Mimarlık ve Yangın Sempozyumu 2025

8-9 Mayıs 2025

İTÜ Taşkışla, İstanbul

CAMİLERDE DUMAN YAYILIMININ ÖRNEK BİR CAMİ ÜZERİNDEN İNCELENMESİ

Yazar Adı Soyadı[1]: XXX

Yazar Adı Soyadı[2] XXX

Kurum ismi[1] XXX Üniversitesi XXX Bölümü

Kurum ismi[2] XXX Üniversitesi XXX Bölümü

ÖZET

*Geniş ibadet alanları, çoklu girişler ve ikonik kubbeler gibi benzersiz mimari özelliklere sahip camiler, özellikle kalabalık zamanlarda hızlı duman yayılımı ve zorlaşan tahliye nedeniyle ciddi yangın güvenliği zorlukları barındırmaktadır. Bu çalışma, 5.000 kişilik kapasitesiyle modern cami mimarisinin önemli bir örneği olan Ankara'daki Ahmet Hamdi Akseki Camii'ni vaka incelemesi olarak ele alarak bu kritik zorlukları Yangın Dinamikleri Simülatörü (FDS) ile analiz etmektedir. Ana ibadet alanı (Harim) ve üst kat kadınlar mahfilinde (Mahfil) tanımlanan iki farklı yangın senaryosu, detaylı 3B model üzerinde incelenmiştir. Simülasyonlar, her iki senaryoda da yüksek tavana rağmen görüş mesafesinin hızla düştüğünü ortaya koymuştur: Harim'de 11 dakikada, Mahfil'de ise 8 dakikada görüş mesafesi kritik eşik olan 5 metrenin altına inmiştir. Bu **dikkat çekici** bulgu, camilere özgü etkin duman yönetim sistemlerinin güvenli tahliye koşullarının sürdürülmesinde önemli bir rol oynadığının altını çizmektedir. Çalışma, bu bulgularıyla, modern camilerin özgün mimari ve kullanım özelliklerine **duyarlı tasarım kararları alınmasına katkı sağlamayı** amaçlamaktadır.*

Anahtar sözcükler: *Cami Tasarımı, Yangın Güvenliği, Duman Yayılımı, Yangın Dinamiği Simülasyonu (FDS), Tahliye Güvenliği*

[1] e-posta adresi: XXX@XXX.edu.tr

[2] e-posta adresi: XXX@XXX.edu.tr

SMOKE SPREAD ANALYSIS IN MOSQUES: A FIRE DYNAMICS SIMULATION APPROACH

ABSTRACT

Mosques, characterized by unique architectural features such as large prayer halls, multiple entrances, and iconic domes, present significant fire safety challenges, particularly due to rapid smoke spread and hindered evacuation during large gatherings. This study analyzes these critical challenges using the Ahmet Hamdi Akseki Mosque in Ankara, Turkey – a prominent example of modern mosque design accommodating up to 5,000 people – as a case study via Fire Dynamics Simulator (FDS). Two distinct fire scenarios, one originating centrally in the main prayer hall (Harim) and another in the upper-level women's prayer area (Mahfil), were examined using a detailed 3D model. Simulations revealed a rapid decrease in visibility in both scenarios, ***despite the high ceilings****: visibility dropped below the critical threshold of 5 meters within 11 minutes in the Harim (main floor) and in just 8 minutes in the Mahfil (upper floor). This noteworthy finding underscores the crucial role of effective, mosque-specific smoke management systems in maintaining tenable evacuation conditions. With these findings, the study aims to contribute to informed design decisions sensitive to the unique architectural and occupancy characteristics of modern mosques.*

Keywords: *Mosque Design, Fire Safety, Smoke Spread, Fire Dynamics Simulation (FDS), Evacuation Safety*

1. GİRİŞ

Camiler, İslam dünyasında sadece ibadet mekanları olmanın ötesinde, toplumsal yaşamın, kültürel etkileşimin ve manevi birlikteliğin merkezi konumundadır. Özellikle Cuma ve bayram namazları gibi zamanlarda binlerce kişiyi aynı çatı altında toplayan bu yapılar, taşıdıkları bu yoğunluk ve sahip oldukları özgün mimari kimlik nedeniyle, yangın güvenliği açısından özel riskler barındırır ve dikkatli bir planlama gerektirir (Alginahi vd., 2019; Nassar & Bayyoumi, 2012).

Modern cami tasarımında sıkça rastlanan "Mekânın Birliği" (Unity of Space) felsefesi, genellikle cemaati tek bir geniş alanda buluşturan, çoklu girişlere sahip ve genellikle görkemli kubbelerle örtülü mekanlar yaratır. Bu tasarım, estetik açıdan etkileyici ve topluluk ruhunu pekiştirici olsa da, yangın anında kritik bir güvenlik zafiyetine yol açabilir: **yetersiz bölümlendirme (kompartımantasyon[3] eksikliği)**. Bu durum, dumanın ve ısının herhangi bir fiziksel engelle karşılaşmadan hızla yayılmasına olanak tanır (Topraklı & Satır, 2024; Topraklı vd., 2019; Selim vd., 2016). Geniş iç hacimlerde oluşan güçlü termal akımlar da dumanın yayılımını ivmelendirerek görüş mesafesini hızla azaltır ve güvenli tahliyeyi ciddi anlamda tehlikeye atabilir (Nguyen vd., 2013).

Yangın güvenliği denklemini daha da karmaşıklaştıran bir diğer boyut ise camilerin **dinamik doluluk** profilidir. Günlük namazlardaki sakin atmosfer, haftalık Cuma namazlarında ve yıllık bayram namazlarında yerini maksimum kapasiteye ulaşan yoğun bir kalabalığa bırakır

[3] **Kompartımantasyon:** Yangın güvenliği mühendisliğinde, bir binanın yangına dayanıklı duvarlar, döşemeler ve kapılar gibi elemanlarla daha küçük bölümlere (kompartımanlara) ayrılması prensibidir. Amacı, yangının ve dumanın belirli bir alanda sınırlı kalmasını sağlayarak yayılmasını yavaşlatmak ve insanların güvenli bir şekilde tahliyesi için zaman kazandırmaktır. Metin içerisinde, teknik terimin daha yaygın anlaşılabilir karşılığı olan "bölümlendirme" ifadesi tercih edilmiş, orijinal teknik terim parantez içinde belirtilmiştir.

