arıza (Aydınlatma Arızası)
2	Kapellbrücke Köprüsü	18.08.1993	İsviçre/Luzern	1333	Köprü	İnsan Faktörü (Sigara İzmariti)
3	Anna Amalia Kütüphanesi	02.09.2004	Almanya/Weimar	1691	Saray Kütüphanesi	Teknik Arıza (Elektrik kaçağı)
4	Krásna Hôrka Kalesi	10.03.2012	Slovakya/Košice	1320	Kale	İnsan Faktörü (Dikkatsizlik)
5	Glasgow School of Art (1. Yangın)	23.05.2014	İskoçya/Glasgow	1909	Sanat Okulu	İnsan Faktörü (Dikkatsizlik)
6	Brezilya Ulusal Müzesi	02.09.2018	Brezilya/Rio de Janeiro	1818	Müze	Teknik Arıza (Elektrik kaçağı)
7	Glasgow School of Art (2. Yangın)	15.06.2018	İskoçya/Glasgow	1909	Sanat Okulu	Teknik Arıza (Restorasyon)
8	Notre-Dame Katedrali	15.04.2019	Fransa/Paris	1163	Katedral	Teknik Arıza (Restorasyon)
9	Shuri Kalesi	31.10.2019	Japonya/Okinawa	1429	Kraliyet Sarayı	Teknik Arıza (Elektrik kaçağı)
10	Manila Merkez Postanesi	21.05.2023	Filipinler/Manila	1926	Postane	Yapısal Kırılganlık (Kâğıt malzeme)

15 Nisan 2019'da Fransa'nın Paris şehrinde yer alan Notre Dame Katedrali restorasyon çalışmaları esnasındaki bir dikkatsizlik sonucunda yanmış, binanın çatısının büyük bir kısmı ile kulesi çökmüş ve ağır hasar almıştır. Yangın başladığında duman dedektörlerinin ve haberleşme ekiplerinin itfaiye birimlerine geç haber vermesinin yanı sıra mevcut ahşap malzemelerin toz barındırması ve kurumuş olması dolayısıyla yangın kısa sürede büyümüştür. Ayrıca kurşun kaplı kubbenin yüksek ısı nedeniyle delinmesi sonucu içeri oksijen girişinin olması alevlerin artışına sebebiyet vermiştir. Tarihî binanın çatısına hızla yayılan yangın ve söndürmede kullanılan tazyikli su, yapıda yer alan pek çok eseri yok etmiştir. [12]. Benzer şekilde 23 Mayıs 2014'te İngiltere'de bulunan Glasgow Sanat Okulu'ndaki Mackintosh Kütüphanesi'nin bodrum katında bir projeksiyon aletinin ısınması sonucunda çevrede bulunan poliüretan köpüklerin tutuşması sonucu yangın meydana gelmiştir. Tarihî binanın merdiven boşluğundan hızla yayılan alevler ve söndürmede kullanılan tazyikli su, binadaki neredeyse tüm yazılı arşivi yok etmiştir. Alevlerin ve zehirli gazların ahşap duvarların arasından ve binada bulunan yatay/düşey boşluklar aracılığıyla kısa sürede yayılması sonucunda bina ağır hasar almıştır. 15 Haziran 2018'de tarihî bina restorasyon sürecindeyken ikinci kez yanmış ve tamamen çökmüştür [13]. Bu iki yangın örneğinden de anlaşılacağı üzere, restorasyon süreçlerinde alınması gereken yangın güvenlik önlemlerinin kritik öneme sahip olduğu görülmektedir.

2 Eylül 2018'de Brezilya'nın Rio de Janeiro şehrinde bulunan Brezilya Ulusal Müzesi, elektrik kaçağı sebebiyle yanmıştır. Olayda can kaybı yaşanmazken; 12 bin yıllık insan iskeletinin yanı sıra 20 milyondan fazla tarihî eser yok olmuştur. Yangından sonra yapılan incelemelerde bina içerisinde otomatik söndürme ve otomatik yağmurlama sisteminin olmadığı tespit edilmiştir. Yangına müdahale eden ekipler, binanın tepe üzerinde yer alması ve yakınlardaki hidrantların su basıncının yeterli olmayışı sebebiyle yangının büyüdüğünü ifade etmişlerdir. Ayrıca yangından önce duvarların soyulması ve açıkta kalan kabloların mevcudiyeti gibi gözle görülür risk etmenlerinin varlığı belirtilmiştir [14]. 31 Ekim 2019'da Japonya'nın Okinawa şehrindeki Shuri Kalesi, ana binadaki bir elektrik kaçağı nedeniyle yanmıştır. Yangının, gece saatlerinde başlaması ve çok miktarda ahşap malzemenin bulunması yangının hızla yayılmasına neden olmuştur. Olay günü kalede yürütülen festival hazırlıkları sebebiyle elektrikli ekipmanların yoğun kullanımı ve geçici düzeneklerin kurulu olması, yangının çıkış nedenine ilişkin incelemelerde öne çıkan faktörler arasındadır. Ayrıca söndürme ekiplerinin kaleye ulaşımında yaşadığı güçlükler ve iç avlu düzeninin söndürme operasyonunu sınırlaması durumu daha da güçleştirmiştir. Yangın, kalenin ana binası olan Seiden ve çevresindeki altı binayı tamamen yok etmiş, toplam 4.200 m² alan zarar görmüştür [15]. Bu iki yangın vakasından da anlaşılacağı üzere eskimiş elektrik tesisatlarının tarihî binalarda tehdit unsuru olduğu ve yangın güvenliği altyapılarının sürekli güncellenmesi gerektiği görülmektedir. Ayrıca ahşap malzemelerin yoğunlukla kullanıldığı binalarda alevlerin yayılım hızının fazla olması alınması gereken tedbirlerin aciliyetini göstermektedir.

2.1.2. Türkiye'den yangın örnekleri

Türkiye'de tarihî binalarda meydana gelen yangınlar, ahşap malzemenin yangın karşısında oluşturduğu kırılganlığı ve kentsel ölçekte yangın güvenliği altyapısının yetersizliğini ortaya koymaktadır. Çizelge 2.2'de sunulan 2002-2024 yılları arasındaki 10 yangın vakasının analizi, yangınların pek çoğunun teknik arızalardan (özellikle elektrik kaçağı), insan faktöründen ve bilinmeyen nedenlerden kaynaklandığını göstermektedir. Dünya örneklerinde olduğu gibi, Türkiye'deki yangınlarda da eskimiş elektrik tesisatları ve restorasyon süreçlerindeki denetim eksiklikleri öne çıkan ortak risk faktörleri arasındadır (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2. Türkiye'de meydana gelen tarihî bina yangınları (2002-2024)

No	Tarihî Bina	Yangın Tarihi	Ülke/Şehir	İnşa Yılı	Yapı Tipi	Risk Kategorisi
1	Naime Sultan Yalısı (Gazi Osman Paşa Yalısı)	13.07.2002	Türkiye/İstanbul	1876	Yalı	İnsan Faktörü (Dikkatsizlik)
2	Haydarpaşa Tren Garı	28.11.2010	Türkiye/İstanbul	1908	Gar Binası	Teknik Arıza (Elektrik Kaçağı)
3	İbrahim Tevfik Efendi Sahil Sarayı	22.01.2013	Türkiye/İstanbul	1871	Saray/Okul	Teknik Arıza (Elektrik Kaçağı)
4	Fatihpaşa Camii	07.12.2015	Türkiye/Diyarbakır	1516	Cami	İnsan Faktörü (Terör/Saldırı)
5	Emeksizler Evi	26.09.2016	Türkiye/Karabük	1870	Konak	Bilinmeyen sebepler
6	Şakir Kınacı Konağı	02.11.2017	Türkiye/Ankara	1617	Konak	Bilinmeyen sebepler
7	Kadıoğlu Şehzade Konağı	25.07.2020	Türkiye/Karabük	1870	Konak	Teknik Arıza (Elektrik Kaçağı)
8	Vaniköy Camii	15.11.2020	Türkiye/İstanbul	1665	Cami	Teknik Arıza (Elektrik Kaçağı)
9	Muradiye İpek Fabrikası	16.08.2022	Türkiye/Bursa	1930	Fabrika	Bilinmeyen sebepler
10	Çankırı Konak Sanat	16.12.2024	Türkiye/Çankırı	1905	Okul	Teknik Arıza (Elektrik Kaçağı)

28 Kasım 2010 tarihinde Haydarpaşa Garı'nda restorasyon çalışmaları esnasında meydana gelen yangında, çatının denize bakan orta bölümü ile sağ ve sol bölgelerde yer alan küçük çatılar kısa sürede tamamen yanmıştır. Yangının sonrasında çatıya ait metal taşıyıcı elemanlar ile tuğla ve taşla kaplı kısımların yüksek ısıdan dolayı bozulmaya uğradığı tespit edilmiştir. Ayrıca ahşap taşıyıcı ve kaplama elemanları ile üst örtü kaplamaları tamamen kullanılamaz hâle gelmiştir. Yangında yüksek ısı ve duman nedeniyle oluşan tahribatla beraber; söndürme ve soğutma çalışmaları esnasında kullanılan yüksek miktardaki basınçlı suyun da ahşap doğramalar ve döşemelere ciddi şekilde zarar verdiği rapor edilmiştir. Biriken suların rutubet sorunlarının oluşmasına ve özellikle de tavanlardaki kalem işi bezemelere zarar verdikleri tespit edilmiştir. Tüm bunların yanı sıra yangını söndürmede kullanılan deniz suyunun tuzlu olması nedeniyle, suyun donma-çözünme-buharlaşma döngüleri esnasında taş malzemelere zarar verebileceği düşünülmektedir [16].

İbrahim Tevfik Efendi Sahil Sarayı (Galatasaray Üniversitesi binası) 22 Ocak 2013 günü elektrik sisteminin hatalı döşenmiş olması sebebiyle yanmış, binanın ikinci katı ve çatısı alevlerin ve dumanların etkisiyle tamamen yok olmuştur. Söndürme ekipleri yangının civardaki binalara sıçramasını engellemek için hem karadan hem denizden müdahale etmiş, ahşap malzemelerin yoğun kullanıldığı tarihî binada alevler güçlükle söndürülmüştür. Yoğun tazyikli su ile söndürme işlemleri sonucunda yapıda ciddi hasarlar oluşmuştur. Yapılan incelemeler neticesinde ikinci katta başlayan yangın, ahşap duvarların içinden doğal

konveksiyon hareketiyle yükselerek (baca etkisi) çatıya sıçramış, binanın çatı kısmında herhangi algılama ve alarm sistemlerinin yer almaması nedeniyle yangın erken fark edilememiştir [17].

Türkiye'deki tarihî bina yangınları analiz edildiğinde, dünya örnekleriyle benzer risk etmenlerine sahip olmanın yanı sıra, restorasyon süreçlerinde elektrik tesisatı denetimsizliği ve kontrolsüz kullanımı gibi nedenlerin de yangın riskini önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Ayrıca söndürme işlemlerinde kullanılan yüksek basınçlı suyun, tarihî binalardaki ahşap elemanlarda, kalem işi bezemelerde ve taş yüzeylerde kalıcı hasarlara neden olması, tarihî binalara özgü söndürme protokollerin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Özellikle binalarda ahşap malzemelerin yoğun bulunması nedeniyle yangını büyütme ve yayılımını artırma riski, kırılganlık düzeylerinin değerlendirilmesi ihtiyacını ortaya koymaktadır. Bu bakımdan tarihî binalarda yangın riskinin sadece tekil bina ölçeğinde değil bölgesel düzeyde de ele alınması gereklidir. Literatürde tarihî binalarda yangın riskinin nasıl değerlendirildiği, hangi metodolojilerin kullanıldığı ve özellikle malzeme bazlı yangın yükü hesaplamalarının nasıl yapıldığının incelenmesi, bu çalışmanın kavramsal çerçevesinin oluşturulması açısından kritik önem taşımaktadır.

Tarihî binalarda yangın güvenliği söz konusu olduğunda, kültürel mirasın korunması ilkesi ile yangın güvenlik ihtiyaçları arasındaki hassas denge öne çıkmaktadır. Tarihî binalarda yangın güvenliğinin sağlanması, modern binalara kıyasla çok daha karmaşık ve çok boyutlu bir sorun teşkil eder. Bu binaların çoğu, ahşap gibi yüksek yanıcılığa sahip malzemelerle inşa edilmiş; dar ve karmaşık iç mekân düzenine sahip; yangın algılama, söndürme ve tahliye sistemleri açısından yetersiz altyapıyla donatılmıştır. Ayrıca, tarihî binaların özgün karakterinin ve mimari bütünlüğünün korunması ilkesi, modern yangın güvenlik sistemlerinin doğrudan uygulanmasını sınırlandırmaktadır. Bu bağlamda, tarihî binalarda yangın güvenliği yaklaşımları, yalnızca teknik mühendislik çözümlerini değil, aynı zamanda kültürel değerlerin sürdürülebilirliğini de dikkate alan bütüncül stratejiler gerektirmektedir. Bu bağlamda, ulusal ve uluslararası literatür incelendiğinde tarihî binalarda yangın riskinin değerlendirilmesi, yangın yükü hesaplamaları, BIM uygulamaları ve CBS tabanlı risk haritalaması gibi çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu bölümde, tarihî binalarda yangın güvenliği konusunda yapılan güncel çalışmalar incelenmiştir.

Literatür taraması, Web of Science ve Scopus veri tabanlarında "historic buildings", "fire risk", "fire load", "BIM", "HBIM", "GIS", "fire safety", "heritage conservation" anahtar kelimeleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tarama 2010-2025 yılları arasında yayınlanan makaleleri kapsamaktadır. İncelenen çalışmalar; tarihî binalarda yangın örnekleri, yangın riski ve değerlendirme yöntemleri, yangın yükü hesaplama metodolojileri ve yapı malzemelerinin etkileri, yangın modellemesi ve simülasyon, BIM ve HBIM uygulamaları, yangın risk haritalandırması, yangın güvenlik standartları olmak üzere yedi ana başlık altında sınıflandırılmıştır.

Literatür incelemesi sonucunda, tarihî binalarda yangın risk değerlendirmesine yönelik çeşitli metodolojik yaklaşımların geliştirildiği görülmüştür. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri, indeks tabanlı yaklaşımlar, olasılıksal modeller ve makine öğrenmesi uygulamaları bu alanda sıklıkla kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır. Ancak, malzeme bazlı yangın yükü hesaplamalarını BIM teknolojisi ile entegre eden ve CBS platformunda görselleştiren bütünleşik bir sistemin literatürde sınırlı sayıda olduğu tespit edilmiştir. Özellikle geleneksel yapı malzemelerinin yangın davranışlarına ilişkin kapsamlı veri tabanlarının eksikliği ve BIM-CBS entegrasyonunun otomatik risk değerlendirme süreçlerinde yeterince kullanılmadığı belirlenmiştir. Aşağıda, literatürdeki çalışmalar tematik başlıklar altında detaylı olarak ele alınmaktadır.

2.2. Tarihî Binalarda Yangın Riski ve Değerlendirme Yöntemleri

Tarihî binalarda yangın riski, binanın fiziksel özelliklerine, işlevine, çevresel faktörlere ve mevcut güvenlik altyapısına bağlı olarak değişebilmektedir. Bu riskin değerlendirilmesi hem potansiyel yangın tehlikesinin büyüklüğünü hem de yangının olası sonuçlarını belirleme açısından önemlidir. Literatürde yangın risk değerlendirmesi için geliştirilen metodolojiler, nicel ve nitel yaklaşımlar olmak üzere iki ana kategoride sınıflandırılabilir. Nicel yöntemler, matematiksel modelleme ve istatistiksel analizlere dayalı olarak riskin sayısal olarak ifade edilmesini sağlarken; nitel yöntemler, uzman değerlendirmesi ve gözleme dayalı olarak riskin tanımlanmasına odaklanmaktadır.

ÇKKV yöntemleri, yangın riskini etkileyen çok sayıda faktörü hiyerarşik veya ağırlıklı bir yapı içerisinde değerlendirerek karar vericilere çerçeve sunmaktadır. İndeks tabanlı yaklaşımlar, belirli göstergelere dayalı olarak yangın riskini puanlama ve sınıflandırma

yoluyla önceliklendirme yapmayı mümkün kılmaktadır. Olasılıksal ve istatistiksel yöntemler, belirsizlikleri dikkate alarak yangın senaryolarının ve sonuçlarının olasılıklarını hesaplamaktadır. Makine öğrenmesi yaklaşımları, büyük veri setlerinden öğrenme yoluyla yangın riskini tahmin etme kapasitesi sunmaktadır. Dinamik risk değerlendirme yöntemleri ise zaman içinde değişen koşulları ve müdahalelerin etkilerini sürekli olarak izlemeye olanak tanımaktadır. Yangın önleme yaklaşımları ise riskin kaynağında kontrol edilmesine odaklanarak önlemler geliştirmektedir.

2.2.1. Çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımı

Kee vd. [18], Nan'an Bölgesi'ndeki 20. yüzyıla ait dağlık alan yerleşimlerinde bulunan tarihî binaların yangın güvenlik risklerini Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemiyle değerlendirmiştir. Araştırma, coğrafi konumlanma, çevresel koşullar ve yangın güvenliği altyapısı arasındaki etkileşimin kültürel mirasın özgünlüğünü koruma ile modern güvenlik önlemlerinin uygulanması arasındaki gerilimi artırdığını göstermektedir. Alan verileriyle desteklenen model, kritik zafiyet faktörlerini önceliklendirmiş ve bölgeye özgü iyileştirme stratejileri geliştirilmesini mümkün kılmıştır. Çalışma, AHP yaklaşımının kültürel miras yapılarında yangın riskinin sistematik olarak nicel değerlendirilmesinde etkili bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.

Li vd. [19], tuğla–ahşap malzemeli geleneksel konut yapılarını yangın riskine karşı değerlendirmek için Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (FAHP) ve Entropi Ağırlık Yöntemi (EWM) tabanlı bir sistem geliştirmiştir. Araştırma, Guangdong, He Xinwu yapı kompleksini örneklem olarak almış; insan ve tesis faktörleri, çevresel etmenler ve sosyal yönetim etmenleri ile yirmi alt göstergeden oluşan bir değerlendirme sistemi kurmuştur. Sonuçlar, insan hatası ve sosyal yönetim eksikliklerinin yangın riskini en çok etkileyen etmenler olduğunu göstermiştir. Ayrıca, malzeme yanıcılığı, erken müdahale kapasitesi ve elektrik kullanımı gibi alt göstergeler kritik olarak belirlenmiş; geleneksel yapıların yüksek katlı binalarla karşılaştırılması ile kültürel mirasın yangından korunmasına yönelik politika önerileri sunmuşlardır.

2.2.2. Nitel risk analizi yaklaşımı

Yaman ve Kurtay [20], İzmir'deki tarihî Bıçakçı Han ve Yıldız Sineması örnekleri üzerinden nitel analiz yöntemi kullanarak tarihî binalarda yangın güvenliği stratejilerini incelemiştir. Türkiye Binaların Yangından Korunması Hakkındaki Yönetmeliği esas alınarak yapılan değerlendirmede, mevcut düzenlemelerin tarihî yapıların özgün kırılganlıklarını tam olarak karşılayamadığı belirtilmiştir. Çalışma, kullanıcı güvenliği ile mimari özgünlüğün korunması arasındaki dengeyi vurgulayarak pasif önlemler ve düşük müdahale gerektiren çözümlerin önemini öne çıkarmaktadır. Ayrıca, performansa dayalı ve disiplinler arası yaklaşımların benimsenmesinin tarihî yapılarda hem kültürel sürekliliği hem de yangın dirençliliğini artıracağı önerilmektedir.

Jaďuďová vd. [21], Slovakya'daki üç tarihî binanın yangın güvenliği durumunu kriz yönetimi yaklaşımıyla değerlendirmiştir. Görsel inceleme, mevcut yangın belgelerinin analizi ve yasal düzenlemelerle karşılaştırmaya dayanan çalışmada, seçilen yapılara yönelik yangın riskleri ve yangından korunma önlemleri nitel yöntemle analiz edilmiştir. Bulgular, kentsel konumda yer alan Kežmarok Kalesi'nin düşük risk düzeyine sahip olduğunu; buna karşılık, ormanlık alanlara komşu ve karmaşık tahliye koşulları bulunan Trenčín ve Stará Ľubovňa kalelerinin daha yüksek yangın riski taşıdığını göstermektedir. Çalışma, dış çevresel tehditler, eski elektrik tesisatları, kültürel etkinliklerde açık alev kullanımı ve yanıcı malzemelerin yoğunluğu gibi faktörlerin tarihî yapıların yangın güvenliğinde savunmasız olduğunu vurgulamaktadır.

2.2.3. İndeks tabanlı yaklaşım

Arborea vd. [22], İtalya'daki kültürel miras yapılarında yangın riskini azaltmak için indeks tabanlı (gösterge temelli) sistematik bir metodoloji yürütmüştür. Çalışmanın temel amacı, kültürel mirasın korunmasına yönelik yangın güvenliği stratejilerini belirlemek üzere nicel bir risk değerlendirme aracı üretmektir. Araştırmacılar, risk seviyelerini yapısal, çevresel, organizasyonel ve yangın yükü gibi çeşitli boyutlarda değerlendiren bir dizi göstergeyi formüle etmiştir. Bu göstergeler, sahadan elde edilen verilerle birleştirilerek, her bir tarihî binanın potansiyel yangın tehlikesini ve risk düzeyini belirleyen risk indeksi hesaplanmasına olanak tanır. Elde edilen indeks değerleri, kaynakların tahsis edilmesinde ve en yüksek risk taşıyan binalara öncelik verilmesinde karar vericilere bilimsel bir temel sunarak, yangın risk

yönetiminin etkinliğini artırmayı hedeflemektedir. Bu metodoloji, özellikle kısıtlı bütçelerle çalışan koruma kurumları için somut ve uygulanabilir bir önceliklendirme aracı olarak öne çıkmaktadır.

Minervino vd. [23], farklı yasal düzenlemeleri referans alarak inşa edilmiş tarihî binalarda yangın güvenliği analizlerinin tutarlılığını geliştirmek amacıyla mevzuattan bağımsız bir risk değerlendirme yöntemi önermektedir. CEPI (Yangın Tehlikesini Kademeli Hesaplama) adı verilen bu yöntem, yerel yönetmelik farklılıklarından kaynaklanan uyumsuzlukların azaltılmasını hedefleyerek, uygulayıcılara tarihî binaların yangın riskini değerlendirmede pratik ve erişilebilir bir araç sunmaktadır. Böylece çalışma, Brezilya'daki kültürel miras yapılarına yönelik yangın güvenliği analizlerinin standardizasyonuna katkı sağlamaktadır.

Salazar vd. [24], tarihî binaların yangın riskini değerlendirmek için gösterge tabanlı yöntemleri incelemiş ve mevcut yaklaşımların avantaj ve sınırlılıklarını ortaya koymuştur. Çalışma, farklı ülkelerde geçerli standartlara dayanan mevcut yöntemlerin tarihî binalar için her zaman uygun olmadığını vurgulamış; 22 adet kırılganlık göstergesini dört kategori altında gruplandırarak tarihî binalara özgü indeks tabanlı bir yangın risk değerlendirme metodolojisi geliştirme olanağı sunmuştur. Ayrıca tarihî binaların yangına karşı kırılganlık düzeyine göre sınıflandırılmasını önererek, risk analizinin sistematik ve esnek bir biçimde yapılabilmesine katkı sağlamıştır.

2.2.4. Olasılıksal ve istatistiksel yaklaşım

Garcia-Castillo vd. [25], tarihî binaların ahşap döşeme sistemlerinde yangın performansını değerlendirmeye yönelik olasılıksal bir yaklaşım geliştirmiştir. Malzeme özelliklerinin belirsizliği nedeniyle geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda performansa dayalı bu metodoloji; malzeme yoğunluğu, mekanik davranış ve sıcaklık etkileri gibi değişkenleri içeren kapsamlı sayısal analizlere dayanmıştır. Elde edilen yangın kırılganlık fonksiyonları ve güvenilirlik indeksleri, incelenen birçok tarihî sistemin yeterli yangın dayanımına sahip olduğunu göstermiştir. Yöntem, tarihî ve güncel ahşap yapıların özgünlüğünü koruyarak güvenli şekilde değerlendirilmesine ve tasarlanmasına katkı sağlamaktadır.

Petrini vd. [26], İtalya'daki Modena Katedrali (Duomo) örneğinde tarihî binalarda yapısal yangın riskini performansa dayalı mühendislik yaklaşımıyla incelemiştir. Olay ağacı yöntemi ile yangın risk analizi yapmış, sayısal termo-akışkan dinamiği modelleri ile yangın dinamikleri, ileri doğrusal olmayan termomekanik sonlu eleman modelleri ile yapısal davranışları değerlendirmiştir. Sonuçları, yangın nedeniyle farklı hasar seviyelerinin oluşma olasılıklarını sabit geri dönüş periyodu bağlamında gösteren risk eğrileri olarak sunmuş ve diğer tehlikeler için kullanılan olasılıksal performansa dayalı mühendislik çerçeveleriyle uyumlu hale getirmiştir.