(Alghamdi, 2015; Haron vd., 2012; Onay, 2008). Bu öngörülemez doluluk değişimi, duman hareketini tahmin etmeyi zorlaştırırken, kalabalık anlarda mevcut olabilecek farklı yaş grupları ve hareket kabiliyeti kısıtlı bireylerin (yaşlılar, çocuklar, engelliler) dumandan etkilenme ve tahliye olma riskini artırmaktadır (Chen vd., 2023). Bu durum, standart güvenlik önlemlerinin ötesinde, farklı senaryolara uyum sağlayabilen, çeşitlendirilmiş stratejiler geliştirilmesini zorunlu kılar.

Camilerde daha önce yaşanan izdiham veya güvenlik olayları bu mekanların genel kırılganlığına işaret etse de (Alfakhry & Yahya, 2022; Sabah vd., 2018; Satır & Topraklı, 2021), bu çalışma **özellikle yangın durumunda ortaya çıkan duman yayılımı dinamiklerine ve bununla ilişkili risklere** odaklanmaktadır.

Bu çerçevede, Ankara'da yer alan ve 5.000 kişilik kapasitesiyle modern cami mimarisinin önemli bir temsilcisi olan Ahmet Hamdi Akseki Camii, bu çalışmada bir vaka incelemesi olarak ele alınmıştır. Çalışmanın temel amacı, ileri düzey bir simülasyon aracı olan Yangın Dinamikleri Simülatörü (Fire Dynamics Simulation - FDS) (McGrattan vd., 2013) kullanarak, bu camide tanımlanan farklı yangın senaryoları altında dumanın nasıl yayıldığını (hız, yön, katmanlaşma) detaylı bir şekilde analiz etmektir. Bu analizler aracılığıyla, kubbe geometrisi ve geniş ibadet alanı gibi belirleyici mimari unsurların duman yayılımına etkilerini değerlendirmek ve potansiyel tasarım kaynaklı güvenlik zafiyetlerini tespit etmek hedeflenmektedir.

Bu çalışmadan elde edilecek bulgular doğrultusunda, camilerde yangın güvenliğini ve duman kontrolünü iyileştirmeye yönelik bilimsel temelli öneriler geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Aynı zamanda, FDS gibi gelişmiş simülasyon yöntemlerinin cami gibi özgün yapılar için uyarlanması sürecindeki zorlukları ve modelleme sınırlarını anlamak da çalışmanın kapsamındadır. Nihai hedef, bu kutsal mekanların hem mimari kimliklerini koruyarak hem de kullanıcıları için daha güvenli ve dayanıklı hale getirilmesine katkı sağlamaktır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Camiler gibi yoğun kullanılan ibadet mekanlarında kullanıcı güvenliğinin sağlanması, yangın güvenliği prensiplerinin derinlemesine anlaşılmasını ve bu özgün yapılara özel stratejilerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bölüm, camilerde yangın güvenliği konusundaki mevcut akademik literatürü gözden geçirmekte, özellikle mimari tasarımın getirdiği zorluklar, değişken kullanıcı dinamikleri ve bu sorunların analizinde kullanılan simülasyon yöntemlerine odaklanmaktadır. Amaç, bu çalışmanın üzerine inşa edildiği bilgi birikimini ve literatürde ele alınması gereken noktaları ortaya koymaktır.

Camilerin yangın güvenliği açısından taşıdığı riskler, büyük ölçüde kendilerine has mimari karakterlerinden kaynaklanmaktadır. Özellikle modern cami tasarımlarında sıklıkla benimsenen "Mekânın Birliği" anlayışı, genellikle geniş, tek hacimli ve yüksek tavanlı/kubbeli ibadet alanları ile sonuçlanır (Topraklı vd., 2019; Topraklı & Satır, 2024). Bu yaklaşım, estetik ve topluluk ruhu açısından değerli olmakla birlikte, **yetersiz bölümlendirme (kompartımantasyon eksikliği)** nedeniyle yangın durumunda ciddi riskler barındırır. Yangından kaynaklanan duman, fiziksel engellerle karşılaşmadığı için kontrolsüz bir şekilde geniş alanlara hızla yayılabilir, bu da tahliye yollarının belirsizleşmesine ve tahliye süresinin tehlikeli biçimde uzamasına yol açabilir (Alginahi vd., 2019; Nassar & Bayyoumi, 2012; Selim vd., 2016).

Mimari özelliklerin yanı sıra, camilerin **değişken kullanıcı yoğunluğu** da yangın güvenliği planlamasını karmaşıklaştıran önemli bir faktördür. Günlük namaz vakitlerindeki doluluk oranları ile Cuma veya bayram namazlarındaki binlerce kişilik kalabalıklar arasında büyük farklar bulunur (Alghamdi, 2015; Haron vd., 2012). Bu aşırı değişkenlik, standart kapasite hesaplamalarını yetersiz kılarken (Topraklı & Satır, 2024), özellikle kalabalık zamanlarda farklı demografik grupların (örn. Ramazan'da artan kadın ve çocuk varlığı) tahliye sırasındaki ihtiyaçlarını ve potansiyel zorluklarını dikkate almayı gerektirir (Onay, 2008; Chen vd., 2023).

Tarihsel vakalar, camilerin acil durumlardaki kırılganlığını teyit eder niteliktedir. Örneğin, Kazablanka Camii'nde yaşanan izdiham olayı, sadece fiziksel koşulların değil, kalabalık psikolojisinin ve panik faktörünün de tahliye güvenliği üzerinde ne denli etkili olabileceğini göstermiştir (BBC News, 2015). Benzer şekilde, camilerde meydana gelen yangın veya saldırı olayları da bu mekanların güvenlik açıklarına işaret etmektedir (Alfakhry & Yahya, 2022; Sabah vd., 2018; Satır & Topraklı, 2021).

Bu karmaşık ve çok boyutlu sorunların analizinde, son yıllarda bilgisayar tabanlı simülasyon teknikleri önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle Yangın Dinamikleri Simülatörü (Fire Dynamics Simulation - FDS), yangın fiziği prensiplerine dayanarak duman ve ısı yayılımını modelleme, mimari tasarım alternatiflerinin etkilerini değerlendirme ve potansiyel riskleri nicel olarak belirleme konusunda güçlü bir araçtır (McGrattan vd., 2013). İnsan faktörünün daha detaylı incelenmesi gerektiğinde ise **Etmen Tabanlı Modelleme**[4] (Agent-Based Modeling - ABM) gibi yöntemler, bireysel tahliye davranışlarını ve kalabalık dinamiklerini simüle etmek için kullanılmaktadır (Bonabeau, 2002; Pelechano & Badler, 2006).