Chen vd. [27], ahşap bileşenleriyle yüksek yangın riskine sahip tarihî binalar için Bayes Ağları (BN) tabanlı bir yangın risk değerlendirme modeli geliştirmiştir. Model, yapı parametreleri ve kültürel önemi gibi statik göstergeler ile çevresel etmenler gibi dinamik göstergeleri birleştirmekte ve Koşullu Olasılık Tabloları (CPT) hesaplama karmaşıklığını tarihî veriler, uzman bilgisi ve ampirik formüllerle azaltmaktadır. Nanyue Tapınağı örneği üzerinden yapılan uygulama, modelin yangın gelişimi ve yayılımını öngörmede, riskin değerlendirilmesinde ve kritik etmenlerin belirlenmesinde etkinliğini göstermiştir. Ayrıca değişken ağırlık sentezi yöntemi, acil durum ve sıra dışı senaryolarda BN'nin mantıksal doğruluğunu artırmaktadır.

2.2.5. Makine öğrenmesi yaklaşımı

Lei vd. [28], tarihî ahşap binaların yangın risklerini tahmin etmek amacıyla makine öğrenmesi tabanlı bir yöntem geliştirmiştir. Yangın risk indeksine dayalı bu sistem, ahşap tarihî binaların özgün özelliklerini dikkate alarak göstergeleri zamansal, mekânsal ve niteliksel ölçekte işlemektedir. Entropi ağırlıklı TOPSIS ile geçmiş yangın verilerinin belirsizliği azaltılarak risk düzeyleri belirlenmiş ve XGBoost modeli kullanılarak tek bir yapının aylık yangın riski tahmin edilmiştir. Çin'deki Saray Müzesi örneğinde 2019 yılı için yapılan değerlendirme, XGBoost'un diğer modellerden (GBDT, CatBoost, Adaboost, SVM) daha yüksek doğruluk sağladığını göstermiştir. Bu yaklaşımın, tarihî binaların yangın güvenliği denetimlerinde karar destek aracı olarak kullanılabileceği düşünülmektedir.

2.2.6. Dinamik risk değerlendirme yaklaşımı

Liao, Zhuo ve Tao [29], Güney Çin'in dağlık bölgelerinde yer alan kompakt ve ahşap yapılardan oluşan tarihî köylerin yüksek yangın riski taşıdığını belirterek, mühendislik temelli FRAME yöntemini geliştirip dinamik bir yangın risk değerlendirme modeli önermektedir. Bu model, genel ve bölgesel göstergeleri dengeleyerek değerlendirme endekslerini uyarlamakta ve "değerlendirme–müdahale–yeniden değerlendirme" döngüsü üzerinden performansa dayalı tasarım ile yönetmelik esaslı yaklaşımlar arasında köprü kurmaktadır. Xiaozhai Köyü'nde yapılan uygulama, yapı yakınlığı, geleneksel alışkanlıklar ve yangın koruma yerleşimi gibi etmenlerin yangın riskinde belirleyici olduğunu göstermiştir. Çalışma, benzer nitelikteki tarihî yerleşimlerde sürdürülebilir yangın güvenliği stratejilerinin geliştirilmesi açısından önemli bir metodolojik katkı sunmaktadır.

2.2.7. Yangın önleme yaklaşımı

Kincaid [30], tarihî binalarda yangın önleme stratejilerini inceleyerek, risk temelli yaklaşımın ve yapı özelinde önlemlerin önemini vurgulamaktadır. Çalışma, yangın kaynaklarını ve olası kayıpları değerlendirerek, gündelik gözetim, iyi bakım uygulamaları, inşaat faaliyetleri ve özel etkinliklerde dikkat gibi proaktif önlemleri öne çıkarmaktadır. Ayrıca yangın önlemlerinin tek başına yeterli olmadığı, bütüncül bir yaklaşımın gerektiği; mevcut yangın koruma sistemlerinin iyileştirilmesi ve acil durum planlarının güncellenmesinin zorunlu olduğu belirtilmiştir.

Huang vd. [31] bu çalışmada, Makao'daki endüstriyel miras yapılarında yangın güvenliği yaklaşımlarının tarihsel evrimini ve sürdürülebilir teknolojik çözümlerini incelemektedir. Literatür analizi, saha araştırmaları ve mekânsal bilgi görselleştirme yöntemleriyle gerçekleştirilen araştırma, yangından korunmanın pasif önlemlerden aktif sistemlere doğru üç aşamalı bir gelişim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Artan yangın yükünün kırılganlığı önemli ölçüde yükselttiği, koruma odağının afet kapsamını sınırlamaktan risk azaltımına yöneldiği belirlenmiştir. Çalışma, karmaşık kültürel miras bağlamlarında yeniden işlevlendirme süreçlerine uygun ekolojik yangın koruma modellerinin geliştirilmesine yönelik stratejik öneriler sunmaktadır.

2.3. Yangın Yükü Hesaplama Metodolojileri ve Yapı Malzemelerinin Etkileri

Su vd. [32], Japon tarzı ahşap tarihî binalardaki hareketli yangın yüklerini ve yanıcı malzeme özelliklerini incelemiştir. 21 bina ve 102 odayı kapsayan saha çalışmaları ile toplam 2235,06 m^2 alan ölçülmüştür. Yangın yükü yoğunluğu ile mekân alanı ve kullanım türü arasında güçlü ilişkiler bulunmuştur. Oda kullanımına göre hareketli yangın yükü yoğunluğu en yüksekten en düşüğe sırasıyla depo, çalışma odası, yatak odası, oturma odası ve yemek odası olarak tespit edilmiştir. Çalışma, tarihî binalarda yangın mühendisliği tasarımına güvenilir veri sağlamaktadır.

Wang, Lo ve Lai [33], tarihî binalar için yangın risk değerlendirmesi ve acil durum kaçış planlaması konusunda CBS kullanan entegre bir çerçeve sunmaktadır. Araştırmanın temel amacı, geleneksel yöntemlerin aksine, risk değerlendirmesini ve tahliye/müdahale planlamasını mekânsal ve dinamik verilerle birleştirerek daha etkin bir güvenlik yaklaşımı sağlamaktır. Geliştirilen bu model, tarihî binaların karmaşık yapısal özelliklerini, mevcut yangın koruma sistemlerini ve itfaiye erişim noktalarını CBS ortamına aktarır. Bu entegrasyon sayesinde, potansiyel yangın senaryolarına dayalı risk haritaları oluşturulabilirken, aynı zamanda en hızlı ve güvenli tahliye güzergahları ve müdahale yolları hesaplanabilmektedir. Çalışma, CBS'nin güçlü analiz yeteneklerinin, özellikle yapısal değişikliklerin zor olduğu tarihî binalarda, yangın risk yönetiminin proaktif ve optimize edilmiş bir şekilde yürütülmesinde kritik bir araç olduğunu bilimsel olarak ortaya koymaktadır.

Hu vd. [34], Çin tarihî binalarında yaygın olarak kullanılan yanıcı malzemelerin alevlenme ve yangın yayılma davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada hem doğal lif hem de sentetik malzemeler, standart ve gerçek boyut örnekler üzerinden test edilmiştir. Sonuçlar, doğal malzemelerin kolay tutuştuğunu ve hızlı yandığını, bazı sentetiklerin ise yüksek ısı salımı ve damlama ile alev yayılımına katkıda bulunduğunu göstermiştir. Bu bulgular, Çin tarihî binalarını yangın açısından değerlendirirken malzeme bazlı risklerin belirlenmesine ve kültürel mirasın korunmasına yönelik referans sağlamaktadır.

Wu vd. [35], Huizhou geleneksel konutlarındaki yangın duvarlarının yangın performansını incelemiştir. FDS tabanlı 3D simülasyonlar ile farklı tipteki duvarların rüzgâr hızı, yapı mesafesi ve yüksekliği gibi parametreler altındaki performansları değerlendirilmiştir.

Bulgular, tek saçaklı duvarların yangın başlangıcında daha etkili, beş saçaklı duvarların ise yangının orta ve geç evrelerinde daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, rüzgâr hızı, yapı mesafesi ve yüksekliğin yangın performansını farklı biçimde etkilediği, uygun yüksekliğin ve mesafenin performansı artırdığı belirlenmiştir. Çalışma, Huizhou geleneksel yapıların yangın güvenliğini artırmak için gelecekteki koruma, optimizasyon ve dönüşüm çalışmalarına rehberlik etmektedir.

2.4. Yangın Modellemesi ve Simülasyon

Guibaud vd. [36], 2019'da Notre-Dame Katedrali'ndeki yangının tarihî binaya etkilerini inceleyerek yangın güvenliği modellemesinin doğrulanmasına katkı sağlamıştır. Araştırmada, Lutetian kireçtaşı kullanılmış bir kemer üzerindeki ısıl bozulmalar deneysel olarak takip edilmiş ve yangının çatı alanındaki gelişimi sayısal simülasyonlarla yeniden üretilmiştir. FDS kullanılarak gerçekleştirilen modeller, malzeme, geometrik yapı ve ölçek gibi parametreler göz önünde bulundurularak doğrulanmış; bu sayede tarihî binalarda yangın risk değerlendirmesinde sayısal araçların geçerliliği ve hassasiyet analizlerinin önemi vurgulanmıştır. Çalışma, karmaşık ve kontrolsüz tarihî bina konfigürasyonlarında modelleme yaklaşımının güvenilirliğini artırmayı hedeflemektedir.

D'Orazio vd. [37], tarihî kamu binalarında, koruma ilkeleri ile yangın güvenliği gereklilikleri arasındaki dengeyi kurmada dijital teknolojilerin rolünü incelemektedir. "Omero Müzesi" (Ancona, İtalya) örneği üzerinden gerçekleştirilen araştırmada, hızlı kurulum temelli, genel amaçlı bir tahliye simülatörünün geçerliliği tam ölçekli bir tatbikatla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Literatüre dayalı olarak modellenen farklı kullanıcı profillerinin simülasyon sonuçları ile gerçek uygulama verileri arasındaki uyumun yüksek olduğu görülmüş; böylece bu yaklaşımın tarihî binalarda güvenilir bir tahliye değerlendirme aracı olarak kullanılabileceği doğrulanmıştır. Çalışma, simülatörün Sanal Gerçeklik (VR) ve BIM gibi diğer dijital sistemlerle entegrasyonunun, savunmasız kullanıcıların bulunduğu kültürel miras yapılarında yangın risk yönetimine önemli katkılar sunacağını vurgulamaktadır.

2.5. BIM ve HBIM Uygulamaları

Qiao vd. [38], tarihî binaların korunmasını tehdit eden çok yönlü yangın risklerine karşı kapsamlı ve sayısallaştırılmış bir değerlendirme yaklaşımı geliştirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada Tarihî Yapı Bilgi Modelleme HBIM ve CBS'nin entegrasyonuna dayalı, otomatik yangın risk değerlendirmesi yapabilen bir çerçeve sunulmuştur. Önerilen yöntem; yangın güvenliği mevzuatına uygun göstergelerle hem yapının içsel özelliklerini (ör. yangına dayanım sınıfı) hem de çevresel faktörleri (ör. bina ayrımı, erişilebilirlik) nicel olarak hesaplamaktadır. Macau'daki Mandarin's House üzerinde gerçekleştirilen uygulamada, çerçevenin yangın risk bileşenlerini hesaplayabildiği ve etkileşimli görselleştirme sağlayarak karar süreçlerini desteklediği görülmüştür. Böylece Yapı Bilgi Modelleme (BIM) ve CBS tabanlı birleşik yaklaşımın kültürel miras yapılarına yönelik proaktif yangın güvenliği yönetimine katkı sunduğu ortaya konulmuştur.

González vd. [39], HBIM yaklaşımının afet sonrası yangın senaryolarında tarihî binaların iyileştirilmesi ve korunmasındaki potansiyelini incelemiştir. 2018'deki büyük yangın sonrası Brezilya Ulusal Müzesi'nin yeniden toparlanma süreci üzerinden yürütülen çalışma, belgeleme, yerinde analizler, 3D modelleme ve disiplinler arası iş birliğini içermektedir. Bulgular, HBIM'in hasar değerlendirmesinde doğruluğu artırarak karar verme süreçlerini geliştirdiğini ve yeniden inşa planlamasında daha sistematik bir yaklaşım sağladığını göstermektedir. Araştırma, HBIM'in yalnızca koruma projelerinde değil, afet sonrası kriz yönetiminde de yenilikçi ve stratejik bir araç olarak kullanılabileceğini vurgulamaktadır.

Frosini vd. [40], İtalya'daki tarihî binaların yangın riskini yönetmek için HBIM tabanlı bir metodolojik yaklaşım önermektedir. Çalışma, tarihî binalarda analiz, tasarım ve yangın yönetimi süreçlerini otomatikleştirmek için üç boyutlu modelleme ve parametrik nesnelerle bilgi ilişkilendirme yöntemlerini kullanmaktadır. Önerilen iş akışı, BIM programları ile yangın güvenliği yazılımları arasında IFC dosya değişimi aracılığıyla en iyi uygulamaların sağlanmasını hedeflemektedir. Floransa'daki Hava Harp Okulu örnek olayında uygulanan yöntem, geleneksel yangın önleme analizleri ile otomatik prosedür verilerini karşılaştırarak doğrulanmıştır. Sonuçlar, tarihî binalarda yangın güvenliğinin performansa dayalı bir yaklaşım ile yönetilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

2.6. Yangın Risk Haritalandırması

Wang vd. [41], kalabalık metro ortamlarında yolcu eşyalarından kaynaklanan yangınların tehlikesini analiz etmeyi amaçlamıştır. Geliştirilen model, yolcu akışını ve bu akış içindeki yanıcı yüklerin mekânsal dağılımını dinamik olarak simüle edebilmekte, böylece yangın riskinin coğrafi olarak nerelerde yoğunlaştığını yüksek çözünürlüklü bir şekilde haritalayabilmektedir. Bu haritalama, sadece statik yapısal riskleri değil, aynı zamanda dinamik yolcu yoğunluğunun ve taşıdıkları yükün (örneğin bagaj veya kişisel eşyalar) getirdiği anlık tehlikeleri de dikkate almaktadır. Elde edilen risk haritaları, metro operatörlerine ve güvenlik yöneticilerine, yangın önleme kaynaklarını (gözetim, söndürme ekipmanı, eğitimli personel) en çok ihtiyaç duyulan istasyon veya platform alanlarına odaklamaları için bilimsel bir dayanak sunmaktadır. Bu yaklaşım, karmaşık kentsel altyapı sistemlerinde risk değerlendirmesinin ve acil durum planlamasının optimize edilmesine katkıda bulunmaktadır.

Baquedano-Juliá vd. [42], tarihî alanlarda çoklu riskin yönetilmesine yönelik göstergelere dayalı bir kırılganlık değerlendirme yaklaşımı geliştirmiştir. Çalışma, Portekiz'in Guimarães Tarihî Kent Merkezi'nde sel ve yangın tehlikelerine ilişkin maruziyet ve duyarlılık göstergelerini analiz ederek az/çok tehlikeli zafiyet yapısını ortaya koymuştur. Farklı dönemlerde sahadan toplanan verilerin bütüncül yorumlanması ve CBS ile haritalandırılması, risk sonuçlarının daha anlaşılır ve karar süreçlerine doğrudan katkı verecek biçimde sunulmasını sağlamaktadır. Bu kapsamda çalışma, tarihî alanlarda etkili ve maliyet etkin risk azaltma stratejilerinin geliştirilmesi için önemli bir metodolojik çerçeve sunmaktadır.

Tikhonova, Romão ve Salazar [43], tarihî binalarda yangın risk yönetimini iyileştirmek için CBS tabanlı bir iş akışı önermiştir. Çalışma, veri toplama, değerlendirme, haritalama ve ayrıca programlama dili kullanımıyla veri işleme sürecini entegre ederek 269 binayı kapsayan Guimarães tarihî merkezi örneğinde uygulanmıştır. Sonuçlar, CBS tabanlı yaklaşımın kültürel miras yapılarını yangın kırılganlığı açısından hızlı ve etkili bir şekilde değerlendirmeye imkân sağladığını göstermektedir.

Juliá, Ferreira ve Rodrigues [44], deprem sonrası yangın riskine ilişkin sınırlı çalışmalara dikkat çekerek, Leiria Tarihî Kent Merkezi'nde senaryo tabanlı bir analiz gerçekleştirmiştir.

Çalışmada iki farklı sismik kırılganlık endeksi yöntemi kullanılarak olası hasar senaryoları üretilmiş, ardından risk matrisi aracılığıyla deprem sonrası yangın başlatma olasılığı yüksek binalar belirlenmiştir. Ayrıca, yangın yayılımı ve müdahale koşulları, erişilebilirlik faktörleriyle birlikte CBS üzerinden değerlendirilmiştir. Bulgular, IEMS-98 VIII şiddetindeki bir deprem senaryosunda yapıların yaklaşık %33'ünün orta ya da yüksek düzeyde deprem kaynaklı yangın riski taşıdığını göstermektedir. Bu çalışma, tarihî kentsel alanlarda çoklu afet risklerinin bütüncül biçimde değerlendirilmesine yönelik önemli bir metodolojik katkı sunmaktadır.

Silva, Rodrigues ve Ferreira [45], Portekiz'in Aveiro tarihî kent merkezinde yangın riskinin değerlendirilmesi ve azaltılmasına yönelik bir çalışma yürütmüştür. Araştırma, mevcut yönetmeliklerin tarihî dokulara tam olarak uygulanamamasından kaynaklanan güvenlik açıklarını ele almakta ve bu tür alanlar için sadeleştirilmiş bir yangın risk değerlendirme yöntemini önermektedir. Alan çalışmalarıyla elde edilen veriler CBS aracılığıyla haritalandırılmış ve yapıların yaklaşık %63'ünün kabul edilebilir sınırların üzerinde bir yangın riski taşıdığı belirlenmiştir. Çalışma ayrıca, benzer özelliklere sahip tarihî kentlerle karşılaştırmalı analizler yaparak farklı risk azaltma stratejilerinin etkinliğini tartışmaktadır.

Tozo Neto ve Ferreira [46], tarihî kent merkezlerinde yangın riski ve kırılganlığın değerlendirilmesi ile azaltılmasına yönelik maliyet-fayda temelli bir analiz sunmaktadır. Çalışma, Portekiz'in Guimarães Tarihî Merkezi'nde 269 yapının yangın güvenliği durumunu inceleyerek Fire Risk Index (FRI) gibi tarihî binalar için özel geliştirilmiş yöntemlerin uygulanabilirliğini tartışmaktadır. CBS destekli analizler, yapıların %67'sinin orta-yüksek yangın riski taşıdığını göstermiş; önerilen müdahale stratejilerinin ortalama 28,48 €/m² maliyetle bu oranı %1'e düşürdüğü ve yönetmeliklere uyumlu yapı oranını %6'dan %58'e çıkardığı belirlenmiştir. Bulgular, yangın güvenliği müdahalelerinin tarihî dokunun korunmasıyla dengelenebileceğini ve ekonomik açıdan uygulanabilir risk azaltma senaryoları geliştirilebileceğini göstermektedir.

Granda ve Ferreira [47], Ekvador'un Quito şehrindeki tarihî merkezde büyük ölçekli yangın riskini değerlendirmiştir. Çalışma, yüksek kültürel değere sahip ancak fiziksel olarak kırılgan olan büyük tarihî alanlarda risk yönetimi ve azaltma stratejilerinin önemini vurgular. Yangın kırılganlığı ve risk değerlendirmesi, mahalle ölçeğinde basitleştirilmiş yöntemlerle yapılmış ve sonuçlar CBS aracılığıyla görselleştirilmiştir. Haritalar, önceden mevcut

kırılganlık verileri ile birleştirilerek risk azaltma önceliklerinin ve hedeflerinin belirlenmesine imkân sağlamıştır.

Palazzi vd. [48], Şili'nin Santiago Yungay mahallesindeki tarihî dokuya ait binaların yangın riskini değerlendirmiştir. Araştırmada, 2016–2021 yılları arasında meydana gelen 21 yangın örneği dikkate alınarak 443 geleneksel taş ve tuğla malzemeli yapı FRI yöntemiyle analiz edilmiştir. Çalışma, yangın başlangıcı, yayılma, tahliye ve müdahale aşamalarına ilişkin risk faktörlerini belirleyerek CBS aracılığıyla haritalandırmıştır. Sonuçlar, tarihî kentsel alanların büyük ölçekli yangın risklerinin anlaşılması ve Latin Amerika'daki benzer bölgelerde risk azaltma stratejilerinin geliştirilmesi için temel sağlamaktadır.

Li ve Deliberty [49], Çin'in güneybatısındaki yerli topluluklarda afet risk azaltımı ve kültürel mirasın korunması amacıyla CBS, drone görüntüleri ve katılımcı yöntemleri birleştirerek kapsamlı bir veri seti oluşturmuştur. Profesyonel ölçüm araçlarının ve yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinin bulunmadığı bölgelerde yürütülen çalışma, yerel halkın konut yangını riski, tarihî binaların korunma durumu ve turizm potansiyeli gibi konularda farkındalığını artırmayı hedeflemektedir. Elde edilen haritalar, bu topluluklarda afet önleme, ekonomik planlama ve kültürel sürdürülebilirlik açısından dayanıklılığı güçlendiren önemli bir araç olarak sunulmaktadır.

2.7. Yangın Güvenlik Standartları

UNESCO'ya göre; "Dünya'daki pek çok kültürel mirasa ait afet risklerini azaltmaya yönelik herhangi bir politika, plan veya süreç bulunmamaktadır [50]. Dolayısıyla çoğu eser, büyük ölçüde potansiyel tehlikelere maruz kalmaktadır. Bu tehlikelerden biri de hiç şüphesiz yangınlardır. Tarihî binalarda yangın güvenliğinin en önemli basamağı, yangının çıkmasını engellemek için gerekli tedbirlerin alınmasıdır [51]. Bu bakımdan istenilen en olası senaryo, yangının hiç başlamamasıdır. Eğer yangın başlamışsa; yangının başladığının hızlı şekilde duyurulması ve büyümesinin engellenmesi gerekir. Yangın büyümüşse, yangının başka mahallere sıçramaması hedeflenerek en az hasar ile atlatılması istenir. Bu çerçevede yangına müdahale üç ana başlık altında toplanabilir.

- Yangının önlenmesi,
- Yangının olası sonuçlarından korunma,

- Yangını söndürme ve kontrol altına alma amacıyla mücadele.

Tarihî binalarda yangın güvenliğini sağlarken, kültürel mirasın korunması ilkeleri ile modern yangın güvenlik gereksinimlerinin dengelenmesi elzemdir. Bu bağlamda, uluslararası ve ulusal düzeyde geliştirilen standartlar, tarihî binalarda yangın yükünün hesaplanması, yangın riskinin değerlendirilmesi ve yangından korunma tedbirlerinin belirlenmesi için referans oluşturmaktadır. Literatür incelendiğinde, tarihî binalara özgü yangın güvenlik yaklaşımlarının hem koruma ilkelerini hem de performansa dayalı mühendislik çözümlerini kapsadığı görülmektedir. Aşağıda, tarihî binalarda yangın güvenliğine yönelik uluslararası standartlar (NFPA 909, NFPA 914, Eurocode 1, RSCIEI, BS 9999, CFPA-E) ile Türkiye'deki düzenlemeler (BYKHY ve TS EN 1991-1-2) detaylı olarak incelenmekte ve özellikle malzeme bazlı yangın yükü hesaplama metodolojileri ile risk sınıflandırma sistemleri üzerinde durulmaktadır.

2.7.1. Uluslararası yangın güvenlik standartları

Tarihî binalarda yangın güvenliğinin sağlanması, kültürel mirasın korunması ilkeleri ile modern güvenlik gereksinimlerinin dengelenmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda, uluslararası düzeyde geliştirilen standartlar, yangın yükü hesaplama metodolojileri, risk sınıflandırma sistemleri ve koruma tedbirlerinin belirlenmesi konularında sistematik çerçeveler sunmaktadır. Aşağıda, tarihî yapıların yangın güvenliği değerlendirmesinde referans alınan başlıca uluslararası standartlar incelenmektedir.

<u>NFPA 909: Kültürel miras yapılarının korunması kodu</u>

Amerika Birleşik Devletleri'nde yayınlanan NFPA 909 (Kültürel Kaynakların Korunmasına İlişkin Yasa Müzeler, Kütüphaneler ve İbadethaneler), müze, kütüphane ve ibadethane gibi kültürel miras değeri taşıyan binaların ve koleksiyonlarının yangın ve diğer tehlikelerden korunmasına yönelik ilkeleri ve uygulamaları tanımlamaktadır [52]. İlk olarak 1948 yılında "Protecting our Heritage" başlıklı bir el kitabı olarak yayınlanan bu dokümana, 2005 yılında kod statüsü verilmiş ve en güncel versiyonu 2025 yılında yayınlanmıştır. Bu kod; yangın önleme, yangından korunma yönetimi, yangın güvenliği, acil durum hazırlığı ile yangından korunma sistemlerinin muayene, test ve bakımını içeren kapsamlı bir koruma programı içermektedir. NFPA 909, tarihî binalardaki hareketli yangın yükününü oluşturan ögelerin

(mobilya, tefrişat, depo malzemeleri) değerlendirilmesine yönelik bir çerçeve oluşturmaktadır. Özellikle Annex H ve I'de yer alan kompakt depolama sistemlerine ilişkin yangın testleri ve koleksiyon çeşitlerinin yangın yükü değerleri risk tahminleri için referans oluşturmaktadır.

NFPA 914: Tarihi yapıların korunması kodu

Amerika Birleşik Devletleri'nde yayınlanan NFPA 914 (Tarihî Binaların Korunması Kanunu), tarihî binaların yangın güvenliğine yönelik detaylı bir çerçeve oluşturmaktadır. İlk olarak 1989 yılında "Recommended Practice for Fire Protection in Rehabilitation and Adaptive Reuse of Historic Structures" başlığıyla yayınlanan bu rehbere, 2006 yılında kod statüsü verilmiş ve güncel versiyonu 2019 yılında "Code for the Protection of Historic Structures" başlığıyla yayınlanmıştır [53]. NFPA 914, tarihî binalarda yangın güvenliğini sağlarken binaların özgün karakterlerinin korunmasını hedeflemekte ve risk toleransı kavramını ortaya koymaktadır. Tarihî binalarda kabul edilebilir risk seviyelerini belirleyerek buna göre yangın güvenlik tedbirleri geliştirilmesini önermektedir. Bu kod, tarihî binalarda yangın başlangıcının önlenmesini, yangın yayılımının sınırlandırılmasını, erken algılama ve müdahale sistemlerinin kurulması ile acil durum planlarının geliştirilmesini kapsamaktadır.

Eurocode 1 (EN 1991-1-2): Yangın etkisi altındaki yapılar

Avrupa Birliği kapsamında yayınlanan Eurocode 1'in 1. ve 2. bölümü (EN 1991-1-2: Yangına Maruz Kalan Yapılarda Alınacak Önlemler), binalarda yangın etkisiyle oluşan termal ve mekanik etkilerin yapı tasarımında dikkate alınmasını düzenlemektedir [54]. Bu standart, yangın yükü yoğunluğunun hesaplanması, sıcaklık-zaman grafikleri, parametrik yangın modelleri ve yangının yapısal elemanlar üzerindeki etkilerinin belirlenmesi konularında detaylı prosedürler sunmaktadır. EN 1991-1-2, farklı bina türleri için karakteristik yangın yükü yoğunluğu değerlerini tanımlamaktadır. Bu standart, yangın yükü hesaplamasında hem sabit yangın yükünü hem de hareketli yangın yükünü dikkate almaktadır. Bu standart ile binalarda yangın yükü yoğunluğunun hesaplanmasının matematiksel temeli oluşturulmaktadır. Eurocode'un performansa dayalı yaklaşımı, tarihî binalarda yangın senaryolarının geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

İspanya RSCIEI yönetmeliği (Real Decreto 2267/2004)

İspanya'da binalarda yangın güvenliğini düzenleyen RSCIEI (Endüstriyel Tesislerde Yangın Güvenliği Yönetmeliği), yangın yükü yoğunluğuna göre sekiz seviyeli bir risk sınıflandırması önermektedir [55]. Bu sınıflandırma sistemi, yangın yükü yoğunluğu (FLD) değerlerine (MJ/m^2) göre binaların risk düzeyini belirlemekte ve her risk seviyesi için gerekli aktif ve pasif yangın koruma sistemlerini tanımlamaktadır (Çizelge 2.3). RSCIEI, pek çok faaliyetlerde kullanılan ürünlerin yangın yükü değerlerini içeren tablolar sunmaktadır. Bu yönerge, tarihî binalarda malzeme bazlı yangın yükü hesaplamalarının yapılmasına ve risk seviyesine uygun koruma tedbirlerinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır.

Çizelge 2.3. Yangın yükü yoğunluğuna göre yangın çıkma riski

Yangın Risk Seviyesi		Yangın Yükü Yoğunluğu (MJ/m^2)
Düşük	1	$FLD \leq 425$
	2	$425 < FLD \leq 850$
Orta	1	$850 < FLD \leq 1275$
	2	$1275 < FLD \leq 1700$
	3	$1700 < FLD \leq 3400$
Yüksek	1	$3400 < FLD \leq 6800$
	2	$6800 < FLD \leq 13600$
	3	$13600 < FLD$

BS 9999: İngiltere yangın güvenliği uygulamaları kodu

İngiltere'de yayınlanan BS 9999 (Binaların Tasarımı, Yönetimi ve Kullanımında Yangın Güvenliği için Uygulama Kuralları), ilk kez 2008 yılında yayınlanmış ve 2017 yılında güncellenmiştir [56]. BS 9999, geleneksel yangın güvenlik yaklaşımlarının yanı sıra risk tabanlı ve performansa dayalı yangın güvenlik tedbirlerine olanak sağlamaktadır. Bu standart; yeni binalar, mevcut binalar, tasarım aşamasındaki binalar ve tarihî binalar için özel hükümler içermektedir. Tarihî binalarda yangın güvenliği çözümlerinin binanın özgün karakterini koruyacak şekilde geliştirilmesini vurgulamakta ve telafi edici tedbirler (compensatory measures) yaklaşımını benimsemektedir. Bu yaklaşım, tarihî binalarda standart gereksinimlerin karşılanamadığı durumlarda alternatif çözümler geliştirilmesini mümkün kılmaktadır.

CFPA-E Guideline No 30: Tarihi binalarda yangın güvenliği yönetimi

Avrupa Yangın Koruma Dernekleri Konfederasyonu (CFPA-E) tarafından 2013 yılında yayınlanan 30 numaralı rehber (Tarihi Binalarda Yangın Güvenliği Yönetimi), tarihî binalarda yangın riskinin azaltılması için temel ve düşük maliyetli önlemleri içeren talimatları sunmaktadır [57]. CFPA-E No: 30, tarihî binaların yangın güvenliğinde yangının başlamasının önlenmesi, yangın yayılımının sınırlandırılması, pasif ve aktif söndürme sistemlerinin kurulması konularında öneriler getirmektedir. Rehber, kundaklama, elektrik arızaları, açık alevler ve sıcak işler gibi yangın başlangıç nedenlerinin önlenmesine ele almaktadır.

2.7.2. Türkiye'deki yangın güvenlik düzenlemeleri

Türkiye'de binaların yangın güvenliği, Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY) ile düzenlenmekte olup, tarihî binalar için özel hükümler içermektedir. Ayrıca, Türk Standartları Enstitüsü (TSE) tarafından yayınlanan standartlar ve Eurocode uyarlamaları, yangın yükü hesaplamaları ve yapısal değerlendirmelerde teknik referans oluşturmaktadır.

Binaların yangından korunması hakkında yönetmelik (BYKHY)

Türkiye'de tüm binaların yangın güvenliği, 19 Aralık 2007 tarihinde Resmî Gazete'de yayınlanan BYKHY ile düzenlenmektedir. BYKHY, 7126 sayılı Sivil Savunma Kanunun ek 9. maddesi ile 3152 sayılı İçişleri Bakanlığı Teşkilat ve Görevleri Hakkındaki Kanunun 33. maddesine dayanılarak hazırlanmıştır. Yönetmelik, "her türlü yapı, bina, tesis ve işletmenin tasarım, yapım, kullanım, bakım ve işletim esaslarını" kapsamakta olup, İçişleri Bakanlığı ile Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığınca müştereken uygulanmaktadır. BYKHY, On Birinci Kısım'da (Madde 112-115) tarihî binalara özgü özel hükümler içermektedir. Bu bölümde, tarihî binaların yangın güvenliğinin sağlanmasında özgünlük ilkesinin korunması ve en az müdahale yaklaşımının benimsenmesi gerektiği vurgulanmaktadır [58]. Ayrıca, tarihi binalarda yangın güvenliğinin sağlanması amacıyla alternatif çözümlerin geliştirilmesinde Kültür ve Turizm Bakanlığı ile koordinasyon sağlanmasını öngörmektedir. Ancak ne yazık ki yönetmeliğin tarihî binalara ilişkin

maddeleri uluslararası standartlarla kıyaslandığında pek çok konuda yetersiz kaldığı görülmektedir.

Türk standartları ve Eurocode uyarlamaları

Türkiye'de yangın güvenliğine ilişkin standartlar TSE tarafından yayınlanmaktadır. TS EN 1991-1-2 standardı, Eurocode 1'in yangın etkisi bölümünün Türkçe uyarlaması olup, yangın yükü hesaplama prosedürlerini ve yangının yapısal elemanlar üzerindeki etkilerini içermektedir. BYKHY'nin 5. maddesi, "Tasarımcılar tarafından, bu yönetmelikte hakkında yeterli hüküm bulunmayan hususlarda ve metro, marina, helikopter pisti, tünel, stadyum, havalimanı ve benzeri kullanım alanlarının yangından korunmasında Türk Standartları, bu standartların olmaması hâlinde ise Avrupa Standartları esas alınır. Türk veya Avrupa Standartlarında düzenlenmeyen hususlarda, uluslararası geçerliliği kabul edilen standartlar da kullanılabilir" hükmünü getirmektedir [59].

2.8. Bölüm Değerlendirmesi

Literatür taraması, tarihî binalarda yangın güvenliğine yönelik çalışmaların metodolojik çeşitlilik gösterdiğini ve disiplinler arası bir yaklaşım gerektirdiğini ortaya koymaktadır. İncelenen çalışmalar, yangın risk değerlendirmesinde ÇKKV yöntemleri, indeks tabanlı sistemler, olasılıksal modeller ve makine öğrenmesi gibi farklı tekniklerin uygulandığını göstermektedir. Ancak bu çalışmaların büyük çoğunluğunun, yapısal özelliklere ve çevresel faktörlere odaklanmakta olduğu; malzeme bazlı yangın yükü hesaplamalarını ele alan araştırmaların sınırlı sayıda kaldığı tespit edilmiştir. BIM ve CBS teknolojilerinin tarihî binalarda yangın risk değerlendirmesine entegrasyonu, son yıllarda önem kazanan bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Özellikle HBIM ile CBS'nin birlikte kullanıldığı çalışmalar hem yapı ölçeğinde hem de kentsel ölçekte risk haritalaması yapılabilmesine olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, BIM modellerinden yangın yükü hesaplaması yapan ve bunu risk sınıflandırma sistemleriyle birleştiren bütünleşik yazılım çözümlerinin literatürde yeterince geliştirilmediği görülmektedir. Uluslararası yangın güvenlik standartları incelendiğinde, NFPA 909 ve NFPA 914'ün tarihî binalara özgü detaylı prosedürler sunduğu; Eurocode 1'in yangın yükü hesaplama metodolojisinde formüle dayalı temel oluşturduğu; RSCIEI'nin risk sınıflandırması ile uygulamaya dönük bir çerçeve sağladığı anlaşılmaktadır. Türkiye'deki BYKHY düzenlemesinin ise tarihî binalara özgü

hükümleri içermesine karşın, uluslararası standartlarda yer alan malzeme bazlı yangın yükü hesaplama ve detaylı risk sınıflandırma sistemlerini kapsamadığı belirlenmiştir.

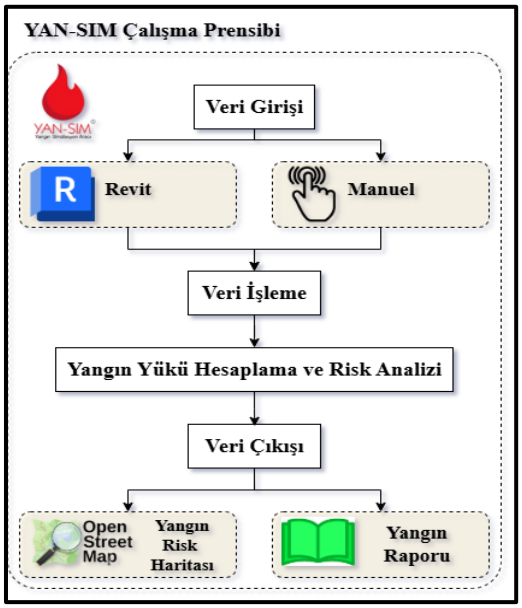
Sonuç olarak literatür, tarihî binalarda yangın güvenliğinin sağlanmasında hem koruma ilkeleri hem de performansa dayalı mühendislik yaklaşımlarının birlikte kullanılması gerektiğini vurgulamaktadır. Ancak yapı malzemelerinin yangın davranışlarına ilişkin veri tabanlarının eksikliği, BIM-CBS entegrasyonunun otomatik yangın yükü hesaplama süreçlerinde yetersiz kullanımı ve ulusal mevzuatın uluslararası standartlarla uyumlaştırılması ihtiyacı, bu alandaki önemli boşlukları oluşturmaktadır. Bu çalışmanın geliştirdiği YAN-SIM yazılımı, belirtilen bu boşlukları doldurmaya yönelik bütünleşik bir çözüm sunmayı hedeflemektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, tarihî binalarda malzeme bazlı yangın yükü analizini gerçekleştirmek üzere geliştirilen YAN-SIM yazılımının tasarım ilkeleri, çalışma mantığı ve teknik altyapısı detaylı olarak açıklanmaktadır. Yazılımın veri girişinden çıktı üretimine kadar olan tüm süreçleri, BIM entegrasyonu, yangın yükü hesaplama algoritmaları, risk sınıflandırma metodolojisi ve CBS tabanlı görselleştirme aşamaları sistematik bir biçimde ele alınmaktadır.

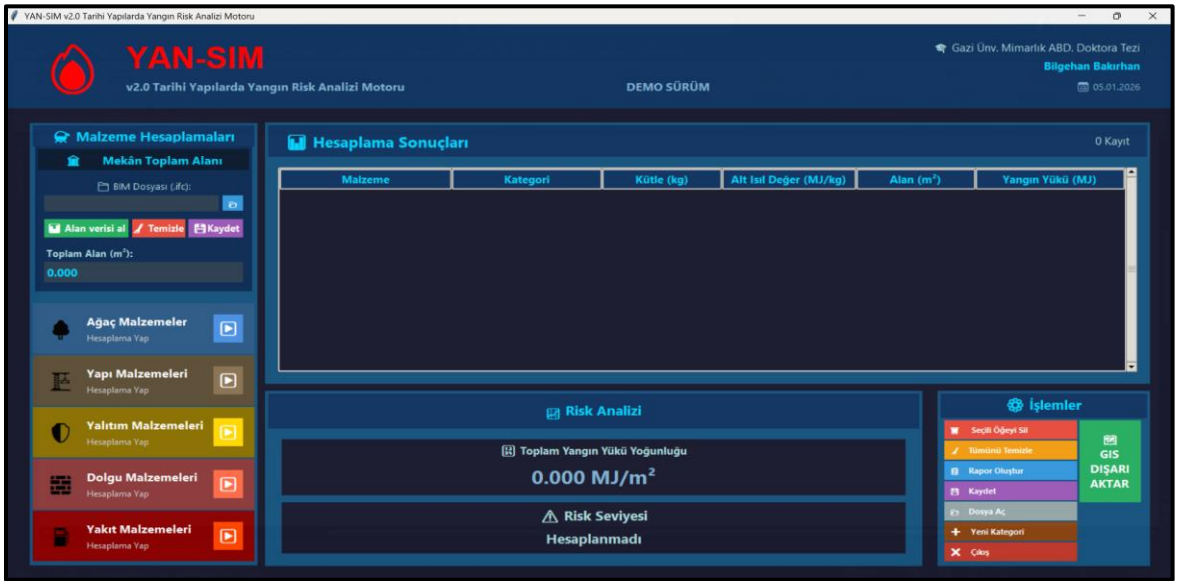
3.1. YAN-SIM Yazılımının Tasarımı ve Çalışma Prensibi

Adım 1: Yazılım Mimarisi ve Geliştirme Ortamı: YAN-SIM, tarihî binalarda yangın risk değerlendirmesi yapmak üzere Python programlama dili kullanılarak geliştirilmiş bir yazılım sistemidir. Yazılımın temel mimarisi, nesne tabanlı programlama ilkeleri doğrultusunda modüler bir yapı üzerine kurulmuştur. Geliştirme sürecinde Python 3.11 sürümü kullanılmış, kullanıcı arayüzü için Tkinter kütüphanesi, IFC dosya işleme için IfcOpenShell kütüphanesi, veri yönetimi için JavaScript Nesne Gösterimi (JSON) tabanlı dosya sistemi ve CBS entegrasyonu için Folium kütüphanesi tercih edilmiştir. Sistem, veri girişi, veri işleme, yangın yükü hesaplama ve risk analizi ile veri çıkışı olmak üzere dört ana aşamadan oluşmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. YAN-SIM yazılımının temel çalışma prensibi

YAN-SIM Ana pencere sınıfı (YanSimMainWindow), tüm kullanıcı etkileşimlerini yöneten merkezî kontrol ünitesi olarak çalışmaktadır. Arayüz tasarımına, malzeme hesaplama modülleri, sonuç görüntüleme tabloları ve analiz raporlama bileşenleri entegre edilmiştir. Sistem, beş farklı malzeme kategorisi için (Ağaç Malzemeler, Yapı Malzemeleri, Yalıtım Malzemeleri, Dolgu Malzemeleri ve Yakıt Malzemeleri) ayrı ayrı hesaplama modülleri sunmaktadır. Ayrıca sistem, dinamik veri güncellemesi yaparak kullanıcıların yeni malzeme bilgilerini veri tabanına eklemesine olanak tanımaktadır (Şekil 3.2).



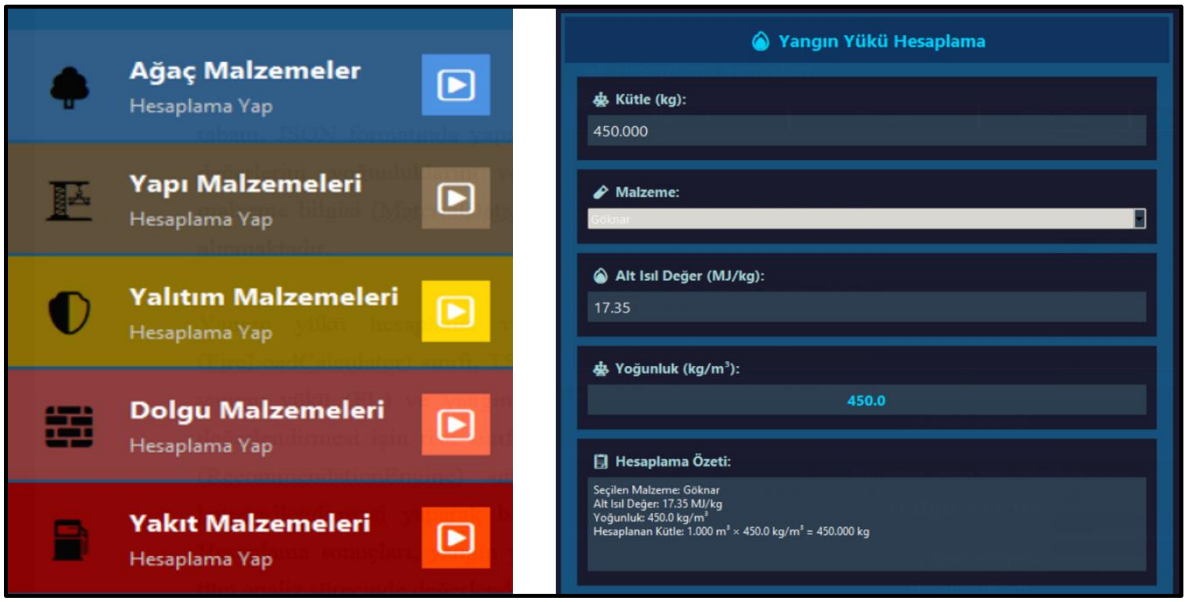
Şekil 3.2. YAN-SIM ana grafik kullanıcı arayüzü

Adım 2: Veri Girişi Modülü:Veri girişi aşamasında sistem, iki farklı veri kaynağını desteklemektedir. Bunlar, BIM tabanlı Revit programından IFC formatında aktarılan dijital modeller ile kullanıcı tarafından manuel olarak girilen verilerdir. IFC dosyası içe aktarımında, kullanıcı dosya seçim diyalogu üzerinden .ifc uzantılı dosyayı seçmekte, sistem dosya formatını doğruladıktan sonra IfcOpenShell modülünü çağırmaktadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. YAN-SIM arayüzünde IFC dosyasından çıkarılan malzeme ve hacim bilgileri

Modül, IFC dosyasındaki IfcSpace nesnelerinden alan bilgilerini (m²), IfcBuildingElement nesnelerinden malzeme türlerini ve hacim bilgilerini (m³) otomatik olarak çıkarmaktadır. Çıkarılan veriler, kullanıcıya bir onay penceresi ile sunulmakta ve kullanıcı doğrulaması sonrasında hesaplama modülüne aktarılmaktadır. Manuel veri girişinde ise kullanıcı, malzeme kategorisi seçimi yaparak (Ağaç Malzemeler, Yapı Malzemeleri, Yalıtım Malzemeleri, Dolgu Malzemeleri, Yakıt Malzemeleri) her malzeme için alan (m²), hacim (m³) veya kütle (kg) bilgilerini doğrudan girebilmektedir. Bu esnek yapı hem dijital modelleme altyapısına sahip hem de geleneksel ölçüm yöntemleriyle çalışan kullanıcıların sistemi etkin biçimde kullanabilmesini sağlamaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. YAN-SIM kullanıcı arayüzünde malzeme kategorileri ve hesaplama modülleri

Adım 3: Veri İşleme ve Malzeme Veri Tabanı Yönetimi: Veri işleme aşamasında, IFC dosyalarından elde edilen malzeme türü, hacim ve alan bilgileri otomatik olarak çıkarılmaktadır. Sistem, malzeme özelliklerinin saklanması ve erişimi için malzeme veri tabanı (MaterialDatabase) sınıfı üzerinden çalışmaktadır. Veri tabanı, JSON formatında yapılandırılmış dosya sistemi kullanarak malzemelerin alt ısıl değerlerini, yoğunluklarını ve kategori bilgilerini saklamaktadır. Veri tabanında, her malzeme için malzeme adı, kategori, alt ısıl değer, yoğunluk ve kaynak alanları bulunmaktadır. Alt ısıl değerler, TS EN 1991-1-2 standardı ve ilgili bilimsel literatürden derlenmiştir. Veri tabanında yer alan malzemeler; ahşap türleri (meşe, sarıçam, karaçam, ladin, göknar, kayın vb.), yapı malzemeleri (doğal taş, tuğla, kerpiç, harç vb.), yalıtım malzemeleri (taş yünü, XPS, EPS vb.), dolgu ve yakıt malzemelerini kapsamaktadır. Çizelge 3.1'de, YAN-SIM yazılımının veri tabanında kullanılan başlıca malzemelerin alt ısıl değerleri ve yoğunlukları sunulmaktadır.