Özetle, mevcut akademik literatür, camilerin özgün mimari yapılarından ve dinamik kullanım özelliklerinden kaynaklanan temel yangın risklerini tanımlamış ve bu risklerin analizinde simülasyon yöntemlerinin potansiyelini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, özellikle büyük ölçekli, modern cami tasarımlarının spesifik duman yayılımı dinamiklerini detaylı FDS analizleriyle inceleyen ve bu analizleri pratik, uygulanabilir güvenlik stratejilerine dönüştürmeyi hedefleyen çalışmaların sayısı henüz istenen düzeyde değildir. Bu çalışma, bu boşluğu doldurmayı amaçlamakta; literatürdeki bulguları temel alarak ve FDS modelinin sağladığı detaylı analiz imkanlarından yararlanarak, modern bir cami örneği üzerinden duman yayılımını kapsamlı bir şekilde incelemeyi hedeflemektedir. Bu analizlerden elde edilecek yeni ve derinlemesine bilgilerin, camiler için daha etkin ve bağlama uygun yangın güvenliği stratejileri geliştirilmesine önemli bir katkı sağlaması beklenmektedir.

---

[4] **Etmen Tabanlı (Agent-Based):** İngilizce "agent-based modeling" (ABM) teriminin karşılığı olarak Türkçede henüz tam bir terminolojik fikir birliğine varılamamıştır. ABM'deki "agent", çevresini algılayan, kendi kurallarına göre özerk kararlar alıp eylemde bulunan aktif bir varlığı ifade eder ve insanları, organizmaları veya diğer otonom birimleri temsil edebilir. Bu çalışmada, simülasyonlar insan davranışlarına odaklandığı için "birey tabanlı" ifadesi ilk bakışta daha anlaşılır görünse de, ABM'nin genel teknik kavramını ve farklı alanlardaki potansiyel uygulamalarını daha doğru yansıtmak amacıyla "etmen tabanlı" terimi tercih edilmiştir. Bu tercihte, "etmen" kelimesinin TDK'daki "etkin olan, eyleyen, fail" anlamının, agent'ın aktif ve özerk rolünü kavramsal olarak iyi karşılaması ve Türkiye'deki ilgili akademik alanlarda yaygınlaşan kullanımı etkili olmuştur. "Ajan tabanlı" (yanlış çağrışım) ve "vekil tabanlı" (özerklik vurgusu eksikliği) gibi diğer alternatifler ise kavramın teknik nüanslarını tam olarak karşılamadığı için uygun görülmemiştir. **Bununla birlikte, ABM için en uygun Türkçe karşılığın belirlenmesi konusundaki akademik tartışmanın devam etmesi gerektiği açıktır.**

3. METODOLOJİ

Bu çalışma, Ankara, Türkiye'deki Ahmet Hamdi Akseki Camii'nin özgün mimari özelliklerinin olası bir yangın durumunda duman yayılımı üzerindeki etkilerini nicel olarak değerlendirmek amacıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) (Computational Fluid Dynamics - CFD) tabanlı bir yaklaşım benimsemiştir. Analizler için, Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (National Institute of Standards and Technology - NIST) tarafından geliştirilen ve yangın dinamiği modellemesinde yaygın olarak kabul gören **Yangın Dinamikleri Simülatörü[5] (Fire Dynamics Simulation - FDS) yazılımının 6.9.1 sürümü** kullanılmıştır. Model oluşturma, simülasyon ayarlarının yapılması ve sonuçların görselleştirilmesi aşamalarında ise **PyroSim (Sürüm 2024.2)** grafik arayüzünden yararlanılmıştır (McGrattan vd., 2013; "PyroSim," 2025). Vaka çalışması olarak seçilen Ahmet Hamdi Akseki Camii, 5.000 kişilik kapasitesi ve modern Türk cami mimarisinin karakteristik özelliklerini taşıması nedeniyle temsili bir örnek olarak değerlendirilmiştir. Bu bölümde, çalışmada izlenen metodolojik adımlar; detaylı üç boyutlu (3B) modelin oluşturulması, malzeme özelliklerinin atanması, yangın senaryolarının tanımlanması ve FDS simülasyon parametreleri ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

3.1. Üç Boyutlu (3B) Geometrik Modelin Oluşturulması

FDS analizlerinin temelini oluşturan detaylı 3B geometrik model, Ahmet Hamdi Akseki Camii'nin kamuya açık mimari kat planları, kesitleri ve mevcut fotoğrafları referans alınarak PyroSim yazılımı içerisinde oluşturulmuştur (“Ahmet Hamdi Akseki Camii”, 2024). Model, caminin yangın ve duman dinamiği açısından kritik olan ana mekânsal bileşenlerini içermektedir:

- **Ana İbadet Alanı (Harim):** ±0.00 kotunda yer alan, geniş açıklıklı ve yüksek kubbeli ana hacim.
- **Üst Kat Mahfil:** +6.00 m kotunda yer alan ve genellikle kadınlara ayrılan ikincil ibadet alanı.
- **Giriş/Çıkış Noktaları:** Zemin katta bulunan ana ve yan girişler.
- **Merdivenler:** Zemin kat ile Mahfil katını birbirine bağlayan, bina köşelerine yerleştirilmiş dört adet merdiven boşluğu (S1, S2, S3, S4). Her merdiven, 15 cm rıht yüksekliği ve 30 cm basamak derinliğine sahip olup, korkuluklar hariç net genişliği 189 cm'dir.
- **Mimari Elemanlar:** Mihrap, minber gibi iç mekân elemanları ve ana kubbe geometrisi modele dahil edilmiştir.

Model, gerçek yapının temel geometrik özelliklerini ve mekânsal ilişkilerini hassas bir şekilde yansıtacak detayda hazırlanmıştır.

---

[5] **Yangın Dinamikleri Simülatörü (Fire Dynamics Simulation - FDS):** ABD Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST) tarafından geliştirilen, yangınların ve buna bağlı duman, ısı gibi olguların fiziksel davranışını Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) prensiplerine dayanarak bilgisayar ortamında modelleyen bir yazılımdır. Akademik ve teknik literatürde yaygın olarak "FDS" kısaltmasıyla anılır. Bu metinde, yazılımın işlevini belirten Türkçe karşılığı kullanılmıştır.

3.2. Malzeme Özellikleri ve Sınır Koşulları

Modeldeki her bir yüzey ve yapı elemanı için gerçekçi malzeme özellikleri tanımlanması, yangın ve duman davranışının doğru simüle edilmesi için kritik öneme sahiptir. Duvarlar (betonarme, kaplama), zeminler (halı kaplı), tavanlar, camlar ve diğer bileşenler için gerekli olan ısıl özellikler (termal özellikler) (yoğunluk, ısı iletkenliği, özgül ısı) ve yanma özellikleri (yanıcılık, tutuşma sıcaklığı, yanma ısısı, kurum ve CO verimi - özellikle halı gibi yanıcı malzemeler için) literatürdeki çalışmalardan, ilgili standartlardan (örn. NFPA, ISO) ve mühendislik varsayımlarından yararlanılarak belirlenmiş ve FDS veri tabanına girilmiştir.

Simülasyonlar için başlangıç koşulu olarak tüm hacimde 20°C'lik homojen bir ortam sıcaklığı ve durgun hava koşulları varsayılmıştır. Havalandırma, **doğal havalandırma** koşullarını temsil edecek şekilde tanımlanmıştır; bu kapsamda, simülasyon başlangıcında ana giriş kapılarının ve pencerelerin kapalı olduğu, ancak kubbe ve çatı seviyesindeki bazı küçük havalandırma menfezlerinin açık olduğu varsayımı yapılmıştır. Bu açıklıklar, yangın sonucu oluşan ısı ve dumanın doğal yollarla (ısıl genleşme ve basınç farkları ile) hareket etmesine olanak tanır. Diğer tüm dış yüzeyler (duvarlar, çatı) ısı geçişine izin veren (non-adyabatik[6]) sınır koşulları ile tanımlanmıştır.

3.3. Yangın Senaryoları

Caminin farklı bölgelerindeki potansiyel riskleri değerlendirmek amacıyla, yangın kaynağı ve konumu açısından farklılık gösteren iki olası yangın senaryosu belirlenmiştir:

- **Senaryo 1: Ana İbadet Alanında (Harim) Merkezi Yangın**
    - **Gerekçe:** Harim, geniş açık alanı, yüksek kubbesi ve Cuma/bayram gibi zamanlarda en yüksek insan yoğunluğuna sahip olması nedeniyle birincil risk bölgesidir.
    - **Kaynak:** Alanın merkezinde, elektrik tesisatındaki bir arızadan (örn. kısa devre) kaynaklandığı varsayılan, **1 m x 1 m** boyutlarında bir yangın kaynağı tanımlanmıştır.
    - **Isı Yayılım Oranı[7] (Heat Release Rate - HRR):** Yangının **hızlı** gelişim gösterdiği varsayılarak (t-kare eğrisi, büyüme katsayısı $\alpha \approx 0.047$ kW/s²), birim alana düşen

[6] **Non-adyabatik:** Termodinamikte, adyabatik süreç sistem ile çevresi arasında ısı alışverişi olmayan süreci ifade eder. Non-adyabatik (veya diyabatik) süreç ise, sistemin (bu durumda bina yüzeyinin) çevresiyle (dış hava veya temas ettiği diğer ortamlarla) ısı alışverişi yapabildiği anlamına gelir. Bu sınır koşulu, simülasyonda bina duvarlarının ve çatısının dış ortam sıcaklığından etkilenebileceğini ve ısı kaybedip kazanabileceğini, böylece daha gerçekçi bir ısıl davranışın modellendiğini ifade eder.

[7] **Isı Yayılım Oranı (Heat Release Rate - HRR):** Bir yangının zamanla ortama ne kadar enerji (ısı) yaydığının bir ölçüsüdür ve genellikle kilowatt (kW) veya megawatt (MW) cinsinden ifade edilir. Yangının büyüklüğünü ve potansiyel tehlikesini belirleyen en önemli parametrelerden biridir.

tepe ısı yayılım oranı (**HRRPUA**[8]) **yaklaşık 1000 kW/m²**'ye ulaşan zaman bağımlı bir HRR profili kullanılmıştır. Bu değere ulaştıktan sonra HRR sabit kalmıştır.

- **Senaryo 2: Mahfil Katında Merkezi Yangın**
    - **Gerekçe:** Mahfil katı, daha sınırlı hacmi, potansiyel olarak daha kısıtlı kaçış yolları ve Harim'e göre farklı kullanım yoğunluğu nedeniyle ayrı bir risk değerlendirmesi gerektirir.
    - **Kaynak:** Mahfil katının merkezinde, yine elektrik kaynaklı olduğu varsayılan, **1 m x 1 m** boyutlarında bir yangın kaynağı tanımlanmıştır.
    - **Isı Yayılım Oranı (HRR):** Bu senaryoda yangının **daha yavaş** geliştiği varsayılarak (t-kare eğrisi, örn. $\alpha \approx 0.012$ kW/s² - orta hızda), ancak tam gelişimde yine tepe **HRRPUA** değeri **yaklaşık 1000 kW/m²**'ye ulaşan zaman bağımlı bir profil kullanılmıştır. Bu, başlangıçta daha yavaş fark edilebilecek ancak sonuçta benzer bir yangın büyüklüğüne ulaşabilecek bir senaryoyu temsil eder.

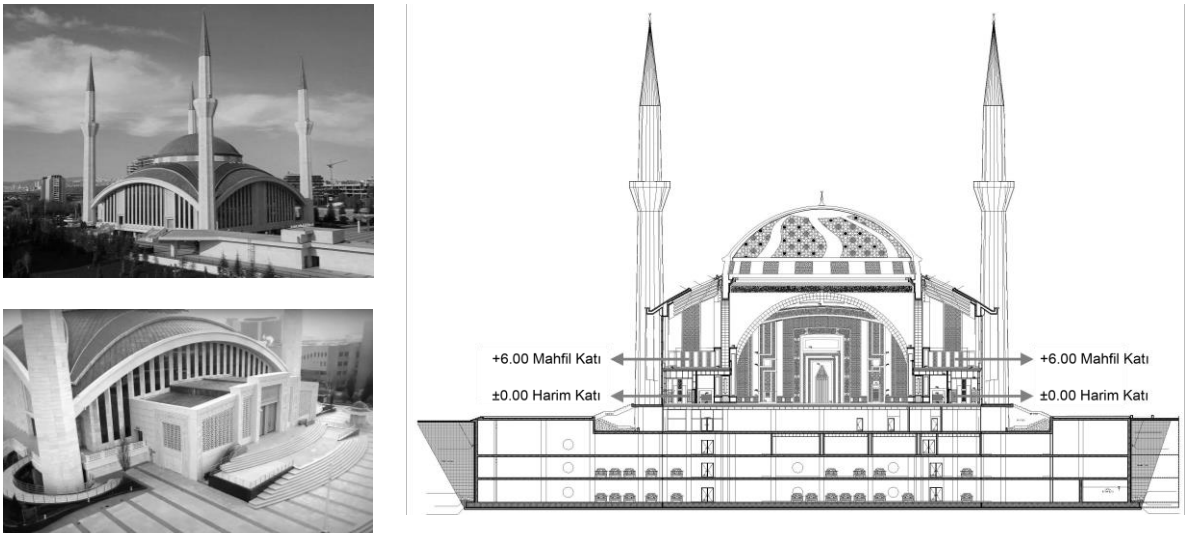
3.4. Simülasyon Parametreleri ve Çıktılar