Çizelge 3.1. YAN-SIM veri tabanındaki malzemelerin alt ısıl değerleri ve yoğunlukları [60-65]

	Malzeme Adı	Alt Isıl Değer (MJ/kg)	Özkütle (kg/m³)
Ağaç Malzemeler	Akçaağaç	16,77	675,0
	Ardıç	16,85	585,0
	Dişbudak	16,37	640,0
	Göknar	17,35	415,0
	Gürgen	16,11	735,0
	Ihlamur	16,21	535,0
	Karaçam	18,36	575,0
	Kavak	16,50	440,0
	Kayın	16,42	710,0
	Kestane	15,80	590,0
	Kızılçam	18,03	465,0
	Ladin	16,52	450,0
	Meşe	15,97	755,0
	Sarıçam	18,43	550,0
	Sedir	17,40	520,0
	Çınar	16,20	545,0
	Kestane (Kuru)	16,00	580,0
	Kestane (Yaş)	14,50	750,0

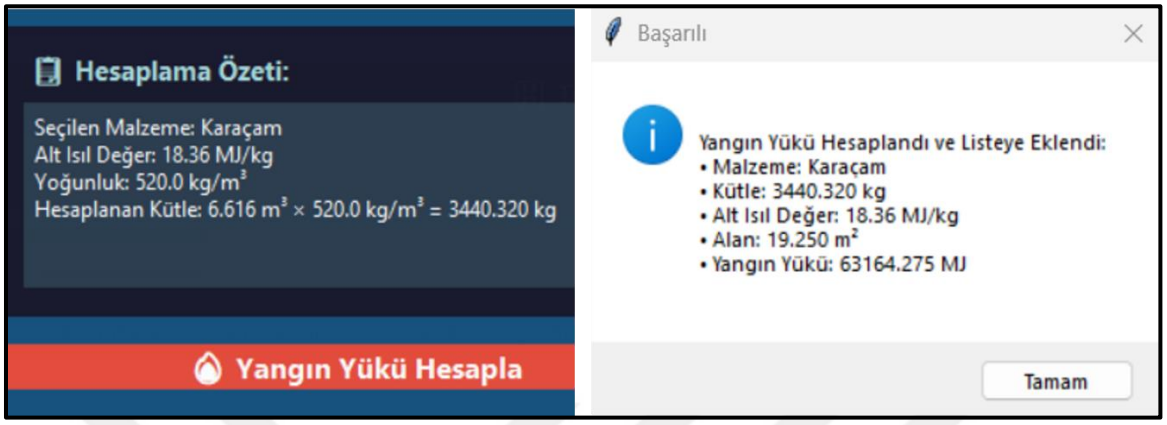
Çizelge 3.1. (devam) YAN-SIM veri tabanındaki malzemelerin alt ısıl değerleri ve yoğunlukları [60-65]

	Malzeme Adı	Alt Isıl Değer (MJ/kg)	Özkütle (kg/m³)
Yapı Malzemeleri	Beton	0,0009	2400,0
	Kil Tuğla	0,0008	1800,0
	Çelik	0,0004	7850,0
	Gaz Beton	0,0008	600,0
	Doğal Taş	0,0005	2700,0
	Kerpiç	0,002	1500,0
Yalıtım Malzemeleri	Alçı	0,0095	1200,0
	EPS	46,0	20,0
	XPS	3,91	35,0
	Cam Yünü	0,05	25,0
	Taş Yünü	0,03	100,0
	Perlit	0,01	150,0
Dolgu Malzemeleri	Kumaş	16,74	200,0
	Kâğıt	16,28	800,0
	PVC	12,83	1330,0
	Halı	18,50	300,0
	Köpük	25,00	50,0
	Plastik	20,00	950,0
Yakıt Malzemeler	Kömür	29,0	1300,0
	Dizel	42,6	850,0
	Bütan	45,3	580,0
	Benzin	43,4	750,0
	Propan	46,4	493,0
	Doğalgaz	47,1	0,8

Ayrıca her malzeme için malzeme bilgisi (MaterialData) ve veri sınıfı (Dataclass) kullanılarak veriler kayıt altına alınmaktadır. Kullanıcı, veri tabanında bulunmayan bir malzeme ile karşılaştığında, "Yeni Malzeme Ekle" fonksiyonu üzerinden malzeme adı, kategorisi, alt ısıl değeri ve yoğunluk bilgilerini girerek veri tabanını dinamik olarak güncelleyebilmektedir.

Adım 4: Yangın Yükü Hesaplama Algoritması: Yangın yükü hesaplama algoritması, TS EN 1991-1-2 standardına uygun olarak yangın yükü hesaplama (FireLoadCalculator) sınıfı içerisine entegre edilmiştir. Temel hesaplama formülü, her malzeme için kütle (kg) ile alt

ısıl değer (MJ/kg) çarpımından oluşmaktadır. calculate_fire_load() metodu, bu hesaplamayı gerçekleştirerek malzeme bazlı yangın yükünü MJ cinsinden oluşturmaktadır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. YAN-SIM arayüzünde yangın yükü hesaplama özeti ve sonuç bildirimi

Yangın yükü hesaplama (FireLoadCalculator) sınıfı, her malzeme için yangın yükü (FL) ve FLD değerini hesaplamaktadır. Hesaplama süreci Eş. 3.1'deki ifade edildiği şekilde üç aşamada gerçekleşmektedir:

$$m_i = V_i \times d_i \tag{3.1}$$

- m: kütle (kg)
- V: hacim (m^3)
- d: yoğunluk (kg/m^3)

Hacim verileri girildiğinde, öncelikle kütle hesaplaması yapılmaktadır. Sistem, hesaplanan kütleyi kullanıcıya bir bilgi penceresi ile Eş. 3.2'de belirtildiği şekilde sunmaktadır.

$$Q_t = m_i \times c_i \tag{3.2}$$

- Q_t: toplam yangın yükü (MJ)
- m: kütle (kg)
- c: alt ısıl değer (MJ/kg)

Kütle ve alan verileri ile birlikte malzeme veri tabanından çekilen alt ısıl değer kullanılarak yangın yükü Eş. 3.3'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$Q_{fd} = Q_t / A_{tf} \quad (3.3)$$

- Q_{fd}: toplam yangın yükü yoğunluğu (MJ/m²)
- Q_t: toplam yangın yükü (MJ)
- A_{tf}: toplam mekân alanı (m²)

Son olarak, toplam yangın yükü ve toplam alan değeri kullanılarak yangın yükü yoğunluğu hesaplanmaktadır. Hesaplama sonuçları, kullanıcıya "Hesaplama Sonuçları" tablosunda malzeme bazında gösterilmektedir ve her malzemenin toplam yangın yükü içindeki payı yüzde olarak sunulmaktadır. Risk değerlendirmesi için risk sınıflandırma algoritmaları ve öneri üretimi için öneri motoru (RecommendationEngine) sınıfı kullanılmaktadır. Yazılımda kullanılan get_risk_level() metodu, hesaplanan FLD değerini İspanyol RSCIEI standardında tanımlanan sekiz dereceli risk sınıflandırma sistemine göre değerlendirerek binanın risk kategorisini belirlemektedir. Risk seviyesi, yazılım arayüzünde hem metin hem de renk kodlaması ile görselleştirilmektedir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. YAN-SIM arayüzünde yangın yükü yoğunluğu ve risk seviyesinin belirlenmesi

Hesaplama sonuçları, yangın yükü sonuçları (FireLoadResult) veri yapısında saklanarak tüm analiz sürecinde değerlendirilebilmektedir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. Yangın yükü yoğunluğuna dayalı risk sınıflandırması ve renk kodlaması

Yangın Yükü Yoğunluğu (MJ/m^2)	Risk Kategorisi	Renk Kodu	Renk
FLD ≤ 425	1. Derece Düşük Risk	Yeşil (#74CA00)	
425 < FLD ≤ 850	2. Derece Düşük Risk	Açık Yeşil (#D2D937)	
850 < FLD ≤ 1275	1. Derece Orta Risk	Altın Sarısı (#F0DE09)	
1275 < FLD ≤ 1700	2. Derece Orta Risk	Açık Turuncu (#FFAB54)	
1700 < FLD ≤ 3400	3. Derece Orta Risk	Turuncu (#FF6400)	
3400 < FLD ≤ 6800	1. Derece Yüksek Risk	Parlak Kırmızı (#FB3333)	
6800 < FLD ≤ 13600	2. Derece Yüksek Risk	Kırmızı (#FF0000)	
13600 < FLD	3. Derece Yüksek Risk	Koyu Kırmızı (#BB1E1E)	

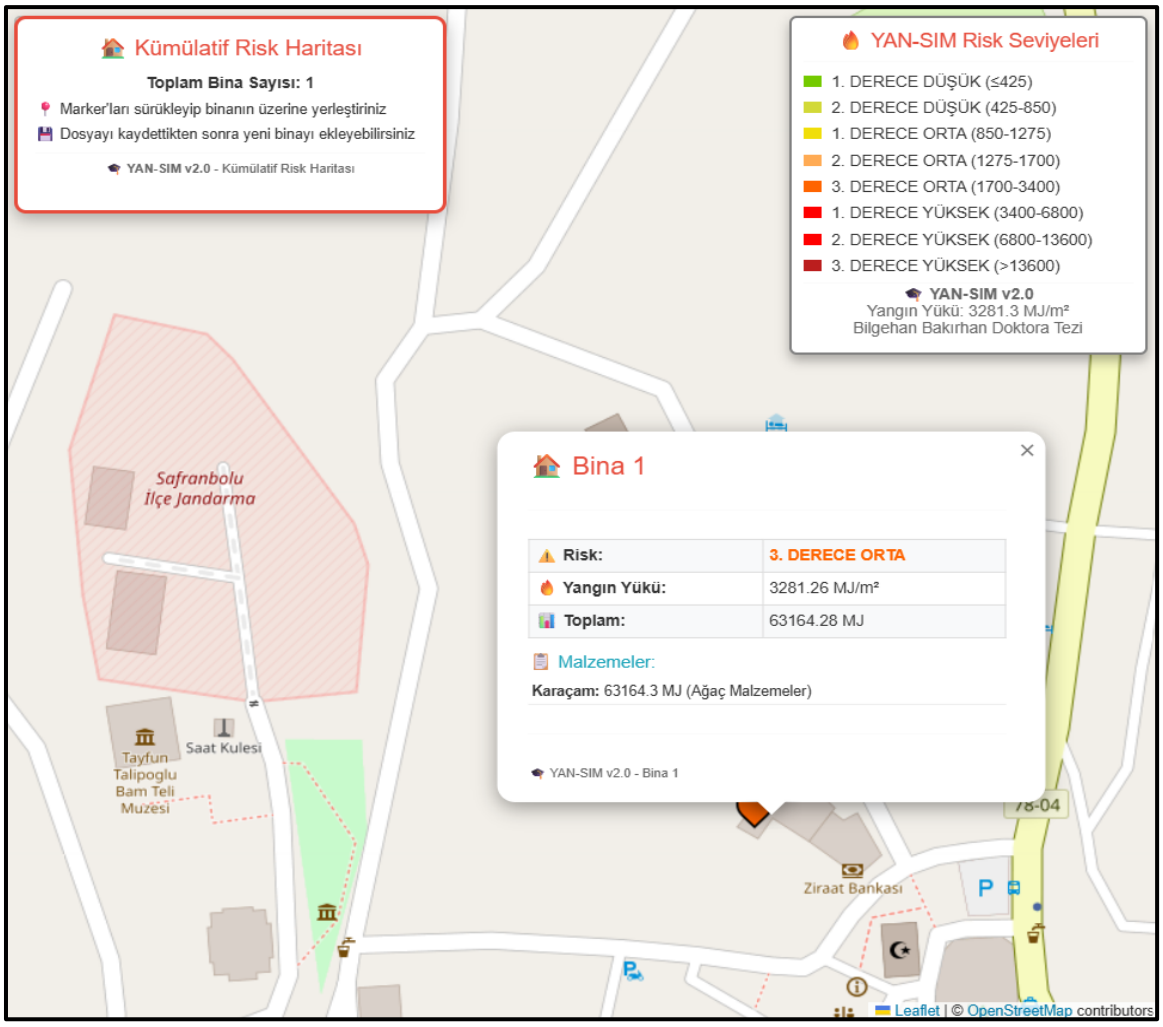
Adım 5: Çıktı Üretimi: CBS Tabanlı Risk Haritası ve Analiz Raporu: Veri çıkışı aşamasında ise sistem iki farklı çıktı üretmektedir. Bunlar, OSM altyapısı kullanılarak oluşturulan CBS tabanlı yangın risk haritası ve detaylı analiz bulgularını içeren PDF formatında yangın raporudur. CBS risk haritası oluşturma süreci, kullanıcının "İşlemler" menüsünden "GIS Dışarı Aktar" seçeneğini seçmesiyle başlamaktadır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. YAN-SIM arayüzünde OSM tabanlı yangın risk haritası oluşturma

Sistem, analiz edilen her bina için enlem-boylam koordinatlarını, hesaplanan FLD değerini, risk kategorisini ve malzeme detaylarını JSON formatında bir veri dosyasına (yansim_buildings_data.json) kaydetmektedir. Ardından, Folium kütüphanesi kullanılarak OSM harita tabanı üzerine her bina için konum işaretçileri (marker) yerleştirilmektedir. İşaretçilerin renkleri, binanın risk seviyesine göre otomatik olarak atanmaktadır (yeşil: düşük risk, sarı-turuncu: orta risk, kırmızı: yüksek risk). Her işaretçiye, binanın adı, risk seviyesi,

yangın yükü yoğunluğu ve malzeme bilgilerini içeren interaktif bir pop-up penceresi eklenmektedir. Harita, Hiper Metin İşaretleme Dili (HTML) dosyası (yansim_cumulative_risk_map.html) olarak kaydedilmekte ve kullanıcı tarafından web tarayıcısında açılarak görüntülenebilmektedir. Yangın risk haritası, analiz edilen binaların coğrafi konumlarını ve risk seviyelerini renk kodlaması ile görselleştirerek mekânsal risk dağılımının anlaşılmasını sağlamaktadır (Harita 3.1.)



Harita 3.1. YAN-SIM arayüzünde yangın risk haritası ve interaktif bina bilgi penceresi

Yangın raporu oluşturma işlemi, kullanıcının "Rapor Oluştur" butonuna tıklamasıyla başlamaktadır. Sistem, önceden tanımlanmış bir rapor şablonu üzerinden PDF dosyası oluşturmaktadır. Rapor, altı ana bölümden oluşmaktadır:

1. Genel Bilgiler-Rapor tarihi, yazılım versiyonu, hazırlayan, bina adı, toplam alan, toplam yangın yükü, yangın yükü yoğunluğu, risk seviyesi

2. Detaylı Hesaplamalar-Her malzeme için kütle, alt ısıl değer, alan, yangın yükü ve toplam içindeki pay
3. Yüksek Yangın Yükü Payına Sahip Malzemeler- Toplam yangın yükünün %10'undan fazlasını oluşturan malzemelerin listesi ve özel çözüm önerileri
4. Risk Değerlendirmesi-Risk kategorisi ve risk durumu açıklaması
5. Sonuç ve Değerlendirme-Genel bulgular ve öneriler
6. Referanslar ve Standartlar-Hesaplamalarda kullanılan standartların listesi (TS EN 1991-1-2, UNESCO-ICOMOS, NFPA 909-914).

Yangın raporu, bina bazlı hesaplama detaylarını, malzeme analiz sonuçlarını, risk kategorilerini ve önerilen yangın güvenlik önlemlerini kapsamlı bir şekilde sunmaktadır. (Şekil 3.8).

YANGIN YÜKÜ ANALİZ RAPORU
Tarihi Yapılar için Yangın Risk Değerlendirmesi

1. GENEL BİLGİLER

Rapor Tarihi: xx.xx.xxxx xx:xx
Yazılım: YAN-SIM v2.0 - Yangın Risk Analizi Motoru
Hazırlayan: Bilgehan Bakırhan (Doktora Tez Çalışması)
Mekânın Toplam Alanı: xxx m²
Toplam Yangın Yükü: xxx MJ
Toplam Yangın Yükü Yoğunluğu: xxx MJ/m²
Risk Seviyesi: xxx
Risk Durumu: xxx
Analiz Edilen Malzeme Sayısı: xxx

2. DETAYLI HESAPLAMALAR

1. xxx (xxx Malzemeler)
├─ Kütle: xxx kg
├─ Alt Isıl Değer: xxx MJ/kg
├─ Alan: xxx m²
├─ Yangın Yükü: xxx MJ
└─ Toplam İçindeki Payı: % xxx

2. xxx (xxx Malzemeler)
├─ Kütle: xxx kg
├─ Alt Isıl Değer: xxx MJ/kg
├─ Alan: xxx m²
├─ Yangın Yükü: xxx MJ
└─ Toplam İçindeki Payı: % xxx

3. xxx (xxx Malzemeler)
├─ Kütle: xxx kg
├─ Alt Isıl Değer: xxx MJ/kg
├─ Alan: xxx m²
├─ Yangın Yükü: xxx MJ
└─ Toplam İçindeki Payı: % xxx

3. YÜKSEK YANGIN YÜKÜ PAYINA SAHİP MALZEMELER

1. xxx - xxx Malzemeler
Yangın Yükü: xxx MJ (Toplam içindeki payı: % xxx)

ÖZEL ÇÖZÜM ÖNERİLERİ:
• xxx

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

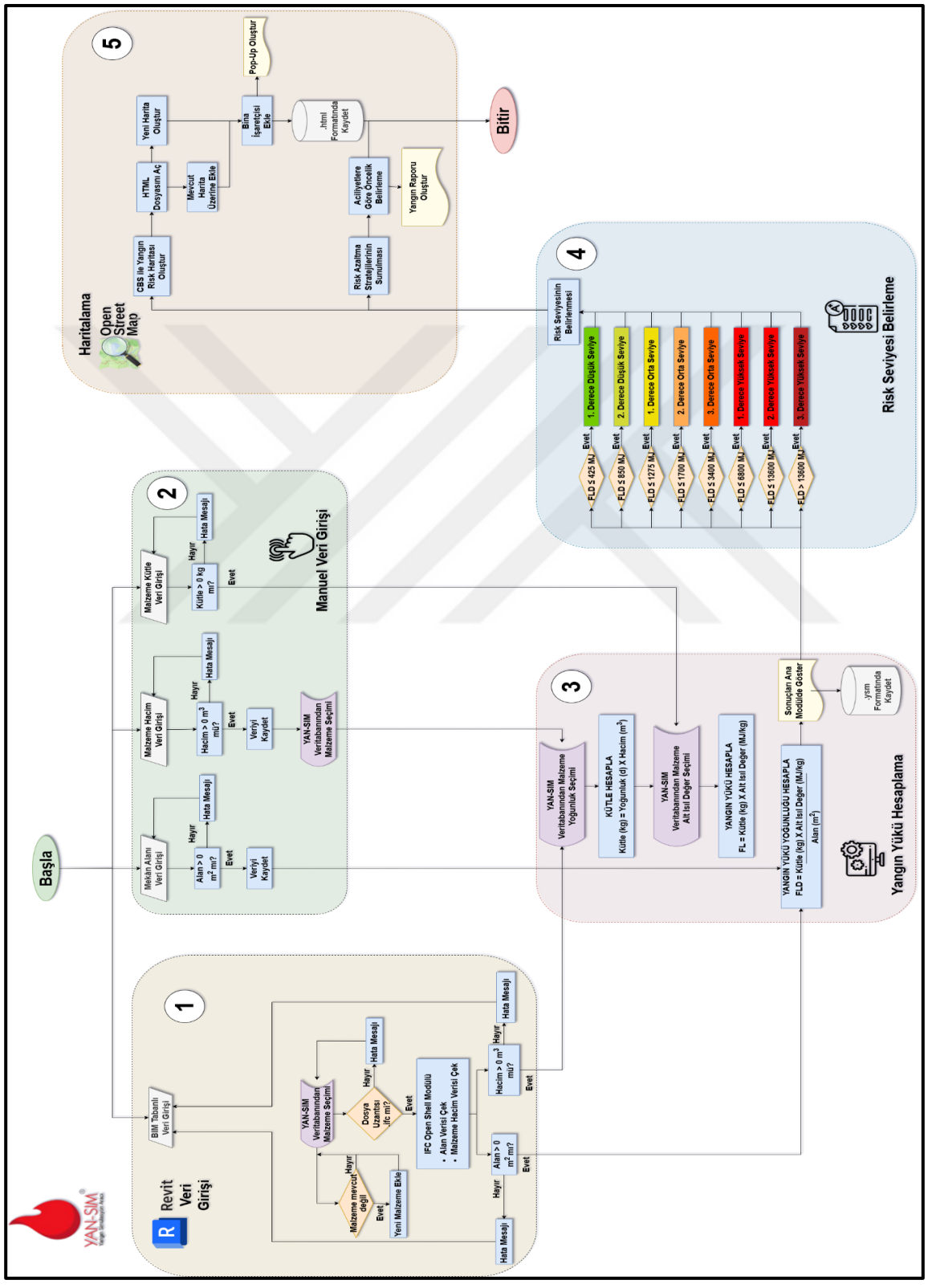
Analiz sonucunda yapının yangın yükü yoğunluğu xxx MJ/m² olarak hesaplanmış ve xxx kategorisinde değerlendirilmiştir.
Tarihi yapının özgün karakterini koruyarak yangın güvenliğini artırmak için:
Öncelikle xxx uygulanmalıdır. Bu önlemler uygulandığında yapının yangın güvenlik seviyesi önemli ölçüde artacak ve tarihi değeri korunmuş olacaktır.

5. REFERANSLAR VE STANDARTLAR

• TS EN 1991-1-2 (Eurocode 1): Yapılar üzerindeki etkiler - Yangın etkisi
• UNESCO-ICOMOS: Tarihi Yapıların Korunması Kılavuzları
• NFPA Standartları (NFPA 909-914): Yangın güvenliği kod ve standartları
Rapor Sonu - YAN-SIM v2.0 | Bilgehan Bakırhan Doktora Tezi
Tarihi Yapılar İçin Yangın Risk Analizi

Şekil 3.8. YAN-SIM yazılımının ürettiği yangın yükü analiz raporu

Yazılımın veri girişinden çıktı üretimine kadar gerçekleştirdiği tüm işlem adımları ve karar mekanizmaları Şekil 3.9'da detaylı akış diyagramı olarak sunulmuştur (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. YAN-SIM yazılımının tam süreç çalışma prensibi

3.2. YAN-SIM Yazılımının Validasyonu

YAN-SIM yazılımının hesaplama doğruluğunu test etmek ve algoritmaların güvenilirliğini kanıtlamak amacıyla, yazılımın ürettiği yangın yükü yoğunluğu değerleri, manuel hesaplamalarla karşılaştırılarak validasyon süreci gerçekleştirilmiştir. Validasyon çalışması için, Beijing'de bulunan Jufu Hall binası referans vaka olarak seçilmiştir. Jufu Hall, geleneksel Çin mimarisinin ahşap karkas strüktür özelliklerini taşıyan tarihî bir bina olup, Safranbolu'daki incelenen konaklar ile benzer yapısal karakteristiklere sahiptir (Resim 3.1).

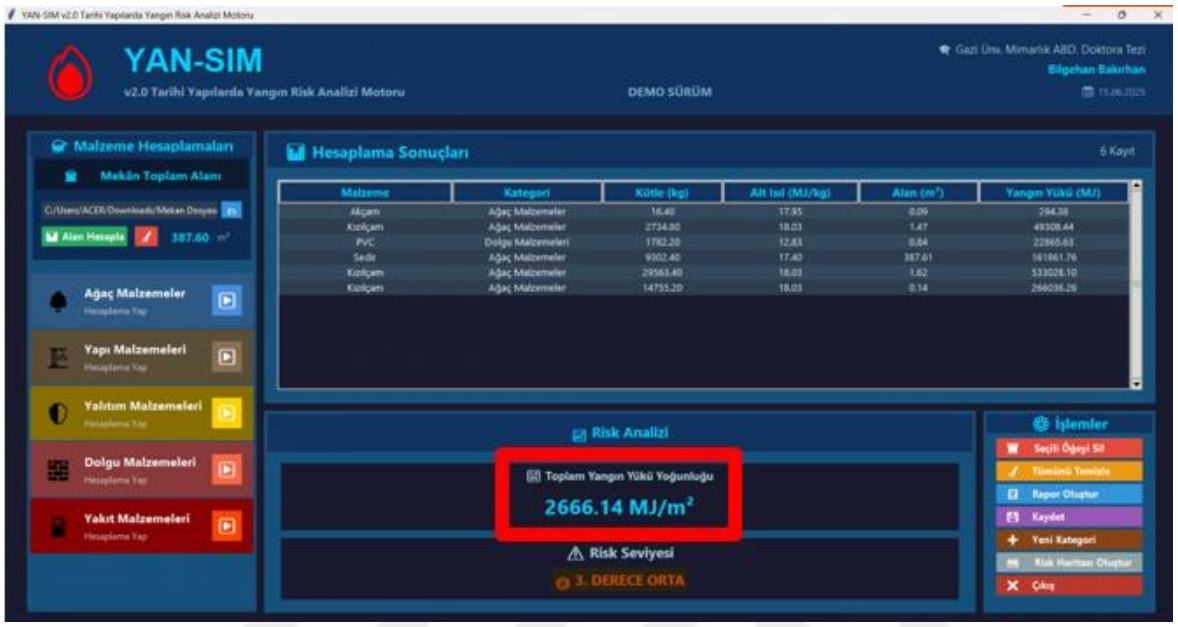


Resim 3.1. Jufu Hall Binası’na ait görseller Beijing/Çin

Adım 1: Referans Değer Belirlenmesi: Validasyon çalışmasında kullanılan referans yangın yükü yoğunluğu değeri, Li vd. [66] Beijing'deki 83 tarih, tarihî bina üzerinde gerçekleştirdiği kapsamlı araştırmadan alınmıştır. Bu çalışmada, Jufu Hall binası için TS EN 1991-1-2 standardına uygun olarak gerçekleştirilen manuel hesaplamalar sonucunda, toplam yangın yükü yoğunluğu 2751,5 MJ/m² olarak belirlenmiştir. Bu değer, YAN-SIM yazılımının doğruluk testi için referans olarak kullanılmıştır.

Adım 2: YAN-SIM Yazılımı ile Hesaplama: Aynı binanın BIM modeli, IFC formatına dönüştürülerek YAN-SIM yazılımına aktarılmıştır. Tüm malzeme türleri, hacimler ve alan bilgileri sisteme entegre edilmiştir. YAN-SIM, yangın yükü hesaplama algoritması üzerinden her malzeme için yangın yükü değerlerini hesaplamış ve toplam yangın yükü yoğunluğunu 2666,14 MJ/m² olarak belirlemiştir.