Her iki senaryo için FDS simülasyonları **1200 saniye (20 dakika)** süreyle çalıştırılmıştır. Hesaplama alanı, tüm cami hacmini kapsayacak şekilde **0.4 metre x 0.4 metre x 0.4 metre** boyutlarında tekdüze (uniform) bir kartezyen hesaplama ağı (mesh) sistemi ile ayrıştırılmıştır. Bu ağ gözü boyutu, incelenen büyük hacimli mekan için ana akış dinamiklerini ve duman katmanlaşmasını yakalamak ile kabul edilebilir hesaplama süreleri arasında bir denge kurmak amacıyla seçilmiştir. Simülasyonlardan elde edilen temel çıktılar şunlardır:

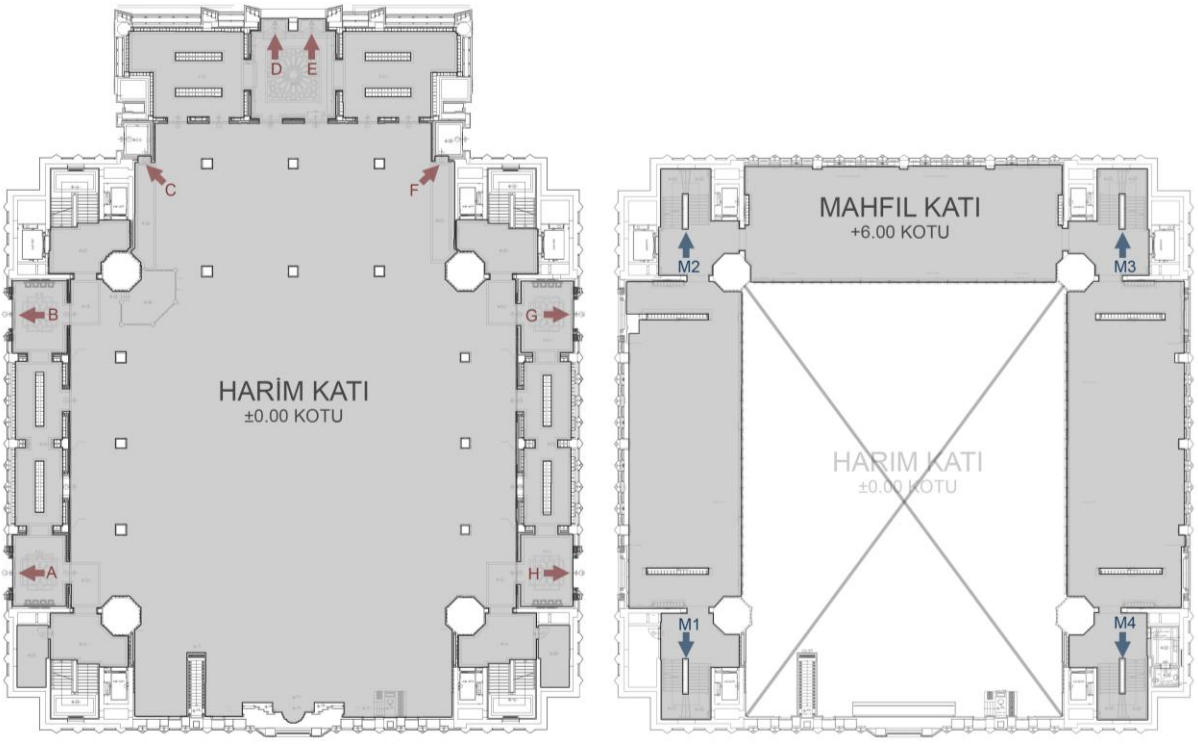
- Duman yayılımı ve katmanlaşması (Görsel ve kesit dosyaları)
- Sıcaklık dağılımı
- Görüş mesafesi (Visibility)
- Kurum (Soot) ve Karbon Monoksit (CO) konsantrasyonları (belirli noktalarda veya kesitlerde)

Bu parametreler, yangının etkilerini ve tahliye koşulları üzerindeki potansiyel riskleri değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Seçilen temel parametreler Çizelge 1'de özetlenmiştir.

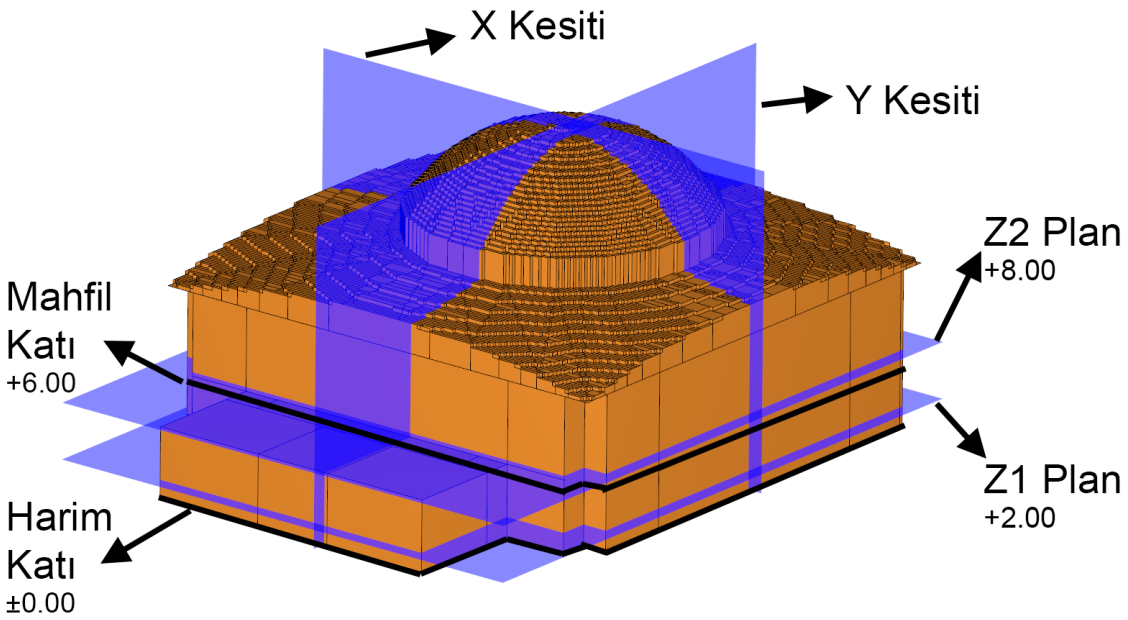
[8] **HRRPUA (Heat Release Rate Per Unit Area):** Birim alana düşen ısı yayılım oranıdır (kW/m²). Özellikle FDS gibi simülasyonlarda, yangın kaynağının belirli bir yüzey alanı üzerinden tanımlandığı durumlarda kullanılır. Toplam HRR, HRRPUA değerinin yangın kaynak alanı (bu çalışmada 1 m²) ile çarpılmasıyla elde edilir. Dolayısıyla, bu çalışmada kullanılan tepe HRR değeri yaklaşık 1000 kW (veya 1 MW)'tır.



Şekil 1: Caminin Dış Görünüşleri (Solda) ve Kesiti (Sağda) (“Ahmet Hamdi Akseki Camii”, 2024).



Şekil 2: Merdiven Boşluklarını ve Çıkışları Gösteren Zemin Kat (Harim) Ve Üst Kat (Mahfil) Planları.



Şekil 3: Detaylı Analiz İçin Seçilen Mesh Çözünürlüğünü ve Kesit Düzlemlerinin Yerleşimini Gösteren FDS Modeli.

Çizelge 1: Ahmet Hamdi Akseki Camii'nin Detaylı Analiz İçin Seçilen Mesh Ölçüleri ve Kesit Düzlemlerinin Yerleşimini Gösteren Parametreler

Parametreler	***Senaryo 1***	***Senaryo 2***
Yangının Yeri	Harim	Mahfil
Isı Yayılım Oranı (kW/m²)	1000	1000
Havalandırma	Doğal havalandırma	Doğal havalandırma
Simülasyon Süresi (sn)	1200	1200
Anahtar Çıktı Değişkenleri	Duman Hareketi, Sıcaklık, Görünürlük	Duman Hareketi, Sıcaklık, Görünürlük
Ortam Sıcaklığı (°C)	20	20
Mesh Boyutları (m)	0.4	0.4

4. BULGULAR

Bu bölümde, Ahmet Hamdi Akseki Camii için tasarlanan iki ayrı yangın senaryosunun Yangın Dinamikleri Simülatörü (FDS)[1] ile analiz edilmesi sonucu elde edilen temel bulgular ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Analizler, özellikle dumanın mekân içindeki zamansal ve üç boyutlu yayılımı, sıcaklık dağılımındaki değişimler ve tahliye güvenliği açısından hayati önem taşıyan görüş mesafesindeki azalma üzerine odaklanmıştır. Sunulan bulgular, caminin özgün mimari konfigürasyonunun yangın dinamiği üzerindeki belirleyici rolünü ve potansiyel güvenlik açıklarını nicel ve nitel verilerle ortaya koymaktadır.

4.1. Genel Yangın ve Duman Davranışı Gözlemleri

Her iki senaryoda da simülasyonlar, caminin "Mekânın Birliği" ilkesi doğrultusunda tasarlanmış geniş, yüksek ve **bölümlendirilmemiş (kompartımansız²) yapısının**, yangın kaynaklı dumanın yayılımı için oldukça elverişli bir ortam sunduğunu teyit etmiştir. Yangın kaynağından çıkan sıcak gazlar ve duman partikülleri, sahip oldukları **termal kaldırma kuvveti (thermal**

buoyancy) etkisiyle hızla yükselerek öncelikle tavan veya kubbe yüzeyine ulaşmıştır. Tavan yüzeyine çarpan duman, yatay yönde bir **tavan jeti (ceiling jet)** oluşturarak hızla yayılmış ve tavan altında sıcak bir **duman katmanı (smoke layer)** oluşturmaya başlamıştır. Özellikle yüksek kubbe ve tavan hacmi, başlangıçta bu duman katmanının zemin seviyesinden oldukça yüksekte oluşmasına ve birikmesine (termal katmanlaşma/stratifikasyon) imkan tanımıştır. Ancak ilerleyen zamanlarda bu katmanın aşağı doğru hareket ettiği gözlemlenmiştir.

4.2. Senaryo 1: Ana İbadet Alanı (Harim) Yangını Detaylı Bulguları

Harim'in merkezinde başlayan ve hızlı gelişim gösteren (Tepe HRRPUA[3] ~1000 kW/m²) yangın senaryosunda, duman yayılımı aşağıdaki detaylarla karakterize edilmiştir:

- **Hızlı Dikey ve Yatay Yayılım:** Yangın tüyü (fire plume) hızla yükselerek yaklaşık 25-30 metrelik kubbe yüksekliğine kısa sürede ulaşmış ve ardından kubbe yüzeyi boyunca radyal olarak yayılmıştır. Bu ilk yayılım oldukça süratli gerçekleşmiştir.

- **Görüş Mesafesinde Kritik Düşüş:** Yüksek hacmin sağladığı başlangıçtaki geciktirici etkiye rağmen, simülasyonun **11. dakikası (660 saniye) itibarıyla**, ana ibadet alanında zemin seviyesinden 2 metre yükseklikteki **görüş mesafesinin ortalama olarak 5 metrelik kritik eşiğin altına indiği** hesaplanmıştır. (Bkz. Ekler, Şekil A1'deki zaman serisi kesitleri, özellikle 600sn sonrası durum). Bu süre, özellikle Cuma veya bayram namazı gibi yoğun kalabalıkların tahliyesi için kritik bir zaman aralığıdır.

- **Duman Katmanının İnişi ve Etkileri:** Zaman ilerledikçe, tavanda biriken duman katmanının çevreye ısı kaybetmesi, soğuk hava ile karışması ve yoğunluğunun artması nedeniyle aşağı doğru indiği gözlemlenmiştir. Simülasyonun sonlarına doğru (örn. 960sn ve 1200sn), duman katmanının alt sınırının yer yer insan boyu seviyelerine yaklaştığı ve özellikle çıkış kapılarının bulunduğu daha alçak tavanlı bölgeleri ve koridorları doldurarak bu alanlardaki görüşü neredeyse sıfıra indirdiği görülmüştür. Bu durum, çıkışlara ulaşımı engelleme potansiyeli taşımaktadır.

- **Sıcaklık Artışı:** Duman katmanının biriktiği üst seviyelerde sıcaklık önemli ölçüde artarken (simülasyon sonlarında yer yer 100-200°C ve üzeri), başlangıçta zemin seviyesindeki sıcaklık artışı daha sınırlı kalmıştır. Ancak duman katmanının alçalmasıyla birlikte alt seviyelerdeki sıcaklığın da artma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir.