Adım 3: Karşılaştırmalı Analiz ve Sapma Değerlendirmesi: Manuel hesaplama yöntemiyle bulunan toplam yangın yükü yoğunluğu değeri 2751,5 MJ/m² iken, YAN-SIM simülasyon programı ile elde edilen sonuç 2666,14 MJ/m² olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Tarihî Jufu Hall binasının yangın yükünün YAN-SIM üzerinden analizi

İki değer arasındaki fark 85,36 MJ/m² olup, bu yaklaşık %3,1'lik bir sapmaya karşılık gelmektedir. Bu düzeydeki uyum, yangın mühendisliği alanında kabul edilebilir seviyededir. Yangın güvenliği hesaplamalarında kullanılan uluslararası standartlar ve Yangın Koruma Mühendisleri Derneği (SFPE) kılavuzları, yangın yükü hesaplamalarında %5-10 arasındaki hata payının normal olduğunu belirtmektedir. Elde edilen %3,1'lik sapma, bu tolerans aralığının altında kalmaktadır ve yazılımın hesaplama doğruluğunun yüksek düzeyde olduğunu göstermektedir. Sapmanın kaynağı, ondalık basamak yuvarlama farklılıkları ve malzeme yoğunluk değerlerinin literatürde belirtilen aralıklardaki küçük varyasyonlarından kaynaklanmaktadır. Her iki hesaplama yönteminde de aynı alt ısıl değerler kullanılmış olup, algoritmaların matematiksel tutarlılığı doğrulanmıştır. Bu sonuçlar, YAN-SIM yazılımının yangın yükü hesaplama algoritmalarının TS EN 1991-1-2 standardına tam uyumlu olduğunu ve sayısal doğruluk açısından güvenilir sonuçlar ürettiğini kanıtlamaktadır. Validasyon sürecinde, YAN-SIM yazılımının hem sayısal hesaplama doğruluğu hem de uluslararası standartlara uygunluk açısından güvenilir ve tutarlı sonuçlar ürettiği deneysel olarak kanıtlanmıştır.

4. VAKA ÇALIŞMASI VE YANGIN RAPORU SÜRECİ

Bu bölümde, YAN-SIM yazılımının uygulama aşaması ve gerçek tarihî binalar üzerindeki performansı ele alınmaktadır. Safranbolu Tarihî Kenti'nde yer alan dört adet tescilli konut yapısı üzerinde gerçekleştirilen vaka çalışması, çalışma alanının seçim kriterleri, binaların BIM modellerinin oluşturulması, yangın yükü analizlerinin yapılması, risk seviyelerinin belirlenmesi ve CBS tabanlı interaktif risk haritalarının üretilmesi aşamalarıyla sistematik olarak sunulmaktadır. Ayrıca, yazılımın otomatik olarak ürettiği yangın raporlarının yapısı ve içeriği detaylandırılmaktadır.

4.1. Çalışma Alanının Belirlenmesi

Çalışma alanı olarak UNESCO Dünya Mirası Listesi'nde yer alan Safranbolu Tarihî Kenti'nde bulunan Hükûmet Sokak bölgesi seçilmiştir. Bu seçimde, bölgenin yoğun tarihî doku taşıması, geleneksel Türk konut mimarisinin özgün örneklerini barındırması ve yangın riski açısından kritik bir konumda bulunması etkili olmuştur. Hükûmet Sokak, Safranbolu'nun en önemli tarihî akslarından birini oluşturmakta ve 18-19. yüzyıla ait sivil mimarlık örneklerini bir arada sunmaktadır.

Çalışma kapsamına dahil edilecek binaların belirlenmesinde, mimari projelerine erişilebilirlik temel kriter olarak benimsenmiştir. Safranbolu Belediyesi İmar ve Şehircilik Müdürlüğü arşivleri ile Karabük Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu kayıtları taranarak, rölöve, restitüsyon ve restorasyon projelerine ulaşılabilen tescilli yapılar tespit edilmiştir. Bu tarama sonucunda, Hükûmet Sokak üzerinde yer alan ve tam mimari proje setine sahip dört adet tarihî konut yapısı çalışma örneklemi olarak belirlenmiştir.

Seçilen binalar, Safranbolu geleneksel konut mimarisinin karakteristik özelliklerini yansıtmaktadır. Binalar, ahşap karkas taşıyıcı sistem, kerpiç dolgu duvarlar, ahşap döşemeler ve çatı sistemi gibi ortak yapısal özelliklere sahiptir. Ayrıca, binaların tamamı konut işleviyle kullanılmakta veya kültür turizmi amaçlı işlevlendirilmiştir. Bu durum, binaların içerdikleri yanıcı malzeme çeşitliliği ve yangın yükü potansiyeli açısından karşılaştırılabilir veriler sunmaktadır. Çalışma alanının coğrafi konumu, yangın riski açısından ek önem taşımaktadır. Hükûmet Sokak'taki binalar, birbirine bitişik veya yakın nizamda inşa edilmiş olup, potansiyel bir yangının hızla yayılma riski bulunmaktadır. Bu durum, bireysel bina bazlı risk

analizlerinin yanı sıra, bölgesel yangın yayılım senaryolarının da değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. CBS tabanlı haritalama sistemi, bu bölgesel değerlendirmenin görselleştirilmesi ve karar vericilere sunulması için kritik bir araç teşkil etmektedir.

4.2. Tescilli Tarihî Binaların Mimari Projelerinin Temini

Çalışma kapsamındaki dört adet tescilli binanın; rölöve, restitüsyon ve restorasyon projelerine erişilmiştir. Rölöve projeleri, binaların mevcut durumunu plan, kesit ve görünüş çizimleri ile belgelemekte; restitüsyon projeleri, binaların özgün hâlini tarihî araştırma ve mimari analiz yöntemleriyle ortaya koymakta; restorasyon projeleri ise, koruma müdahalelerini ve yapısal güçlendirme çalışmalarını detaylandırmaktadır.

Mimari projelerde yer alan malzeme tanımları ve yapı elemanı detayları, BIM modelleme sürecinin temel girdilerini oluşturmaktadır. Projelerde belirtilen ahşap tür ve kesitleri, kerpiç duvar kalınlıkları, döşeme sistemleri, çatı konstrüksiyonu ve kaplama malzemeleri sistematik olarak kaydedilmiştir. Ancak, bazı projelerde malzeme tanımlarının yeterince detaylı olmadığı görülmüş, bu durumlarda Safranbolu tarihî binalarına ilişkin literatür verileri ve benzer yapılardan elde edilen karşılaştırmalı bilgiler kullanılmıştır. Her mekân için net kullanım alanı hesaplanmış ve bu değerler, yangın yükü yoğunluğu hesaplamalarında payda olarak kullanılmak üzere kaydedilmiştir. Çok katlı binalarda, her kat ayrı ayrı değerlendirilmiş ve kat alanları toplanarak toplam yapı alanı elde edilmiştir.

Proje temini sürecinde karşılaşılan önemli bir zorluk, bazı binaların restorasyon sonrası işlev değişikliğine uğraması ve bu değişikliklerin projelerine tam olarak yansıtılmamasıdır. Konut işlevinden müze veya turistik konaklama tesisine dönüştürülen binalarda, iç mekân düzenlemelerinde ve malzeme kullanımında önemli farklılıklar oluşmuştur. Bu durumlarda, güncel durumu tespit etmek için yerinde inceleme yapılmış ve mevcut durum fotoğrafları çekilerek belgelenmiştir.

4.3. Binaların BIM Modellerinin Oluşturulması

Dört adet tarihî binanın BIM sürecinde, Autodesk Revit 2026 yazılımı kullanılmıştır. BIM modelleme yaklaşımı, geleneksel CAD çizimlerinden farklı olarak, yapı elemanlarının geometrik bilgilerinin yanı sıra malzeme özellikleri, fiziksel parametreleri ve ilişkisel verilerini de içermektedir. Bu yaklaşım, YAN-SIM yazılımının IFC standardı üzerinden

otomatik veri çekebilmesi için gerekli veri yapısını sağlamaktadır. Modelleme sürecine, binaların taşıyıcı sistemlerinin oluşturulmasıyla başlanmıştır. Safranbolu geleneksel konut mimarisinin karakteristik özelliği olan ahşap karkas-taş alaturka sistem, Revit'in parametrik modelleme araçları kullanılarak detaylı olarak modellenmiştir. Zemin kat taş yığma duvarlar, "*Wall*" kategorisinde oluşturulmuş ve duvar malzemesi olarak "Doğal Taş" tanımı yapılmıştır. Üst katlardaki ahşap karkas sistemler ise, dikey ahşap dikmelerin ve yatay ahşap hatılların ayrı ayrı modellenmesi ile temsil edilmiştir.

Malzeme tanımlamalarında, YAN-SIM veri tabanında yer alan malzeme isimlendirmeleri ile tam uyum sağlanmasına özen gösterilmiştir. Bu uyum, IFC *export* sürecinde malzeme-yangın yükü eşleşmesinin sorunsuz yapılabilmesi için kritik öneme sahiptir. Döşeme sistemlerinin modellenmesi, binaların yangın yükü açısından en kritik bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Geleneksel Safranbolu evlerinde kullanılan ahşap kirişli döşemeler, Revit'in "*Floor*" kategorisinde parametrik olarak modellenmiştir. Döşeme kesit detayları, rölöve projelerindeki bilgiler doğrultusunda oluşturulmuş; ahşap kirişler, üst ve alt kaplamalar ile ara dolgu malzemeleri katmanlarla tanımlanmıştır. Her katman için malzeme tipi, kalınlık ve yoğunluk bilgileri girilmiştir. Çatı sistemlerinin modellenmesinde, binaların karakteristik kırma çatı formuna dikkat edilmiştir. Ahşap çatı makası ve mertekleri "*Structural Framing*" olarak, kiremit kaplama ise "*Roof*" kategorisinde modellenmiştir. Çatı arası hacminin yangın yükü hesaplamalarına dahil edilmesi için, çatı katı ayrı bir "*Level*" olarak tanımlanmış ve bu seviyede yer alan tüm ahşap elemanların hacimleri otomatik olarak hesaplanabilir hale getirilmiştir. İç mekân donanımlarının modellenmesi, binaların işlevsel kullanımından kaynaklanan yangın yükünün belirlenmesi açısından önemlidir. Döşeme kaplamaları (ahşap parke, halı), duvar kaplamaları (ahşap lambri, kâğıt, kumaş), mobilyalar ve diğer yanıcı dekoratif elemanlar, Revit'in "*Generic Model*" veya "*Furniture*" kategorilerinde oluşturulmuştur. Özellikle müze işleviyle kullanılan yapılarda sergilenen ahşap eşyalar ve dokuma ürünleri, detaylı olarak modellenmiştir.

BIM modellerinin IFC formatına *export* edilmesi süreci, standardize edilmiş bir prosedür ile gerçekleştirilmiştir. Revit'in "*Export to IFC*" fonksiyonu kullanılarak, modeller IFC 2x3 "Coordination View 2.0" şemasında *export* edilmiştir. *Export* ayarlarında, tüm yapı elemanlarının geometrik bilgilerinin yanı sıra, *property* setlerinin de aktarılması sağlanmıştır. Özellikle, "*NetVolume*" ve "*Material*" özelliklerinin doğru şekilde *export* edilmesi kontrol edilmiştir. Oluşturulan BIM modellerinin doğruluğu, çeşitli yöntemlerle

test edilmiştir. İlk olarak, modelden otomatik olarak hesaplanan toplam bina alanı, proje paftalarındaki manuel hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır. Sapma oranının %2'nin altında olması kabul edilebilir sınır olarak belirlenmiştir.

4.4. YAN-SIM ile Yangın Yükü Analizi

Binaların yangın yükü analizleri, YAN-SIM yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz süreci, her bina için ayrı ayrı uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. İlk aşamada, Revit'te oluşturulan BIM modelleri IFC formatında *export* edilmiş ve YAN-SIM yazılımının BIM entegrasyonu modülü aracılığıyla sisteme yüklenmiştir. IFC dosyalarının sisteme aktarılması ile birlikte, yapı elemanlarına ait malzeme ve hacim bilgileri otomatik olarak çıkarılmıştır. *BIMProcessor* sınıfının *extract_from_ifc()* metodu, her yapı elemanını tarayarak malzeme tanımlarını ve hacim değerlerini tespit etmiştir. Sistemde tespit edilen yapı elemanları, malzeme kategorilerine göre (ahşap malzemeler, kerpiç dolgu, doğal taş, yalıtım malzemeleri vb.) otomatik olarak sınıflandırılmış ve her malzeme kategorisi için toplam hacim değerleri hesaplanmıştır.

Malzeme kütlelerinin hesaplanmasında, YAN-SIM veri tabanında tanımlı yoğunluk değerleri kullanılmıştır. Ahşap malzemeler için, BIM modelindeki malzeme tanımlarına göre (Meşe, Çam, Ladin vb.) ilgili yoğunluk değerleri otomatik olarak eşleştirilmiştir. Hesaplama süreci, manuel veri girişi gereksinimini ortadan kaldırmış ve hata payını minimize etmiştir. Mekân alanlarının belirlenmesi, IFC dosyalarındaki *IfcSpace* elemanlarından otomatik olarak çıkarılmıştır. Her bina için kat bazında mekân alanları hesaplanmış ve toplam mekân alanı metrekare cinsinden elde edilmiştir. Bu alan değerleri, yangın yükü yoğunluğu hesaplamalarında payda olarak kullanılmak üzere sisteme kaydedilmiştir. Yangın yükü hesaplaması, her malzeme için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. *FireLoadCalculator* sınıfının *calculate_fire_load()* metodu, malzeme kütlesi ile YAN-SIM veri tabanında tanımlı alt ısıl değeri çarparak yangın yükünü MJ cinsinden hesaplamıştır.

Toplam yangın yükü, her bina için tüm malzemelerin yangın yüklerinin toplamı olarak elde edilmiştir. Yangın yükü yoğunluğu ise, toplam yangın yükünün mekân alanına bölünmesi ile bulunmuştur. Malzeme bazlı yangın yükü dağılımı analizi, her bina için kritik malzemelerin belirlenmesine olanak sağlamıştır.

YAN-SIM yazılımının sunduğu detaylı hesaplama raporu, her bina için malzeme listesi, malzeme kütleleri, alt ısıl değerleri, yangın yükleri ve yüzdelik payları içeren kapsamlı bir tablo üretmiştir. Bu tablolar, yapılar arasındaki karşılaştırmalı analizin yapılmasını ve yangın güvenliği müdahalelerinin önceliklendirilmesini sağlamıştır. Ayrıca, her bina için YAN-SIM'in öneri motoru devreye girmiş ve yapı özelinde yangın güvenlik önerileri otomatik olarak üretilmiştir.

4.5. Risk Seviyelerinin Belirlenmesi

Yangın yükü yoğunluğu hesaplamalarının ardından, binaların risk seviyeleri, YAN-SIM yazılımının *get_risk_level()* metodu kullanılarak belirlenmiştir. Bu sınıflandırma, RSCIEI standardında tanımlanan yangın yükü yoğunluğu aralıklarına dayandırılmış ve sekiz seviyeli risk kategorisi sistemi uygulanmıştır. Risk belirleme süreci, her bina için hesaplanan yangın yükü yoğunluğu değerinin, standart risk skorları ile karşılaştırılması yoluyla gerçekleştirilmiştir. Her binanın yangın yükü yoğunluğu değeri, Çizelge 2.3'deki aralıklardan birine yerleştirilerek risk seviyesi belirlenmiştir.

Risk belirleme algoritması, *conditional if-elif* yapısı kullanarak yangın yükü yoğunluğunu değerlendirmektedir. Metot, risk seviyesi tanımı, risk durumu açıklaması ve görsel temsil için renk kodu çıktısı üretmektedir. Renk kodlaması, yeşilden kırmızıya doğru bir gradyan oluşturmaktadır. Bu sistemde her risk seviyesine özgü bir renk atanmış ve bu renkler CBS tabanlı görselleştirme aşamasında kullanılmak üzere kaydedilmiştir. Risk seviyesi belirlemenin yanı sıra, her bina için risk durumu tanımlaması yapılmıştır. Risk durumu, "DÜŞÜK SEVİYEDEDİR", "ORTA SEVİYEDEDİR" veya "YÜKSEK SEVİYEDEDİR" şeklinde üç kategoride ifade edilmektedir. Bu tanımlama, yangın güvenliği müdahalelerinin öncelik sıralamasının belirlenmesinde kullanılmaktadır.

YAN-SIM yazılımının öneri motoru, belirlenen risk seviyeleri doğrultusunda her bina için özelleştirilmiş yangın güvenlik önerileri üretmektedir. Öneri sistemi, üç ana kategoride organize edilmiştir: Acil önlemler, Genel koruma önerileri ve Malzeme bazlı özel çözümler. Risk seviyesine göre, öneri kategorilerinin aktif olma durumu otomatik olarak belirlenmektedir. Yüksek risk durumunda tüm öneri kategorileri aktif hale getirilirken, orta ve düşük risk seviyelerinde öncelik sıralaması yapılmaktadır. Acil önlemler kategorisi, kritik durumlar için hızlı müdahale gerektiren önerileri içermektedir. Bu kategoride tanımlı beş

temel önlem: yangın söndürücü yerleştirme, elektrik sistemlerinin kontrolü, alarm sistemi kurulumu, risk materyallerinin kaldırılması ve kaçış yollarının açık tutulmasıdır. Her öneri, *RecommendationItem* veri yapısında saklanmakta ve öncelik seviyesi, aciliyet durumu ve referans standart bilgilerini içermektedir.

4.6. CBS Tabanlı İnteraktif Risk Haritalarının Üretilmesi

Yangın risk analizlerinin mekânsal boyutta görselleştirilmesi için, YAN-SIM yazılımının CBS entegrasyonu modülü kullanılarak interaktif risk haritaları üretilmiştir. Harita üretim süreci, dört binanın tek bir harita üzerinde bütünleşik olarak gösterilmesi ve her binanın risk bilgilerine interaktif erişim sağlanması prensibine dayandırılmıştır. Coğrafi altyapı olarak OSM platformu seçilmiş ve *Folium* Python kütüphanesi ile HTML tabanlı interaktif haritalar oluşturulmuştur. Harita üretim sürecinin ilk aşamasında, Safranbolu Hükümet Sokak bölgesinin merkez koordinatları (41.25678°K, 32.68368°D) belirlenmiş ve harita görünümü bu koordinatlara odaklanmıştır. OSM'nin standart katmanı kullanılarak, tarihî dokunun sokak dokusu ve çevre yapıları ile birlikte görselleştirilmesi sağlanmıştır.

Kümülatif risk haritası yaklaşımı benimsenmiş ve *create_new_cumulative_map()* metodu ile ilk harita oluşturulmuştur. İlk binanın risk verileri haritaya eklendikten sonra, *add_building_to_existing_map()* metodu ile diğer dört bina sırasıyla haritalandırılmıştır. Bu yaklaşım, binaların tek tek eklenerek analiz sürecinin iteratif olarak izlenebilmesini ve her aşamada harita çıktısının kontrol edilebilmesini sağlamıştır. Her bina eklenmesinde, *yansim_buildings_data.json* dosyası güncellenmiş ve bina bilgileri kalıcı olarak saklanmıştır.

İşaretçi sistemi, yapıların harita üzerindeki konumlarını işaretlemek için tasarlanmıştır. *Add_single_building_(işaretçi)* metodu kullanılarak, her yapı için risk seviyesine göre renklendirilmiş işaretçiler oluşturulmuştur. İşaretçi tasarımında, 25x25 piksel boyutunda damlacık formunda *(teardrop)* bir şekil kullanılmış ve merkezinde yangın ikonu ile yangın risk vurgusu yapılmıştır. Her işaretçiye risk seviyesine karşılık gelen renk kodu atanmıştır. Her işaretçiye interaktif açılır pencere içeriği eklenmiştir. Açılır pencere tasarımında, 350 piksel genişliğinde bir bilgi penceresi oluşturulmuş ve bu pencerede bina adı, risk seviyesi, yangın yükü yoğunluğu, toplam yangın yükü, mekân alanı ve malzeme sayısı bilgileri tablo formatında sunulmuştur. Açılır pencerelerin HTML ve Basamaklı Stil Sayfaları (CSS) ile

stilize edilmesi, profesyonel ve okunabilir bir görsel sunum sağlamıştır. Kullanıcı herhangi bir işaretçi üzerine tıkladığında, ilgili binanın detaylı risk bilgileri açılır pencere ile görüntülenmektedir.

İşaretçilerin sürüklenebilir *(draggable)* özelliği aktif hale getirilmiştir. Bu özellik, kullanıcıların her işaretçiyi harita üzerinde hareket ettirerek binaların gerçek konumlarına tam olarak yerleştirmesine olanak tanımaktadır. İşaretçi konumları değiştirildiğinde, JavaScript ile yazılmış *position_save_js* kodu devreye girmekte ve yeni koordinatlar tarayıcının *localStorage* alanında saklanmaktadır. Harita yeniden açıldığında, bu kaydedilmiş konumlar otomatik olarak yüklenmekte ve işaretçiler son konumlarında görünmektedir. Harita kullanıcı arayüzüne iki ana bilgi paneli eklenmiştir. *Legend* paneli, haritanın sağ üst köşesine yerleştirilmiş ve sekiz risk seviyesini renk kodları ile gösterecek şekilde tasarlanmıştır. Her risk seviyesi için yangın yükü yoğunluğu aralıkları belirtilmiştir. Panel, *fixed* pozisyonlama ile harita üzerinde sabit konumda tutulmakta ve harita kaydırıldığında bile görünür kalmaktadır. Talimatlar paneli, haritanın sol üst köşesine yerleştirilmiştir. Bu panel, üç temel kullanım talimatı içermektedir:

(1) İşaretçileri sürükleyerek binaların üzerine yerleştirme
(2) Risk seviyelerinin renk kodlarını anlama
(3) Dosyayı kaydettikten sonra yeni binalar ekleyebilme

Panel başlığında, toplam bina sayısı dinamik olarak gösterilmektedir. Harita çıktısı HTML dosyası olarak kaydedilmiştir. Bu HTML dosyası, modern web tarayıcılarında açılabilmekte ve internet bağlantısı olmadan da tam işlevsellik göstermektedir. Tüm JavaScript kodları, CSS stilleri ve *Folium* kütüphanesi dosya içerisinde gömülü olarak bulunmaktadır. JSON dosyası ise, bina verilerinin yedeklenmesi ve veri analizi amacıyla ayrı bir dosya olarak saklanmıştır.

CBS tabanlı haritaların üretilmesi, yangın risk analizlerinin karar vericilere sunulması açısından kritik önem taşımaktadır. Görsel ve interaktif sunum, risk seviyelerinin kolayca anlaşılmasını, yapılar arasındaki karşılaştırmaların yapılmasını ve önceliklendirmenin belirlenmesini kolaylaştırmaktadır. Harita çıktıları, Safranbolu Belediyesi, AFAD, Karabük İtfaiye Dairesi ve Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu gibi paydaşlarla paylaşılarak, bölgesel yangın risk yönetimi planlamasına katkı sağlanması hedeflenmiştir.

4.7. Yangın Raporunun Oluşturulması

Binalar için gerçekleştirilen yangın yükü analizlerinin sonuçları, YAN-SIM yazılımının rapor üretim modülü kullanılarak kapsamlı yangın güvenliği raporları haline getirilmiştir. Raporlama sürecinde, *generate_detailed_report()* metodu her bina için ayrı ayrı çalıştırılmış ve standart formatta detaylı analiz raporları üretilmiştir. Rapor yapısı, akademik ve teknik dokümantasyon standartlarına uygun olarak altı ana bölümden oluşturulmuştur.

Raporların genel bilgiler bölümünde, her binanın temel tanımlayıcı bilgileri sunulmaktadır. Bu bölüm, rapor tarihî, yazılım versiyonu, binanın konumu (Safranbolu Hükümet Sokak), mekân toplam alanı, toplam yangın yükü, yangın yükü yoğunluğu, risk seviyesi ve analiz edilen malzeme sayısı bilgilerini içermektedir. Tüm bu bilgiler, otomatik olarak hesaplanan değerlerden sistematik olarak çekilmekte ve rapor formatına yerleştirilmektedir. Detaylı hesaplamalar bölümünde, her bina için malzeme bazlı yangın yükü verileri tablo formatında sunulmaktadır. Tablolar, malzeme adı, kategori, kütle, alt ısıl değer, alan, yangın yükü ve toplam içindeki pay sütunlarını içermektedir. Her malzeme için hesaplama detayları adım adım gösterilmekte ve toplam yangın yükü değerine nasıl ulaşıldığı açıklanmaktadır. Malzemelerin toplam yangın yükü içindeki yüzdelik payları, öncelikli müdahale alanlarının belirlenmesine yönelik olarak hesaplanmaktadır. Yüksek yangın yükü payına sahip malzemelerin özel analizi, raporların kritik bir bölümünü oluşturmaktadır. Toplam yangın yükünün %15'inden fazla paya sahip malzemeler için, *get_special_solutions_for_material()* metodu aracılığıyla özel çözüm önerileri üretilmektedir. Bu öneriler, malzeme kategorisine özgü olarak hazırlanmış ve uluslararası standartlara referans verilmiştir. Her öneri için uygulama yöntemi, referans standart ve beklenen etki düzeyi detaylandırılmaktadır.