4.3. Senaryo 2: Mahfil Katı Yangını Detaylı Bulguları

Üst katta (+6.00m kotu) yer alan Mahfil'de başlayan ve orta hızda gelişerek aynı tepe HRRPUA değerine (~1000 kW/m²) ulaşan yangın senaryosu, bu bölgenin daha yüksek ve daha hızlı gelişen bir risk profiline sahip olduğunu net bir şekilde ortaya koymuştur:

- **Hızlı Hacim Dolması:** Mahfil katının Harim'e kıyasla çok daha küçük bir hacme sahip olması ve dumanın doğal yükselme eğilimi nedeniyle, yangından kaynaklanan duman bu alanı son derece hızlı bir şekilde doldurmuştur. Harim ile olan bağlantı açıklıkları (merdivenler, galeri boşluğu) dumanın bir miktar yayılmasına izin verse de, birikim hızı çok yüksek olmuştur.

- **Çok Daha Erken Kritik Koşullar:** Bu senaryoda, yangının başlamasından **8 dakika (480 saniye) sonra**, Mahfil katının büyük bir bölümünde zemin seviyesinden 2 metre yükseklikteki **görüş mesafesinin 5 metrenin altına düştüğü** tespit edilmiştir (Bkz. Ekler, Şekil A2, 480sn kesiti). Bu, Harim senaryosuna göre tehlikeli koşullara ulaşma süresinin yaklaşık %27 daha kısa olduğu anlamına gelmektedir ve Mahfil'deki kişiler için mevcut olan güvenli tahliye süresini dramatik ölçüde azaltmaktadır.

- **Yüksek Sıcaklık ve Konsantrasyonlar:** Daha küçük hacim nedeniyle, Mahfil katındaki ortalama sıcaklık artışı ve potansiyel olarak tehlikeli gaz (örn. CO) konsantrasyonlarının yükselme hızı da Harim senaryosuna göre daha yüksek olma eğilimindedir. Görüş mesafesinin yanı sıra artan sıcaklık ve toksisite de tahliye riskini artırmaktadır.

- **Çıkışlara Erişimin Engellenmesi:** Görüşün bu kadar hızla azalması, Mahfil'den Harim'e veya doğrudan dışarıya açılan çıkışlara (varsa) ve merdivenlere ulaşımı çok kısa sürede imkânsız hale getirme potansiyeli taşımaktadır.

4.4. Karşılaştırmalı Değerlendirme ve Sonuçlar

İki senaryonun analizi, aşağıdaki temel sonuçları ve karşılaştırmaları ortaya koymaktadır:

1. **Yayılım Hızı ve Konum:** Her iki senaryoda da duman yayılımı hızlıdır, ancak Mahfil katı, konumu ve hacmi nedeniyle tehlikeli koşulların (özellikle <5m görüş) oluşması açısından Harim'e göre **belirgin şekilde daha risklidir** (8 dakikaya karşılık 11 dakika).

2. **Tahliye Süresi:** Her iki senaryoda da kritik görüş mesafesi eşiğine ulaşma süreleri, büyük ve potansiyel olarak panik halindeki bir kalabalığın tam ve güvenli tahliyesi için **yeterli olmayabilir**.

3. **Mimari Etki:** Caminin geniş açıklıklı, yüksek hacimli yapısı faydalı olmakla birlikte bölümlendirilmemiş yapısı, her iki senaryoda da dumanın hızla yayılmasını kolaylaştıran temel faktördür.

4. **Bölgesel Risk Farklılığı:** Yangının başladığı yer, riskin zamanlamasını ve doğasını önemli ölçüde değiştirmektedir. Bu nedenle, cami genelinde tek tip bir güvenlik yaklaşımı yerine, **farklı bölgelerin (Harim, Mahfil, girişler, merdivenler vb.) özel risklerini dikkate alan detaylı analizler ve stratejiler** geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu detaylı bulgular, Ahmet Hamdi Akseki Camii örneği üzerinden modern camilerin yangın sırasındaki davranışlarına dair önemli nicel ve nitel veriler sağlamaktadır. Bu veriler, sonraki bölümde yapılacak olan mevcut durum değerlendirmesi, yönetmeliklerle karşılaştırma ve iyileştirme önerileri için sağlam bir zemin oluşturmaktadır.

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada elde edilen FDS simülasyonu sonuçları, modern cami mimarisinin kaynağı yazarlar tarafından şüpheli görülen "Mekânın Birliği" ilkesinin, yangın güvenliği açısından kritik ve dikkatle ele alınması gereken bir ikilem yarattığını güçlü bir şekilde ortaya koymaktadır. Simülasyonlarda gözlemlenen dumanın hızla yayılması ve görüş mesafesinin tehlikeli seviyelere süratle düşmesi, geleneksel, kural bazlı yangın güvenliği yaklaşımlarının ötesinde,

camilerin özgün koşullarını dikkate alan, performansa dayalı ve mühendislik temelli çözümlere duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır.

5.1. "Mekânın Birliği" İlkesi ve Yangın Güvenliği İkilemi

"Mekânın Birliği", camilerde cemaatin bütünlüğünü ve kesintisiz bir ibadet alanı deneyimini hedeflerken, yangın güvenliğinin temel prensiplerinden biri olan **bölümlendirme (kompartımantasyon[1])** ile doğrudan çelişmektedir. Simülasyon sonuçları, Ahmet Hamdi Akseki Camii örneğinde bu ikilemin somut sonuçlarını göstermiştir: Yangın kaynağının konumu ne olursa olsun (Harim veya Mahfil), dumanın fiziksel engellerle karşılaşmadan büyük hacimlere hızla yayılması, güvenli tahliye için gereken süreyi dramatik ölçüde kısaltmaktadır. Özellikle Mahfil katında tehlikeli koşulların 8 dakika gibi kısa bir sürede oluşması, bu tür ikincil ancak önemli alanların risk analizinde özel olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

5.2. Mevcut Yönetmelikler ve Performans Açığı

Elde edilen bulgular, Türkiye Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik ve NFPA 101 Hayat Güvenliği Kodu (NFPA, 2018) gibi mevcut standartlar açısından önemli bir tartışma alanı açmaktadır. Bu yönetmelikler, genellikle çıkış kapasitesi, kaçış mesafeleri gibi kural bazlı (prescriptive) gereklilikleri tanımlar. Ahmet Hamdi Akseki Camii gibi yapılar bu gereklilikleri geometrik olarak sağlıyor olabilir. Ancak simülasyonların açıkça gösterdiği gibi, **hızla yayılan duman nedeniyle bu çıkışlara *ulaşmak* zor hale gelebilir.** Bu durum, yönetmeliklerin sadece statik gereklilikleri değil, aynı zamanda yangının dinamik etkilerini, özellikle de dumanın tahliye üzerindeki performansını da dikkate alması gerektiğini ortaya koymaktadır. Mevcut standartların cami gibi özgün yapılar için yetersiz kaldığı durumlarda, performansa dayalı tasarım yaklaşımlarının kullanılması kaçınılmaz görünmektedir.