Risk değerlendirmesi bölümünde, yangın yükü yoğunluğu değerlerinin RSCIEI standardına göre yorumlanması yapılmaktadır. Hesaplanan yangın yükü yoğunluğu değeri, standart risk aralıkları ile karşılaştırılmakta ve binanın hangi risk kategorisinde yer aldığı açıklanmaktadır. Risk kategorisinin tanımı, bu kategori için önerilen genel yaklaşımlar ve dikkat edilmesi gereken hususlar bu bölümde sunulmaktadır.

Yangın güvenlik önerileri, öncelik sıralaması yapılarak sunulmaktadır. *Recommendation Engine* sınıfının *get_priority_order()* metodu, tüm önerileri aciliyet durumu (Kritik, Yüksek, Orta, Düşük) ve öncelik seviyesi (1-5 arası) göz önünde bulundurarak sıralamaktadır.

Öneriler üç ana kategoride organize edilmektedir: Acil önlemler, Genel koruma önerileri ve Malzeme bazlı özel çözümler. Acil önlemler kategorisi, hızlı müdahale gerektiren kritik önerileri içermektedir. Bu kategoride, yangın söndürücü yerleştirme, elektrik sistemlerinin kontrolü, yangın alarm sistemi kurulumu, risk materyallerinin kaldırılması ve kaçış yollarının temizlenmesi gibi önlemler yer almaktadır. Her önlem için TS EN 1991-1-2 veya NFPA 909 ve 914 Standartlarına referans verilmektedir. Genel koruma önerileri, uluslararası standartlara ve tarihî bina koruma prensiplerine dayandırılmaktadır.

Malzeme bazlı özel öneriler, binanın malzeme kompozisyonuna göre özelleştirilmektedir. Ahşap malzemeler için yangın geciktirici emprenye, intumesan kaplama ve nem kontrolü sistemleri; yakıt malzemeleri için güvenli depolama üniteleri, dolgu malzemeleri için A1 sınıfı yanmaz malzeme kullanımı ve yalıtım malzemeleri için mineralli yangın dayanımlı ürün tercihi gibi öneriler sunulmaktadır. Sonuç ve değerlendirme bölümünde, analiz sonuçlarının özet yorumu yapılmaktadır. Binanın yangın yükü yoğunluğu değeri, risk kategorisi ve genel yangın güvenliği durumu değerlendirilmektedir. Tarihî binanın özgün karakterini koruyarak yangın güvenliğini artırmak için genel yaklaşım önerilmekte ve müdahale stratejilerinin ana hatları çizilmektedir. Bu bölümde, gizli boşlukların kontrolü, teknoloji entegrasyonu, elektrik tesisatlarının yenilenmesi ve restorasyon rehberlerine uyum gibi konular vurgulanmaktadır. Raporların son bölümünde, referanslar ve standartlar detaylı olarak listelenmektedir. Her standart için tam adı, yayın yılı ve ilgili madde numaraları belirtilmektedir.

Üretilen raporlar, hem dijital (TXT formatı) hem de yazdırılabilir format olarak kaydedilmektedir. Rapor dosyaları, *save_report_to_file()* metodu aracılığıyla kullanıcının belirlediği konuma kaydedilebilmekte ve yazdırma için optimize edilmiş formatta sunulmaktadır. Ayrıca, raporlar YAN-SIM yazılımının proje kaydetme özelliği (ysm formatı) kullanılarak arşivlenmekte, gelecekte güncelleme veya revize edilme ihtiyacı durumunda kolayca erişilebilir hale getirilmektedir.

4.8. Vaka İncelemesi

Safranbolu Tarihî Kent Merkezi'nde bulunan örnek dört tarihî bina üzerinde YAN-SIM yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen yangın yükü analizi süreci bu bölümde sunulmaktadır.

Analizler, BIM tabanlı malzeme tanıma ve TS EN 1991-1-2 standardına uygun hesaplama prosedürü çerçevesinde gerçekleştirilmiştir.

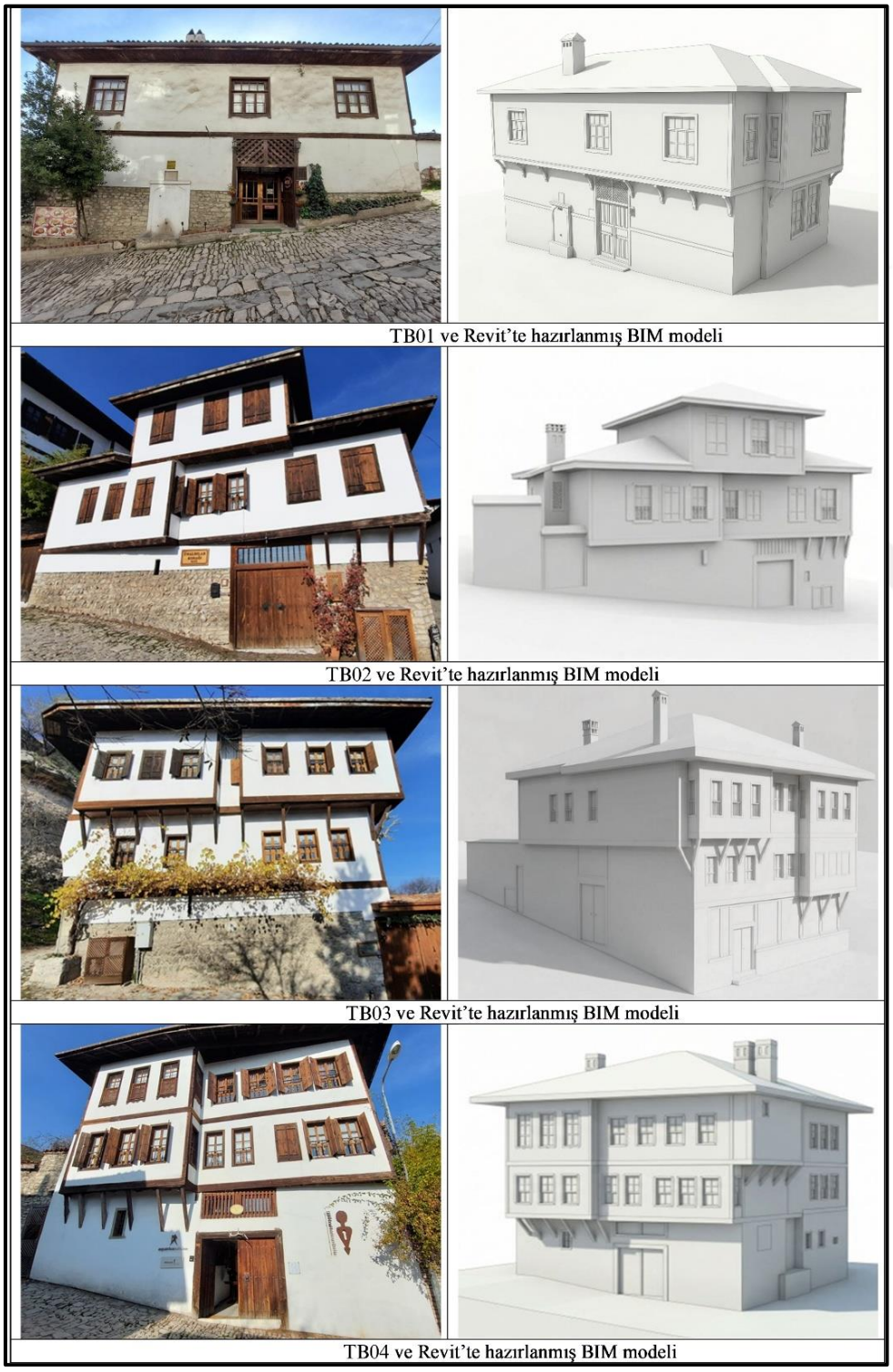
Araştırma kapsamında analiz edilen binalar, Safranbolu Çeşme Mahallesi'nde Hükümet Sokak üzerinde konumlanmış tescilli sivil mimarlık örnekleridir. Binalar, geleneksel Safranbolu konut mimarisinin temel özelliklerini yansıtmakta olup 19. yüzyıl ortalarından sonuna kadar uzanan bir dönemi temsil etmektedir. Tüm binalarda zemin kat yığma taş duvar tekniği ile inşa edilirken, üst katlar ahşap karkas arası tuğla dolgu (hımış) sistemi ile oluşturulmuştur. İncelenen binalardan biri otel ve kafeterya, ikisi konut ve otel, biri ise konut ve restoran olmak üzere karma kullanıma sahiptir. İki ve üç kattan oluşan binalar, sofa, oda, hayat ve eyvan gibi geleneksel Osmanlı konut plan elemanlarını barındırmaktadır. Dört adet tarihî bina TB0X koduna göre sırasıyla numaralandırılmıştır. Binaların temel özellikleri Çizelge 4.1'te sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Analiz edilen tarihi binaların yapısal ve işlevsel özellikleri

Tarihî Bina Kodu	Kat Sayısı	Yapım Sistemi	Mevcut İşlevi	Mimari Özellikler	İnşa Dönemi
TB01	2 kat	Zemin kat: Yığma taş duvar Üst katlar: Ahşap karkas arası dolgu (hımış)	Otel ve kafeterya	Kuzey cephede 1950 tarihli çeşme, 5 oda, 1 hayat	19. yüzyıl ortaları
TB02	3 kat	Zemin kat: Yığma taş duvar Üst katlar: Ahşap karkas arası dolgu (hımış)	Konut ve otel	Sofa etrafında düzenlenmiş odalar, hayat ve servis mekânları	19. yüzyıl sonu
TB03	3 kat	Zemin kat: Yığma taş duvar Üst katlar: Ahşap karkas arası dolgu (hımış)	Konut ve otel	7 oda, 2 eyvan, 2 sofa hayat ve servis mekânları	19. yüzyıl sonu
TB04	3 kat	Zemin kat: Yığma taş duvar Üst katlar: Ahşap karkas arası dolgu (hımış)	Konut ve restoran	6 oda, 2 sofa hayat ve servis mekânları	19. yüzyıl sonu

Binaların dijital modeli, Autodesk Revit yazılımı kullanılarak BIM metodolojisi ile oluşturulmuştur. Modelleme sürecinde, binaların mevcut durumu esas alınarak malzeme türleri, yapısal elemanlar ve mekânsal hacimler parametrik olarak tanımlanmıştır. Tamamlanan BIM modeli IFC formatına dönüştürülerek YAN-SIM yazılımına aktarılmış ve

yazılımın otomatik malzeme tanıma modülü aracılığıyla yangın yükü hesaplamalarında kullanılacak hacim ve malzeme bilgileri sisteme entegre edilmiştir. Bu süreç, geleneksel manuel ölçüm ve hesaplama yöntemlerine kıyasla daha yüksek doğruluk ve tutarlılık sağlamıştır (Resim 4.1).



Resim 4.1. Analiz edilen tarihi binaların mevcut durumu ve BIM modelleri

YAN-SIM, hesaplama sürecinin tamamlanmasıyla birlikte otomatik olarak detaylı bir analiz raporu üretmektedir (Ek-1, Ek-2, Ek-3 ve Ek-4). Rapor, binaya ilişkin temel bilgileri, malzeme bazlı yangın yükü hesaplamalarını, toplam yangın yükü değerini, yangın yükü yoğunluğunu ve risk kategorisini sistematik bir formatta sunmaktadır. Yazılım, her bir malzeme için kütle, alt ısıl değer, alan ve yangın yükü bilgilerini ayrıştırarak detaylı hesaplama sürecini raporlamaktadır. Oluşturulan rapor, yüksek yangın yükü payına sahip malzemeleri otomatik olarak tespit ederek önceliklendirme yapmakta ve hesaplamalarda kullanılan uluslararası standartları (TS EN 1991-1-2, UNESCO-ICOMOS, NFPA 909-914) referans olarak listelemektedir. Bu yapı, yazılımın sadece hesaplama işlevi değil, aynı zamanda karar destek sistemi olarak çalışmasını sağlamaktadır.

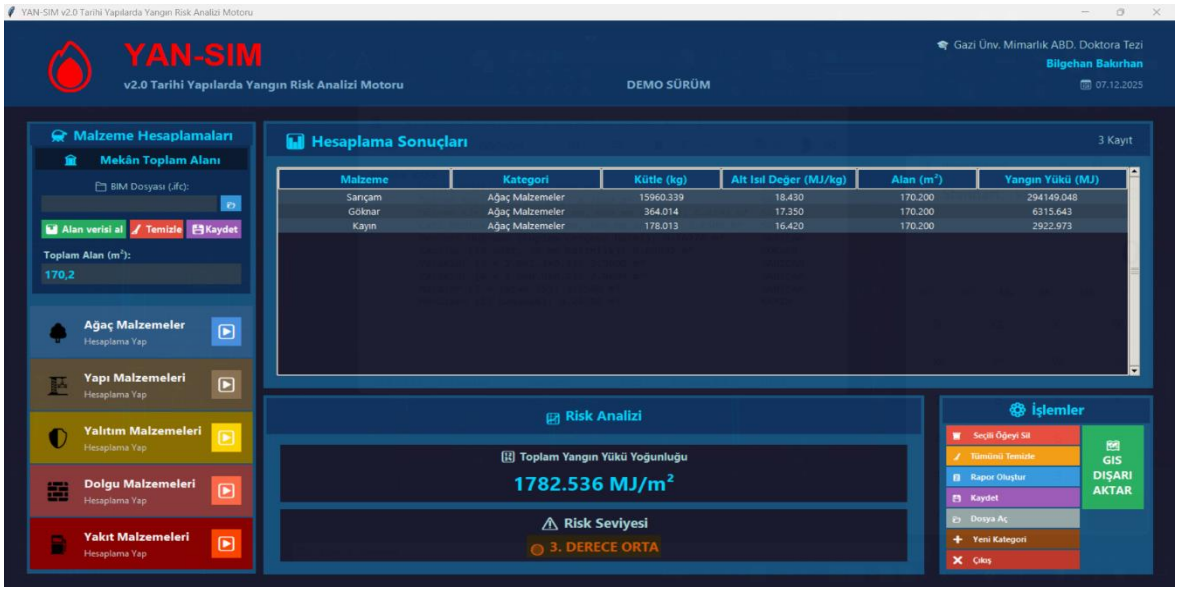
5. BULGULAR

Bu bölümde, YAN-SIM yazılımı kullanılarak incelenen dört adet tarihî binaya ait yangın yükü yoğunluğu değerleri karşılaştırmalı olarak mukayese edilmiştir. Bulgular, grafikler ve tablolar aracılığıyla sunulmuş; kullanılan ahşap türleri ve miktarlarının yangın yükü üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur.

İlk olarak TB01'in toplam alanı 170,2 m² olarak belirlenmiştir. BIM modelinden elde edilen veriler doğrultusunda binada üç farklı ahşap malzeme türü tespit edilmiş ve her bir malzemenin kütlesi ve alt ısıl değeri hesaplanmıştır. Binanın toplam yangın yükü 303.387,66 MJ olarak hesaplanmış olup, bu değerin mekân alanına bölünmesiyle elde edilen yangın yükü yoğunluğu şu şekilde bulunmuştur (Eş. 5.1):

$$Q_{fd} = 303.387{,}66\ \text{MJ} \div 170{,}2\ \text{m}^2 = 1.782{,}536\ \text{MJ/m}^2 \quad (5.1)$$

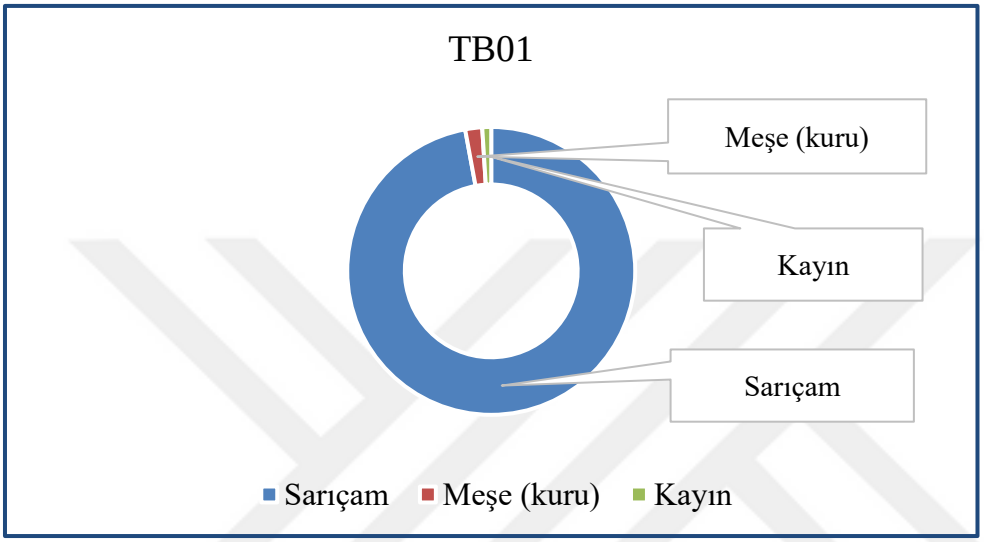
Bu değer, RSCIEI standardında tanımlanan risk kategorileri referans alındığında "3. Derece Orta" sınıfına (1700-3400 MJ/m² aralığı) karşılık gelmektedir. TB01'e ait toplam yangın yükü yoğunluğu ve risk seviyesi aşağıda belirtilmiştir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. TB01'in yangın yükü yoğunluğu ve risk seviyesi

TB01'in ahşap türlerine göre yangın yükü dağılımı incelendiğinde, sarıçamın %97 oranıyla yangın yükünün neredeyse tamamını oluşturduğu görülmektedir. Binada kullanılan

15.960,34 kg sarıçam, yüksek alt ısıl değeriyle (18,43 MJ/kg) birleşerek 294.144,87 MJ yangın yükü oluşturmaktadır. Meşe (kuru) %2 ve kayın %1 oranlarıyla toplam yangın yüküne daha az düzeyde katkı sağlamaktadır. Bu dağılım, binanın yangın riskinin büyük ölçüde sarıçama bağlı olduğunu ve bu türe yönelik koruyucu tedbirlerin kritik önem taşıdığını göstermektedir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. TB01'e ait ahşap türlerinin yangın yükü dağılımı

İkinci bina olan TB02'ye ait toplam alan 228,37 m² olarak belirlenmiştir. BIM modelinden elde edilen veriler doğrultusunda binada dört farklı ahşap malzeme türü tespit edilmiş ve her bir malzemenin kütlesi ve alt ısıl değeri hesaplanmıştır. Binanın toplam yangın yükü 575.376,69 MJ olarak hesaplanmış olup, bu değerin mekân alanına bölünmesiyle elde edilen yangın yükü yoğunluğu şu şekilde bulunmuştur (Eş. 5.2):

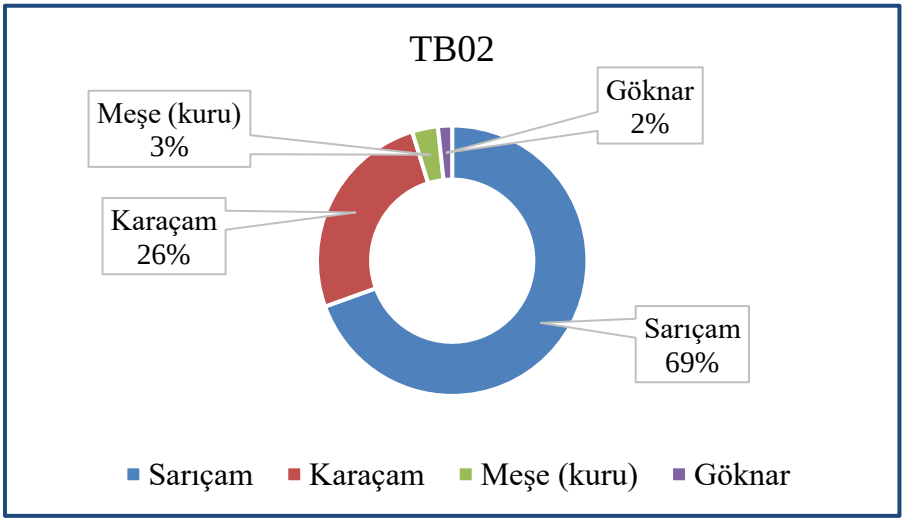
$$Q_{fd} = 575.376{,}69\ \text{MJ} \div 228{,}37\ \text{m}^2 = 2.519{,}493\ \text{MJ/m}^2 \qquad (5.2)$$

Bu değer, RSCIEI standardında tanımlanan risk kategorileri referans alındığında "3. Derece Orta" sınıfına (1700-3400 MJ/m² aralığı) karşılık gelmektedir. TB02 binasına ait toplam yangın yükü yoğunluğu ve risk seviyesi aşağıda belirtilmiştir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. TB02'nin yangın yükü yoğunluğu ve risk seviyesi

TB02'ye ait ahşap türlerine göre yangın yükü dağılımı incelendiğinde, sarıçamın %69 oranıyla binanın yangın yükünün yaklaşık üçte ikisini oluşturduğu görülmektedir. Binada kullanılan 21.762,00 kg sarıçam, yüksek alt ısıl değeriyle (18,43 MJ/kg) birleşerek 401.051,66 MJ yangın yükü oluşturmaktadır. Karaçam %26 oranıyla ikinci en büyük katkıyı sağlamakta ve sarıçamla birlikte toplam yangın yükünün %95'ini teşkil etmektedir. Meşe (kuru) %3 ve göknar %2 oranlarıyla toplam yangın yüküne en az katkıyı sağlamaktadır. Bu dağılım, binanın yangın riskinin büyük ölçüde sarıçam ve karaçam gibi yüksek alt ısıl değerli iğne yapraklı ağaçlara bağlı olduğunu ve bu türlere yönelik koruyucu tedbirlerin kritik önem taşıdığını göstermektedir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. TB02'ye ait ahşap türlerinin yangın yükü dağılımı

Üçüncü bina olan TB03'e ait toplam alan 339,40 m² olarak belirlenmiştir. BIM modelinden elde edilen veriler doğrultusunda binada dört farklı ahşap malzeme türü tespit edilmiş ve her bir malzemenin kütlesi ve alt ısıl değeri hesaplanmıştır. Binanın toplam yangın yükü 660,086,389 MJ olarak hesaplanmış olup, bu değerin mekân alanına bölünmesiyle elde edilen yangın yükü yoğunluğu şu şekilde bulunmuştur (Eş. 5.3):

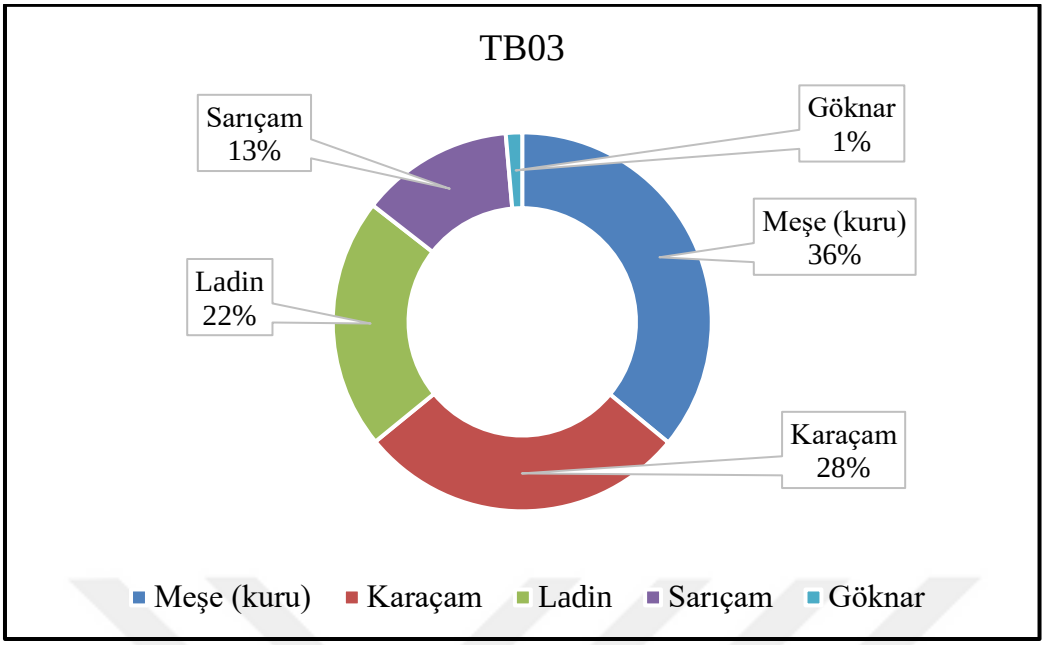
$$Q_{fd} = 660,086,389 \text{ MJ} \div 339,4 \text{ m}^2 = 1.944,863 \text{ MJ/m}^2 \quad (5.3)$$

Bu değer, RSCIEI standardında tanımlanan risk kategorileri referans alındığında "3. Derece Orta" sınıfına (1700-3400 MJ/m² aralığı) karşılık gelmektedir. TB03'e ait toplam yangın yükü yoğunluğu ve risk seviyesi aşağıda belirtilmiştir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. TB03'ün yangın yükü yoğunluğu ve risk seviyesi

TB03'ün ahşap türlerine göre yangın yükü dağılımı incelendiğinde, meşe (kuru) %36 oranıyla binanın en yüksek yangın yükünü oluşturan ahşap türü olarak öne çıkmaktadır. Binada kullanılan 14.707,00 kg meşe, 238.253,40 MJ yangın yükü oluşturmaktadır. Karaçam %28 ve ladin %22 oranlarıyla sırasıyla ikinci ve üçüncü en büyük katkıyı sağlamaktadır. Sarıçam %13 ve göknar %1 oranlarıyla toplam yangın yüküne daha sınırlı katkı sağlamaktadır. Bu dağılım, TB03'ün diğer incelenen binalardan farklı olarak daha dengeli bir ahşap türü kompozisyonuna sahip olduğunu ve yangın riskinin tek bir türe bağlı olmayıp dört farklı ahşap türü arasında dağıldığını göstermektedir (Şekil 5.6).

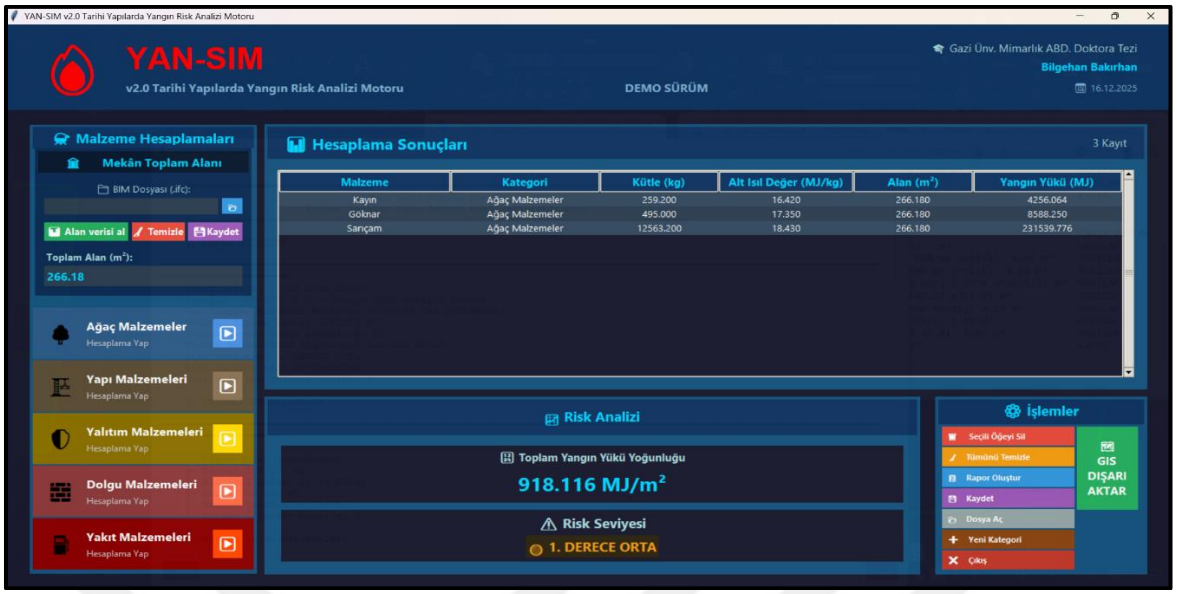


Şekil 5.6. TB03'e ait ahşap türlerinin yangın yükü dağılımı

Dördüncü bina olan TB04'e ait toplam alan 266,18 m² olarak belirlenmiştir. BIM modelinden elde edilen veriler doğrultusunda binada üç farklı ahşap malzeme türü tespit edilmiş ve her bir malzemenin kütlesi ve alt ısıl değeri hesaplanmıştır. Binanın toplam yangın yükü 244.384,09 MJ olarak hesaplanmış olup, bu değerin mekân alanına bölünmesiyle elde edilen yangın yükü yoğunluğu şu şekilde bulunmuştur (Eş. 5.4):

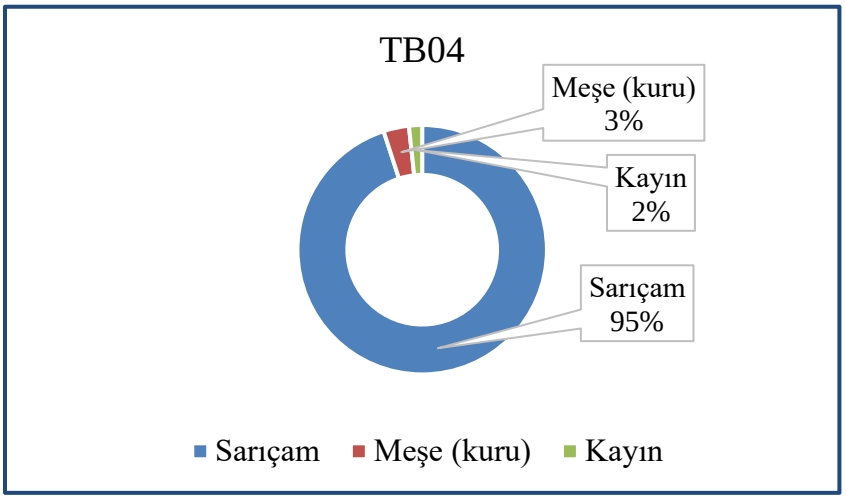
$$Q_{fd} = 244.384{,}09\ \text{MJ} \div 266{,}18\ \text{m}^2 = 918.116\ \text{MJ/m}^2 \quad (5.4)$$

Bu değer, RSCIEI standardında tanımlanan risk kategorileri referans alındığında "1. Derece Orta" sınıfına (850-1275 MJ/m² aralığı) karşılık gelmektedir. TB04'e ait toplam yangın yükü yoğunluğu ve risk seviyesi aşağıda belirtilmiştir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. TB04'ün yangın yükü yoğunluğu ve risk seviyesi

TB04'ün ahşap türlerine göre yangın yükü dağılımı incelendiğinde, sarıçamın %95 oranıyla binanın yangın yükünün neredeyse tamamını oluşturduğu görülmektedir. Binada kullanılan 12.563,20 kg sarıçam, yüksek alt ısıl değeriyle birleşerek 231.539,78 MJ yangın yükü oluşturmaktadır. Meşe (kuru) %3 ve kayın %2 oranlarıyla toplam yangın yüküne daha az düzeyde katkı sağlamaktadır. Bu dağılım, binanın yangın riskinin büyük ölçüde sarıçama bağlı olduğunu ve TB01'e benzer şekilde tek bir ahşap türünün baskın olduğu homojen bir risk profili oluşturduğunu göstermektedir. Binadaki ahşap türü çeşitliliğinin düşük olması, yangın yayılma hızı ve yangın davranışı açısından sarıçama yönelik koruyucu tedbirlerin kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. TB04'e ait ahşap türlerinin yangın yükü dağılımı

Elde edilen veriler sonucunda belirlenen binaların taban alanları, yangın yükü yoğunluğu değerleri ve risk seviyeleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Binaların taban alanı, yangın yükü yoğunluğu ve risk sınıflandırması

Tarihî Bina Kodu	Taban Alanı (m^2)	Toplam Yangın Yükü Yoğunluğu (MJ/m^2)	Risk Seviyesi
TB01	170,20	1,782536	3. Derece – Orta
TB02	228,37	2,519493	3. Derece – Orta
TB03	339,40	1,944863	3. Derece – Orta
TB04	266,18	918116	1. Derece – Orta

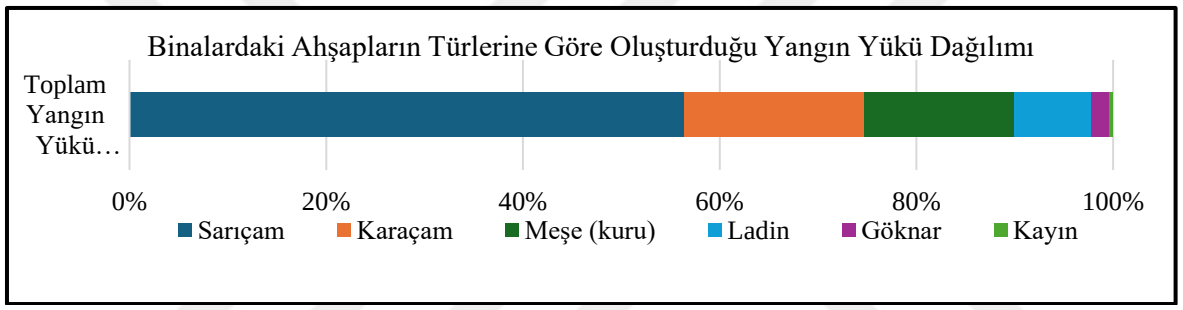
Sonuçlar incelendiğinde, binalar arasında yangın yükü yoğunluğu bakımından belirgin farklılıklar bulunmaktadır. TB02, yaklaşık 2,519 MJ/m^2 değeri ile en yüksek yangın yükü yoğunluğuna sahip bina olarak öne çıkmaktadır. Buna karşılık TB04**,** 918 MJ/m^2 değeri ile diğer binalara kıyasla daha düşük bir yangın yüküne sahiptir. Ayrıca incelenen binalarda kullanılan ahşap malzemelerin türleri, miktarları ve enerjisel özelliklerinin yangın yükü üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla, ahşap türlerine ait kütle ve alt ısıl değerler Çizelge 5.2'de sunulmuştur.

Çizelge 5.2. İncelenen binalarda kullanılan ahşap türlerinin kütleleri ve alt ısıl değerlerine göre dağılımı

Ahşap Türü	Alt Isıl Değer (MJ/kg)	TB01 (kg)	TB02 (kg)	TB03 (kg)	TB04 (kg)
Sarıçam	18,43	15,96034	21,76200	4,68000	12,56320
Karaçam	18,36	–	8,00280	10,04120	–
Göknar	17,35	364,01	549,00	535,50	495,00
Kayın	16,42	178,01	–	–	259,20
Meşe (kuru)	16,20	–	1,11750	14,70700	–
Ladin	16,52	–	–	8,59160	–
Toplam Ahşap Kütlesi (kg)	–	16,50236	31,43130	38,55530	13,31740

Bu bulgular, binaların yangın yükü yoğunluklarının yalnızca toplam ahşap miktarı veya yapı büyüklüğü ile açıklanamayacağını ortaya koymaktadır. Özellikle sarıçam ve karaçam gibi alt ısıl değeri yüksek ahşap türlerinin baskın olduğu binalarda, toplam ahşap kütlesi görece daha düşük olsa dahi yangın yükü yoğunluğunun artabildiği görülmektedir. Örneğin,

TB02'de sarıçam (%69,2) ve karaçam (%25,5) toplam ahşap kütlesinin %94,7'sini oluştururken, 31.431,30 kg toplam ahşap kütlesi ile 2.519,493 MJ/m² yangın yükü yoğunluğuna ulaşmaktadır. Buna karşılık, TB03'te meşe (kuru) (%38,1) ve ladin (%22,2) gibi alt ısıl değeri daha düşük türlerin daha yüksek oranda kullanıldığı ve 38.555,30 kg ile en yüksek toplam ahşap kütlesine sahip olmasına rağmen yangın yükü yoğunluğunun 1.944,863 MJ/m² ile daha sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, TB04'te sarıçam baskın tür (%94,3) olarak kullanılmış ve 13.317,40 kg toplam ahşap kütlesine karşın 918.116 MJ/m² yangın yükü yoğunluğu elde edilmiştir. Bu durum, binaların yangın riskinin yalnızca büyüklükleriyle değil, kullanılan malzeme türleri ve bu malzemelerin alt ısıl değerleri ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9. Binalardaki ahşapların türlerine göre oluşturduğu yangın yükü dağılımı

YAN-SIM yazılımı, hesaplanan yangın yükü yoğunluğu değerlerini CBS altyapısı ile entegre ederek incelenen binaların mekânsal risk dağılımını görselleştirmiştir. Yazılımın ürettiği kümülatif risk haritası, dört tarihî binanın konumsal ilişkilerini ve yangın risk seviyelerini renk kodlaması ile sunmaktadır. Bu harita, binaların birbirine olan yakınlıkları göz önüne alındığında, olası bir yangın senaryosunda risk yayılımının değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Harita üzerinde TB02, 2.519,493 MJ/m² yangın yükü yoğunluğu ile en yüksek risk seviyesini temsil etmekte ve turuncu renk ile işaretlenmektedir. Bunu 1.944,863 MJ/m² ile TB03 ve 1.782,536 MJ/m² ile TB01 takip etmektedir. TB04 ise 918,116 MJ/m² yangın yükü yoğunluğu ile en düşük risk seviyesine sahiptir. Binaların tarihî kent dokusunda yoğun olarak kümelenmiş konumları, yangın riskinin sadece tekil yapı ölçeğinde değil, kentsel ölçekte de değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır (Harita 5.1).



Harita 5.1. İncelenen tarihi yapıların YAN-SIM yazılımı ile oluşturulmuş kümülatif yangın risk haritası

YAN-SIM yazılımı, her bir tarihî bina için hesaplanan yangın yükü verilerini malzeme bazında analiz ederek özgün ve binaya özel çözüm önerileri üretmiştir. Bu öneriler, binalardaki yüksek yangın yükü payına sahip malzemeleri önceliklendirerek, sınırlı kaynaklarla maksimum etki sağlayacak müdahale stratejileri geliştirmeyi amaçlamaktadır.

TB01 için, toplam yangın yükünün %97'sini oluşturan sarıçam malzemesi kritik risk faktörü olarak belirlenmiştir. Yazılımın ürettiği çözüm paketinde, sarıçam yüzeylere yangın geciktirici intumesan emprenye işleminin uygulaması birinci öncelik olarak önerilmektedir. Bu uygulama, malzemenin tutuşma sıcaklığını yükselterek yangın başlangıç riskini azaltmayı hedeflemektedir. Ayrıca, ahşap unsurlarda nem kontrolünün sağlanması (%15-20 aralığında) ve özgün karakteri bozmayan şeffaf yangın geciktirici vernik uygulaması önerilmektedir (Ek-1).

TB02 analizinde, sarıçam (%69,7) ve karaçam (%25,5) olmak üzere iki yüksek riskli malzeme tespit edilmiştir. Bu iki malzeme toplam yangın yükünün %95,2'sini oluşturmaktadır. YAN-SIM, her iki malzeme için ayrı çözüm paketleri üretmiş ve öncelikle sarıçam, ardından karaçam için yangın geciktirici uygulamaların yapılmasını önermiştir. Bu sıralama, malzemelerin yangın yüküne katkı oranlarına göre belirlenmiş olup, müdahale önceliklerinin bilimsel verilerle desteklenmesini sağlamaktadır (Ek-2).

TB03 için yazılımın ürettiği çözüm önerileri, binanın daha dengeli ahşap türü kompozisyonunu yansıtmaktadır. Meşe (kuru) %36,1, karaçam %27,9 ve ladin %21,5 oranlarıyla yangın yüküne katkı sağlamaktadır. YAN-SIM, bu üç malzeme için ayrı müdahale stratejileri önermiş ve yangın geciktirici uygulamaların tüm ahşap türlerini kapsayacak şekilde planlanmasını gerekli görmüştür. Bu yaklaşım, binanın heterojen malzeme yapısının getirdiği karmaşık risk profilini yönetmeye yöneliktir (Ek-3).

TB04 analizi, TB01'e benzer şekilde sarıçamın baskın olduğu (%94,7) bir risk profili ortaya koymuştur. Yazılım, bu bina için de sarıçam malzemesine odaklanan yoğunlaştırılmış bir müdahale stratejisi önermiştir (Ek-4).

Tüm binalar için yazılımın ortak önerileri arasında; gizli boşlukların düzenli kontrolü ve yangın durdurucu dolgularla korunması, duman dedektörü ve ısı algılayıcı sistemlerin estetik bütünlüğü bozmadan entegrasyonu, elektrik tesisatlarının yangına dayanıklı borular ve izolasyon malzemeleriyle yenilenmesi yer almaktadır. Bu öneriler, TS EN 1991-1-2 (Eurocode 1), UNESCO-ICOMOS tarihî binaların korunması kılavuzları, TS EN 54 yangın algılama sistemleri standardı ve NFPA 909-914 yangın güvenliği standartları çerçevesinde yapılandırılmıştır.

YAN-SIM yazılımının ürettiği bu çözüm önerileri, tarihî binaların özgün karakterini koruma ilkesiyle yangın güvenliğini artırma gerekliliğini dengelemektedir. Her bir öneri, binanın mimari ve tarihî değerlerine müdahale etmeden uygulanabilir niteliktedir ve koruma kurulu onayı süreçlerinde referans alınabilecek teknik bir altyapı sunmaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu araştırma, tarihi yapılarda yangın güvenliğinin değerlendirilmesi için BIM tabanlı, malzeme odaklı ve CBS entegreli bir metodoloji geliştirmeyi ve bu metodolojinin yazılım aracına dönüştürülerek uygulanmasını amaçlamıştır. Araştırma kapsamında geliştirilen YAN-SIM yazılımı, BIM modellerinden otomatik veri çıkarımı, malzeme bazlı yangın yükü hesaplama ve CBS tabanlı mekânsal risk analizi işlevlerini entegre ederek tarihi yapıların yangın güvenlik değerlendirmesinde yenilikçi bir yaklaşım sunmuştur.

BIM teknolojisinin tarihî binalarda yangın güvenliği analizlerine entegrasyonu, geleneksel manuel ölçüm ve hesaplama yöntemlerine kıyasla önemli avantajlar sağlamıştır. IFC Open Shell modülü aracılığıyla BIM modellerinden alan, hacim ve malzeme bilgilerinin otomatik çıkarımı hem zaman tasarrufu sağlamış hem de insan kaynaklı hata olasılığını minimize etmiştir. Bu durum, yazılımın özellikle kapsamlı envanter çalışmaları gerektiren tarihî kent merkezlerinde ölçeklenebilir bir çözüm sunabileceğini göstermektedir. Yazılımın ürettiği CBS tabanlı interaktif haritalar, yangın risk durumunu görselleştirmekte ve yerel yönetimlere stratejik planlama için etkili bir araç sunmaktadır.

Araştırmanın en önemli katkısı, tarihî binalarda yangın güvenliğinin değerlendirilmesinde subjektif ve deneyime dayalı yaklaşımlardan, standart tabanlı ve tekrarlanabilir nicel yöntemlere geçişi kolaylaştıran bir altyapı sunmasıdır. Yazılımın otomatik olarak ürettiği detaylı raporlar, malzeme bazlı yangın yükü hesaplamalarını, risk kategorilerini ve uygulamaya yönelik çözüm önerilerini içermektedir. Özellikle yüksek yangın yükü payına sahip malzemelerin otomatik olarak tespit edilip, bu malzemelere özgü müdahale stratejileri üretilmesi, koruma otoritelerinin bilinçli karar vermesini desteklemektedir.

Gelecek çalışmalarda, Safranbolu Tarihî Kent Merkezi'nde yer alan tüm korunması gerekli binaların envanter çalışması gerçekleştirilerek, ilçe bazında kümülatif risk haritalarının üretilmesi ve bölgesel koruma stratejilerinin geliştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, yazılımın BIM modellerine bağımlılığı, henüz dijital modellemesi yapılmamış tarihî binalarda doğrudan uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Bu bağlamda, mevcut rölöve çalışmalarının BIM formatına dönüştürülmesi veya yeni rölövelerin doğrudan BIM tabanlı yöntemlerle gerçekleştirilmesi, YAN-SIM gibi yazılımların yaygın kullanımını kolaylaştıracaktır.

Yazılımın gelecekteki geliştirilmesi açısından, yapay zekâ tabanlı malzeme tanıma modüllerinin entegrasyonu önerilmektedir. Makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak, geçmiş yangın olayları verisi ile yapı özellikleri arasındaki ilişkiler modellenebilir ve tahmine dayalı risk değerlendirme sistemleri geliştirilebilir. Ayrıca, yazılımın yangın simülasyon modülleri ile entegrasyonu, statik yangın yükü hesaplamalarının ötesine geçerek dinamik yangın davranışı modellemesine olanak sağlayabilir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) tabanlı duman yayılımı ve sıcaklık dağılımı analizleri, YAN-SIM platformuna entegre edilerek daha kapsamlı risk senaryoları üretilebilir.

Uygulama süreçlerine yönelik olarak, yerel yönetimlerin ve koruma bölge kurullarının YAN-SIM yazılımını kullanabilmesi için kapasite geliştirme programları düzenlenmelidir. Belediyeler bünyesinde kurulacak yangın risk envanter birimleri, yazılım desteğiyle periyodik risk değerlendirmeleri gerçekleştirebilir. Yazılım çıktılarının yangın söndürme ekipleri ile paylaşılması, acil müdahale planlarının geliştirilmesinde etkili olabilir. Risk haritalarında yüksek yangın yükü tespit edilen yapıların konumları, itfaiye istasyonlarının stratejik planlamasında ve müdahale önceliklerinin belirlenmesinde referans olarak kullanılabilir.

Politika geliştirme açısından, tarihî binalarda yangın güvenliği değerlendirmelerinin periyodik olarak yapılmasını zorunlu kılan yasal düzenlemeler geliştirilmelidir. YAN-SIM gibi standart tabanlı yazılımların kullanımı, değerlendirme süreçlerinde objektiflik ve tutarlılık sağlayabilir. Tarihî binalarda yangın güvenliği sağlamaya yönelik teşvik mekanizmaları oluşturulmalı ve yapı sahiplerine, yangın geciktirici emprenye uygulamaları, modern algılama sistemlerinin kurulması ve elektrik tesisatlarının yenilenmesi gibi müdahalelerde vergi indirimi veya hibe desteği sağlanmalıdır. Ulusal düzeyde tarihî bina yangın risk envanterinin oluşturulması stratejik bir önceliktir. Kültür ve Turizm Bakanlığı koordinasyonunda, UNESCO Dünya Mirası Listesi'nde yer alan tüm yerleşimlerde risk haritalama çalışmaları başlatılabilir.

Yazılımın teknik geliştirilmesi açısından, mobil uygulama desteği ve bulut tabanlı çok kullanıcılı sürümün geliştirilmesi önerilmektedir. Sahada tablet veya akıllı telefon ile hızlı değerlendirme yapabilme kapasitesi, özellikle acil durum senaryolarında kullanışlı olabilir. Bulut tabanlı sistem, belediyeler, koruma kurulları, üniversiteler ve sivil toplum kuruluşları arasında veri paylaşımını ve iş birliğini kolaylaştırabilir. Gerçek zamanlı sensör verilerinin

yazılıma entegrasyonu, tarihî binalarda kurulu Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı izleme sistemlerinden gelen sıcaklık, nem ve duman verileri ile risk değerlendirmelerinin dinamik olarak güncellenmesini sağlayabilir.

Disiplinler arası iş birliği, tarihî binalarda yangın güvenliğinin sağlanmasında kritik öneme sahiptir. Mimarlık, restorasyon, yangın güvenliği mühendisliği, malzeme bilimi ve bilişim teknolojileri disiplinlerinin entegrasyonunu gerektiren bu alanda, üniversitelerde ortak araştırma laboratuvarlarının kurulması önerilmektedir. Uluslararası düzeyde, Avrupa ülkelerinde kullanılan benzer yazılımlar ve metodolojiler incelenerek, YAN-SIM'in uluslararası standartlarla uyumluluğu artırılabilir. ICOMOS ve UNESCO gibi uluslararası kuruluşlarla iş birliği, yazılımın küresel ölçekte tanıtımını ve farklı kültürel bağlamlarda test edilmesini sağlayabilir.

Sonuç olarak, YAN-SIM yazılımı tarihî binalarda yangın risk değerlendirmesi için etkili, hızlı ve standart tabanlı bir çözüm sunmaktadır. Yazılımın modüler yapısı ve genişletilebilir mimarisi, gelecekte ek özelliklerin entegre edilmesine olanak tanımaktadır. Bu araştırma, dijital teknolojilerin kültürel miras koruma süreçlerinde etkin kullanımına katkı sağlamakta ve tarihi kent merkezlerinde yangın güvenliği yönetimi için yenilikçi bir yaklaşım ortaya koymaktadır. Önerilen geliştirmeler ve uygulamaların hayata geçirilmesi, yazılımın kapasitesini artıracak, yaygın kullanımını kolaylaştıracak ve nihayetinde kültürel mirasın korunmasına daha etkili katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Bakırhan, B. ve Beyhan, F. (2021, 18-19 Eylül). *Tarihî çevrelerde yangın risk yönetimi: Safranbolu tarihî çarşı örneği*. 2. Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi, İstanbul, 284–292.

2. ICOMOS (1994, 1-6 November). *The nara document on authenticity.* Nara Conference on Authenticity in Relation to the World Heritage Convention, Nara, Japonya, 3-14.

3. Uğurlu, E. ve Böke, P., (2009). Tarihî yapıların özgün değerleri ile korunması. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*, 1(2), 17-19.

4. Ferreira, T. M. (2019). Notre Dame Cathedral: Another case in a growing list of heritage landmarks destroyed by fire. *Fire*, 2(2), 20-21.

5. Santhiago, R. (2021). On fire, under fire: Public Reactions to the Destruction of the Brazilian National Museum. In J. Wojdon and D. Wiśniewska (Eds.), *Public in public history* (1st ed.). London: Routledge, 71–88.

6. Sekizawa, A. ve Goto, O. (2025). challenges in fire protection for cultural property buildings based on the lessons from the Shurijo Castle fire. *Fire Technology*, 61(1), 1079–1097.

7. Bakırhan, B. ve Beyhan, F. (2023, 14-15 September). *Investigation of the ımpacts of firefighting approaches on historical building and environment after the fire*. III. International Architectural Sciences and Applications Symposium, İtalya, 4-21.

8. Bakırhan, B. (2023, 16-18 April). *Examination of fire safety in historical buildings in the context of national and ınternational regulations.* 3rd International Civil Engineering & Architecture Conference, Trabzon, 361-369.

9. Bakırhan, B. ve Beyhan, F., (2025). Quantitative fire load assessment in historic buildings: A material-based fire load analysis of Unesco world heritage site in Safranbolu, Türkiye, *Computational Research Progress in Applied Science and Engineering (Crpase): Transactions of Applied Sciences*, 11(3), 1-9,

10. İnternet: British Standards Institution (2013). BS 7913:2013 Guide to the Conservation of Historic Buildings. Londra. URL-1: https://framptons-planning.com/wp-content/uploads/2021/03/CD-H23-BSI-Guide-to-the-Conservation-of-Historic-Buildings-2013.pdf Son Erişim Tarihi: 10.09.2021.

11. İnternet: Resmî Gazete (2009). URL-2: https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2009/09/20090909-10.htm Son Erişim Tarihi: 08.09.2023.

12. Barthelemy, J. (2023). Avoiding predictable surprises: Lessons from the fire at Notre Dame de Paris. *Business Horizons,* 66(3), 289–298.

13. Scottish Fire and Rescue Service (SFRS) (2022). Fire investigation report. *Glasgow School of Art,* Yorkshire, 4-21.

14. Escobar, H. (2018). In a “foretold tragedy,” fire consumes Brazil museum. *Science*, 361(6406), 960-961.

15. Suzuki, S. ve Manzello, S. L. (2022). Firebrands generated in Shurijo castle fire on October 30th, 2019. *Fire Technology*, 58(2), 777-791.

16. Gündoğdu, D., Ünal, G. Ü. ve Ünal, Z. G. (2011). Kültür mirasımız afet risklerine ne kadar hazırlıklı: Haydarpaşa Garı yangını. *Mimar İstanbul,* 4(1), 12-15.

17. Daily Sabah. (2019). Restoration of 147-Year-Old Galatasaray University Building Completed 6 Years After Blaze Burned it Down. URL-3: https://www.dailysabah.com/istanbul/2019/05/24/restoration-of-147-year-old-galatasaray-university-building-completed-6-years-after-blaze-burned-it-down Son Erişim Tarihi: 08.09.2025.

18. Kee, T., Qiu, B. ve Du, Q. (2025). An application of AHP-based fire vulnerability assessment for 20th century mountainous built heritage. *NPJ Heritage Science*, 13(1), 350-351.

19. Li, G., Yuan, H., Shan, Y., Lin, G., Xie, G. ve Giordano, A. (2023). Architectural cultural heritage conservation: Fire risk assessment of ancient vernacular residences based on FAHP and EWM. *Applied Sciences*, 13(22), 12368.

20. Yaman, M. ve Kurtay, C. (2025). Fire safety in historic buildings: A case study using the qualitative risk analysis method. *Budownictwo i Architektura*, 24(1), 63–78.

21. Jaďuďová, J., Osvaldová, L. M., Gašpercová, S. ve Řehák, D. (2025). The analysis of fire protection for selected historical buildings as a part of crisis management: Slovak case study. *Sustainability*, 17(15), 6743-6744.

22. Arborea, A., Mossa, G. and Cucurachi, G. (2014). Preventive fire risk assessment of Italian architectural heritage: An index based approach. *Key Engineering Materials*, 628(2), 27–33.

23. De Lourdes Ferreira Minervino, B., Calmeiro, C. C., Von Kruguer, P. G. ve Rodrigues, J. P. C. (2025). Fire risk analysis: A proposal for historic buildings in Brazil. *International Journal of Architectural Heritage*, 19(4), 542–550.

24. Salazar, L. G. F., Romão, X. ve Paupério, E., (2021). Review of vulnerability indicators for fire risk assessment in cultural heritage. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 60(1), 102286.

25. Garcia-Castillo, E., Paya-Zaforteza, I. ve Gernay, T. (2025). Probabilistic risk assessment of historic timber flooring systems subjected to fire. *Developments in the Built Environment*, 22(1), 100659.

26. Petrini, F., Aguinagalde, A. ve Bontempi, F. (2022). Structural fire risk for heritage buildings by the performance-based engineering format. *International Journal of Architectural Heritage*, 17(7), 1171–1194.

27. Chen, J., Ding, L. ve Ji, J. (2023). A combined method to build Bayesian network for fire risk assessment of historical buildings. *Fire Technology*, 59(1), 3525–3563.

28. Lei, Y., Shen, Z., Tian, F., Yang, X., Wang, F., Pan, R., Wang, H., Jiao, S. ve Kou, W. (2023). Fire risk level prediction of timber heritage buildings based on entropy and XGBoost. *Journal of Cultural Heritage*, 63(1), 11–22.

29. Liao, D., Zhuo, X. ve Tao, J. (2024). Dynamic fire risk assessment for compact historic villages based on improved FRAME method. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 114(1), 104935.

30. Kincaid, S. (2022). Fire prevention in historic buildings – approaches for safe practice. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 13(3), 361–380.

31. Huang, L., Huang, Y., Chen, Y., Lou, S., Chen, Y. ve Jia, M. (2024). Application and development of firefighting technologies in industrial heritage: Experiences and insights from Macau. *Buildings*, 14(9), 2699.

32. Su, H. C., Tung, S. F., Tzeng, C. T. ve Lai, C. M. (2019). Survey and experimental investigation of movable fire loads in Japanese-style wooden historical buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, 14(6), 931–942.

33. Wang, J., Lo, S. M. ve Lai, F. (2014). A GIS-based framework of fire risk assessment and emergency route planning for heritage buildings. *Automation in Construction*, 42(1), 111–123.

34. Hu, H., Shi, J., Qi, Z., Li, H., Huang, X. ve Ji, J. (2022). Flammability and flame spread behavior of common fuels in Chinese historical buildings: An experimental research. *Combustion Science and Technology*, 195(16), 3947–3964.

35. Wu, Y., Hua, B., Chen, S. ve Yang, J. (2023). FDS-based study of the fire performance of Huizhou fire seal walls in traditional residential buildings in Southern China. *Fire*, 6(10), 388-389.

36. Guibaud, A., Mindeguia, J.-C., Albuerne, A., Parent, T. ve Torero, J. (2024). Notre-Dame de Paris as a validation case to improve fire safety modelling in historic buildings. *Journal of Cultural Heritage*, 65(1), 145–154.

37. D'Orazio, M., Canafoglia, M., Bernardini, G. ve Quagliarini, E. (2024). Towards using digital technologies to balance conservation and fire mitigation in building heritage hosting vulnerable occupants: Rapid evacuation simulator verification for the "Omero Museum" (Ancona, Italy). *Heritage*, 7(7), 3734–3755.

38. Qiao, Y., Lam, C. C., Wong, M. O. ve Xu, Y. (2024). A framework of integrating HBIM and GIS for automated fire risk assessment of heritage buildings. In V. Gonzalez-Moret, J. Zhang, B. García de Soto and I. Brilakis (Eds.), *Proceedings of the 41st ınternational symposium on automation and robotics in construction* (1st ed.). Lyon: International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 714-721.

39. González, J., Figueiredo, K., Hammad, A. W., Tam, V. W., Haddad, A. N. ve Illankoon, C. (2025). Heritage BIM (HBIM) applied in emergency scenarios: a case study of the National Museum in Brazil. *International Journal of Construction Management*, 25(11), 1239-1253.

40. Frosini, G., Biagini, C., Capone, P., Donato, V. ve Giusti, T. (2016, 24-26 March). *HBIM and fire prevention in historical building heritage management*. ISARC 2016-33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Auburn, USA, 182–190.

41. Huang, D., Lo, S., Chen, J., Fu, Z., Zheng, Y., Luo, L., Zhuang, Y., Cheng, H. ve Yang, L. (2019). Mapping fire risk of passenger-carried fire load in metro system via floor field cellular automaton. *Automation in Construction*, 100(1), 61–72.

42. Baquedano-Juliá, P., Navia Miranda, F., Graus, S. ve Ferreira, T. M. (2025). Understanding and managing risk in historic areas: A multi-hazard vulnerability assessment of the historic city centre of Guimarães, Portugal. In M. Ioannides, G. Issini, & D. Oliveira (Eds.), *3D research challenges in cultural heritage IV* (1st ed.). New York: Springer, 46–57.

43. Tikhonova, O., Romão, X. ve Salazar, G. (2021, 4-6 October). *The use of GIS tools for data collection and processing in the context of fire risk assessment in urban cultural heritage.* International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2021. Lviv, 1–5.

44. Baquedano-Juliá, P., Ferreira, T. M. ve Rodrigues, H. (2021). Post-earthquake fire risk assessment in the Historic City Centre of Leiria using an index-based approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction,* 60(2), 102287.

45. Silva, D., Rodrigues, H. ve Ferreira, T. M. (2022). Assessment and mitigation of the fire vulnerability and risk in the historic city centre of Aveiro, Portugal. *Fire*, 5(5), 173.

46. Tozo Neto, J. ve Ferreira, T. M. (2020). Assessing and mitigating vulnerability and fire risk in historic centres: A cost-benefit analysis. *Journal of Cultural Heritage*, 45(1), 279–290.

47. Granda, S. and Ferreira, T. M. (2019). Large-scale vulnerability and fire risk assessment of the historic centre of Quito, Ecuador. *International Journal of Architectural Heritage,* 15(7), 1043–1057.

48. Palazzi, N. C., Baquedano Juliá, P., Ferreira, T. M., Rosas, J., Monsalve, M. ve de la Llera, J. C. (2023). Fire risk assessment of historic urban aggregates: An application to the Yungay neighborhood in Santiago, Chile. *International Journal of Disaster Risk Reduction,* 86(2), 103550.

49. Li, Q. X. ve Deliberty, T. (2022). Mapping for indigenous communities using drones and GIS: Supporting fire risk awareness, cultural preservation, and local resilience. *Transactions in GIS,* 26(2), 818–838.

50. Unesco World Heritage Centre (2007). Reducing Disasters Risks at World Heritage Properties. URL-4: https://whc.unesco.org/en/disaster-risk-reduction/ Son Erişim Tarihi: 14.09.2025.

51. Beyhan, F. ve Bayraktar, G. K. (2014). Tarihi binalar ve yangın güvenliği. *TAÇ Mimarlık Kültür Sanat Dergisi*, 2(1), 76–85.

52. National Fire Protection Association (2025). *NFPA 909: Code for the protection of cultural resource properties – museums, libraries, and places of worship,* (1st ed.). Quincy, MA: NFPA, 6-19.

53. National Fire Protection Association (2025). *NFPA 914: Code for the protection of historic structures* (1st ed.). Quincy, MA: NFPA, 4-19.

54. European Committee for Standardization (CEN) (2002). *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire (EN 1991-1-2),* (1st ed.). Brussels: CEN, 2-41.

55. Ministerio de la Presidencia (2004). Reglamento de seguridad contra ıncendios en los establecimientos ındustriales (RSCIEI*). Real Decreto 2267/2004, de 3 de Diciembre. Boletín Oficial del Estado,* Madrid, 2-3.

56. British Standards Institution (BSI) (2017). *BS 9999: Code of practice for fire safety in the design, management and use of buildings,* (1st ed.). London: BSI, 6-21.

57. Confederation of Fire Protection Associations Europe (CFPA-E) (2013). *CFPA-E guideline No. 30: Fire safety in historic buildings,* (1st ed.). Helsinki: CFPA-E, 3-25.

58. T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığ. (2007). Binaların yangından korunması hakkında yönetmelik. *Resmî Gazete* (Sayı: 26735), 14-15.

59. Türk Standartları Enstitüsü (2015). *TS EN 1991-1-2:* Eurocode 1 – yapılara etki eden yükler – Bölüm 1-2: Genel yükler – Yangına maruz kalan yapılar için yükler. *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara, 4-21.

60. İnternet: Orman Genel Müdürlüğü (t.y.). Ağaç türleri odun ve kabuklarının kalori değerleri (Tek yaprak No: 05). Ormancılık Araştırma Enstitüsü Yayınları. URL-5: https://www.ogm.gov.tr/icanadolu/yayinlarimizsitesi/Yayinlarimiz/Tek%20Yapraklar/Tek%20Yaprak05%20%20A%C4%9Fa%C3%A7%20T%C3%BCrleri%20Odun%20Ve%20Kabuklar%C4%B1n%C4%B1n%20Kalori%20De%C4%9Ferleri.pdf Son Erişim Tarihi: 05.11.2025.

61. İnternet: The Wood Database (t.y.). White ash (Fraxinus Americana). URL-6: https://www.wood-database.com/white-ash/ Son Erişim Tarihi: 10.10.2025.

62. İnternet: Engineering ToolBox (t.y.) Densities of Solids. URL-7: https://www.engineeringtoolbox.com/density-solids-d_1265.html Son Erişim Tarihi: 12.10.2025.

63. İnternet: IXL (t.y.). Typical Physical Properties of Insulation Materials. URL-8: https://www.ixl.co.th/en/technical-information/technical-information-tables/typical physical-properties/ Son Erişim Tarihi: 13.10.2025.

64. İnternet: Engineering ToolBox (t.y.). Fuels - Higher and Lower Calorific Values. URL-9: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html Son Erişim Tarihi: 15.10.2025.

65. İnternet: Engineering ToolBox (t.y.). Plastics - Thermal Properties. URL-10: https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-properties-plastics-d_1786.html Son Erişim Tarihi: 15.10.2025.

66. Li, J., Li, H., Zhou, B., Wang, X. ve Zhang, H. (2020). Investigation and statistical analysis of fire loads of 83 historic buildings in Beijing. *International Journal of Architectural Heritage*, 14(4), 471–482.

EKLER

EK-1. YAN-SIM tarafından oluşturulan TB01 yangın raporu

YANGIN YÜKÜ ANALİZ RAPORU
Tarihi Yapılar için Yangın Risk Değerlendirmesi

1. GENEL BİLGİLER

Rapor Tarihi: 07.12.2025 20:58
Yazılım: YAN-SIM v2.0 - Yangın Risk Analizi Motoru
Hazırlayan: Bilgehan Bakırhan (Doktora Tez Çalışması)
Mekânın Toplam Alanı: 170.200 m²
Toplam Yangın Yükü: 303387.664 MJ
Toplam Yangın Yükü Yoğunluğu: 1782.536 MJ/m²
Risk Seviyesi: 3. DERECE ORTA
Risk Durumu: ORTA SEVİYEDEDİR
Analiz Edilen Malzeme Sayısı: 3

2. DETAYLI HESAPLAMALAR

1. Sarıçam (Ağaç Malzemeler)
├─ Kütle: 15960.339 kg
├─ Alt Isıl Değer: 18.43 MJ/kg
├─ Alan: 170.200 m²
├─ Yangın Yükü: 294149.048 MJ
└─ Toplam İçindeki Payı: %97,0

2. Göknar (Ağaç Malzemeler)
├─ Kütle: 364.014 kg
├─ Alt Isıl Değer: 17.35 MJ/kg
├─ Alan: 170.200 m²
├─ Yangın Yükü: 6315.643 MJ
└─ Toplam İçindeki Payı: %2,1

3. Kayın (Ağaç Malzemeler)
├─ Kütle: 178.013 kg
├─ Alt Isıl Değer: 16.42 MJ/kg
├─ Alan: 170.200 m²
├─ Yangın Yükü: 2922.973 MJ
└─ Toplam İçindeki Payı: %1,0

ÖZEL ÇÖZÜM ÖNERİLERİ
• Sarıçam malzemesi toplam yangın yükünün %97,0'ini oluşturmaktadır.
• Ahşap yüzeylere yangın geciktirici intümesan malzemelerle emprenye işlemi derhal uygulanmalı
• Ahşap unsurlarda nem kontrolü sistemi kurulmalı (%15-20 aralığında tutulmalı)
• Özgün karakteri bozmayan şeffaf yangın geciktirici vernik uygulaması yapılmalı

Rapor Sonu - YAN-SIM v2.0 | Bilgehan Bakırhan Doktora Tezi
Tarihi Yapılar İçin Yangın Risk Analizi

EK-2. YAN-SIM tarafından oluşturulan TB02 yangın raporu

ANGIN YÜKÜ ANALİZ RAPORU
arihi Yapılar için Yangın Risk Değerlendirmesi

1. GENEL BİLGİLER

Rapor Tarihi: 25.12.2025 12:13
Yazılım: YAN-SIM v2.0 - Yangın Risk Analizi Motoru
Hazırlayan: Bilgehan Bakırhan (Doktora Tez Çalışması)
Mekânın Toplam Alanı: 228,370 m²
Toplam Yangın Yükü: 575.376,693 MJ
Toplam Yangın Yükü Yoğunluğu: 2.519,493 MJ/m²
Risk Seviyesi: 3. DERECE ORTA
Risk Durumu: ORTA SEVİYEDEDİR
Analiz Edilen Malzeme Sayısı: 4

2. DETAYLI HESAPLAMALAR

1. Sarıçam (Ağaç Malzemeler)
├— Kütle: 21762,000 kg
├— Alt Isıl Değer: 18,43 MJ/kg
├— Alan: 228,370 m²
├— Yangın Yükü: 401.073,660 MJ
└— Toplam İçindeki Payı: %69,7

2. Karaçam (Ağaç Malzemeler)
├— Kütle: 8.002,800 kg
├— Alt Isıl Değer: 18,36 MJ/kg
├— Alan: 228,370 m²
├— Yangın Yükü: 146.931,408 MJ
└— Toplam İçindeki Payı: %25,5

3. Göknar (Ağaç Malzemeler)
├— Kütle: 549,000 kg
├— Alt Isıl Değer: 17,35 MJ/kg
├— Alan: 228,370 m²
├— Yangın Yükü: 9.525,150 MJ
└— Toplam İçindeki Payı: %1,7

4. Meşe (Ağaç Malzemeler)
├— Kütle: 1.117,500 kg
├— Alt Isıl Değer: 15,97 MJ/kg
├— Alan: 228,370 m²
├— Yangın Yükü: 17.846,475 MJ
└— Toplam İçindeki Payı: %3,1

ÖZEL ÇÖZÜM ÖNERİLERİ:
• Sarıçam malzemesi toplam yangın yükünün %69,7'ini oluşturmaktadır.
• Karaçam malzemesi toplam yangın yükünün %25,5'ini oluşturmaktadır.
• Ahşap yüzeylere yangın geciktirici intümesan malzemelerle emprenye işlemi derhal uygulanmalı
• Ahşap unsurlarda nem kontrolü sistemi kurulmalı (%15-20 aralığında tutulmalı)
• Özgün karakteri bozmayan şeffaf yangın geciktirici vernik uygulaması yapılmalı

Rapor Sonu - YAN-SIM v2.0 | Bilgehan Bakırhan Doktora Tezi
Tarihi Yapılar İçin Yangın Risk Analizi

EK-3. YAN-SIM tarafından oluşturulan TB03 yangın raporu

'ANGIN YÜKÜ ANALİZ RAPORU
arihi Yapılar için Yangın Risk Değerlendirmesi

1. GENEL BİLGİLER

Rapor Tarihi: 21.12.2025 13:01
Yazılım: YAN-SIM v2.0 - Yangın Risk Analizi Motoru
Hazırlayan: Bilgehan Bakırhan (Doktora Tez Çalışması)
Mekânın Toplam Alanı: 339.400 m²
Toplam Yangın Yükü: 660086.389 MJ
Toplam Yangın Yükü Yoğunluğu: 1944.863 MJ/m²
Risk Seviyesi: 3. DERECE ORTA
Risk Durumu: ORTA SEVİYEDEDİR
Analiz Edilen Malzeme Sayısı: 5

2. DETAYLI HESAPLAMALAR

1. Sarıçam (Ağaç Malzemeler)
├─ Kütle: 4680.000 kg
├─ Alt Isıl Değer: 18.43 MJ/kg
├─ Alan: 339.400 m²
├─ Yangın Yükü: 86252.400 MJ
└─ Toplam İçindeki Payı: %13,1

2. Karaçam (Ağaç Malzemeler)
├─ Kütle: 10041.200 kg
├─ Alt Isıl Değer: 18.36 MJ/kg
├─ Alan: 339.400 m²
├─ Yangın Yükü: 184356.432 MJ
└─ Toplam İçindeki Payı: %27,9

3. Kuru Meşe (Ağaç Malzemeler)
├─ Kütle: 14707.000 kg
├─ Alt Isıl Değer: 16.2 MJ/kg
├─ Alan: 339.400 m²
├─ Yangın Yükü: 238253.400 MJ
└─ Toplam İçindeki Payı: %36,1

4. Ladin (Ağaç Malzemeler)
├─ Kütle: 8591.600 kg
├─ Alt Isıl Değer: 16.52 MJ/kg
├─ Alan: 339.400 m²
├─ Yangın Yükü: 141933.232 MJ
└─ Toplam İçindeki Payı: %21,5

5. Göknar (Ağaç Malzemeler)
├─ Kütle: 535.500 kg
├─ Alt Isıl Değer: 17.35 MJ/kg
├─ Alan: 339.400 m²
├─ Yangın Yükü: 9290.925 MJ
└─ Toplam İçindeki Payı: %14

ÖZEL ÇÖZÜM ÖNERİLERİ:
• Kuru Meşe malzemesi toplam yangın yükünün %36,1'ini oluşturmaktadır.
• Karaçam malzemesi toplam yangın yükünün %27,9'ini oluşturmaktadır.
• Ladin malzemesi toplam yangın yükünün %21,5'ini oluşturmaktadır.
• Ahşap yüzeylere yangın geciktirici intümesan malzemelerle emprenye işlemi derhal uygulanmalı
• Ahşap unsurlarda nem kontrolü sistemi kurulmalı (%15-20 aralığında tutulmalı)
• Özgün karakteri bozmayan şeffaf yangın geciktirici vernik uygulaması yapılmalı

Rapor Sonu - YAN-SIM v2.0 | Bilgehan Bakırhan Doktora Tezi
Tarihi Yapılar İçin Yangın Risk Analizi

EK-4. YAN-SIM tarafından oluşturulan TB04 yangın raporu

'ANGIN YÜKÜ ANALİZ RAPORU
arihi Yapılar için Yangın Risk Değerlendirmesi

1. GENEL BİLGİLER

Rapor Tarihi: 16.12.2025 22:23
Yazılım: YAN-SIM v2.0 - Yangın Risk Analizi Motoru
Hazırlayan: Bilgehan Bakırhan (Doktora Tez Çalışması)
Mekânın Toplam Alanı: 266.180 m²
Toplam Yangın Yükü: 244384.090 MJ
Toplam Yangın Yükü Yoğunluğu: 918.116 MJ/m²
Risk Seviyesi: 1. DERECE ORTA
Risk Durumu: ORTA SEVİYEDEDİR
Analiz Edilen Malzeme Sayısı: 3

2. DETAYLI HESAPLAMALAR

1. Kayın (Ağaç Malzemeler)
├─ Kütle: 259.200 kg
├─ Alt Isıl Değer: 16.42 MJ/kg
├─ Alan: 266.180 m²
├─ Yangın Yükü: 4256.064 MJ
└─ Toplam İçindeki Payı: %1,7

2. Göknar (Ağaç Malzemeler)
├─ Kütle: 495.000 kg
├─ Alt Isıl Değer: 17.35 MJ/kg
├─ Alan: 266.180 m²
├─ Yangın Yükü: 8588.250 MJ
└─ Toplam İçindeki Payı: %3,5

3. Sarıçam (Ağaç Malzemeler)
├─ Kütle: 12563.200 kg
├─ Alt Isıl Değer: 18.43 MJ/kg
├─ Alan: 266.180 m²
├─ Yangın Yükü: 231539.776 MJ
└─ Toplam İçindeki Payı: %94,7

ÖZEL ÇÖZÜM ÖNERİLERİ:
• Sarıçam malzemesi toplam yangın yükünün %94,7'ini oluşturmaktadır.
• Ahşap yüzeylere yangın geciktirici intümesan malzemelerle emprenye işlemi derhal uygulanmalı
• Ahşap unsurlarda nem kontrolü sistemi kurulmalı (%15-20 aralığında tutulmalı)
• Özgün karakteri bozmayan şeffaf yangın geciktirici vernik uygulaması yapılmalı

Rapor Sonu - YAN-SIM v2.0 | Bilgehan Bakırhan Doktora Tezi
Tarihi Yapılar İçin Yangın Risk Analizi



Gazili olmak ayrıcalıktır