5.3. Etkin Duman Yönetimi Stratejilerinin Gerekliliği

Simülasyon sonuçları, camilerde kabul edilebilir bir güvenlik seviyesine ulaşmak için **etkin duman yönetim sistemlerinin** vazgeçilmez olduğunu kanıtlamaktadır.

- **Doğal Havalandırmanın Sınırları:** Stratejik açıklıklarla sağlanan doğal havalandırma, küçük yangınlarda veya başlangıç aşamasında kısmi fayda sağlasa da (Selim vd., 2016), simülasyonlarda gözlemlenen büyüklükteki yangınlarda oluşan yoğun duman ve ısı yükünü tahliye etmekte yetersiz kalacaktır. Sadece doğal havalandırmaya güvenmek, yanıltıcı bir güvenlik hissi yaratabilir.

- **Aktif Sistemlerin Önemi:** Bu nedenle, özellikle dumanın birikme eğiliminde olduğu kubbe gibi yüksek hacimlerde **otomatik duman tahliye bacaları** veya **mekanik duman egzoz sistemleri** gibi aktif mühendislik çözümleri kritik öneme sahiptir. Bu sistemler, tehlikeli gazları ve dumanı kontrollü bir şekilde dışarı atarak hem alt katmanlardaki görüş mesafesini korumaya yardımcı olur hem de yapısal hasarı sınırlayabilir. Kubbenin büyük hacmi, dumanı geçici olarak depolayarak bu sistemlerin etkin çalışması için bir avantaj olarak kullanılabilir, ancak bu depolama kapasitesi mutlaka etkin bir tahliye mekanizması ile desteklenmelidir.

5.4. Mimari Tasarımın Rolü ve Potansiyel İyileştirmeler

Yangın güvenliği sadece mekanik sistemlerle değil, aynı zamanda bilinçli mimari tasarım kararlarıyla da artırılabilir:

- **Dengeli Bölümlendirme:** "Mekânın Birliği" estetiğinden tamamen vazgeçmeden, duman yayılımını yavaşlatacak stratejik bölümlendirmeler (örn. merdiven kovalarının yangına dayanıklı ayrılması, giriş hollerinin ayrılması) veya yangın anında devreye giren otomatik duman perdeleri gibi çözümler değerlendirilebilir.

- **Net Tahliye Yolları:** İbadet alanlarından çıkışlara ulaşan güzergahlar mümkün olduğunca kısa, doğrudan ve engelsiz olmalıdır. Karmaşık ve birbirine karışan çıkış rotalarından kaçınılması gerektiği düşünülebilir ayrıca dumanlı ortamlarda, acil durum aydınlatması ve düşük seviyeli, ışıklı veya fotolüminesan yönlendirme işaretleri (wayfinding) hayati önem taşır (Casareale vd., 2017).

5.5. Camilerin Diğer Büyük Toplanma Alanları ile Karşılaştırılması

Camilerin yangın güvenliği profili, stadyumlar, havaalanları gibi diğer büyük toplanma mekanlarıyla karşılaştırıldığında önemli farklılıklar gösterir. Kalabalık yönetimi ve panik riski gibi ortak zorluklar bulunsa da (Song vd., 2006; Gwynne vd., 2016), camilerdeki "Mekânın Birliği" kaynaklı **bölümlendirme eksikliği** ve **doluluk oranlarındaki aşırı değişkenlik** (günlük/Cuma/bayram ve demografik değişimler) camilere özgü, daha karmaşık bir risk matrisi oluşturur. Bu nedenle, diğer yapılar için geliştirilmiş standart çözümlerin doğrudan camilere uygulanması yetersiz kalabilir ve bağlama özel analizler gerektirir.

Bu tartışmalar, camilerde yangın güvenliğinin çok boyutlu bir sorun olduğunu ve hem mühendislik hem de mimari tasarım disiplinlerinin entegre bir şekilde çalışmasını gerektirdiğini göstermektedir. Simülasyon tabanlı analizler, bu entegrasyonu sağlamak ve daha güvenli ibadet mekanları tasarlamak için güçlü bir araç sunmaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, modern cami mimarisinin dikkat çekici bir örneği olan Ahmet Hamdi Akseki Camii'nde gerçekleştirilen Yangın Dinamikleri Simülatörü (FDS) analizleri, "Mekânın Birliği" tasarım felsefesinin yangın güvenliği üzerindeki **önemli etkilerini nicel olarak ortaya koymuştur.** Geniş, açık ve yüksek hacimli ibadet alanlarının, yangın durumunda dumanın hızla yayılmasına ve tahliye için kritik olan görüş mesafesinin tehlikeli seviyelere düşmesine **ne denli yatkın olduğu tespit edilmiştir.** Simülasyonlar, ana ibadet alanında (Harim) 11 dakika, daha küçük ve üst kotta bulunan Mahfil'de ise **8 dakika** gibi kısa sürelerde görüş mesafesinin 5 metrenin altına indiğini göstererek, acil durum müdahalesi ve güvenli tahliye için **mevcut olan zamanın kısıtlı olduğunu** göstermektedir. Özellikle Mahfil gibi alanların, konumu ve hacmi nedeniyle **daha hızlı risk altına girdiği** anlaşılmıştır.

Bu bulgular ışığında, cami gibi benzersiz mimari özelliklere ve değişken doluluk oranlarına sahip büyük toplanma mekanlarında, standart yangın güvenliği yaklaşımlarının tek başına yeterli olmayacağı ve **tasarım kararlarının, kökeni belirsiz mottolar veya tarihsel taklitçilik yerine, akılcı ve performansa dayalı analizlerle şekillendirilmesi gerektiği** açıktır. Yapıya özgü,

etkin duman yönetim stratejilerinin tasarlanıp uygulanması hayati önem taşımaktadır. Örneğin, "Mekânın Birliği" ilkesi yorumlanırken, tamamen açık plan yerine, yangın anında duman yayılımını sınırlayacak **stratejik bölümlendirme (kompartımantasyon) yaklaşımları** (belki belirli fonksiyon alanlarını ayırarak) değerlendirilebilir. Benzer şekilde, tahliye tasarımı konusunda, **tarihi yığma yapıların dolaylı çıkış düzenlerini taklit etmek yerine, modern güvenlik anlayışıyla uyumlu, açık ve direkt tahliye rotalarının** tasarlanması esastır. Kubbenin yüksek hacminin dumanı geçici olarak tamponlama potansiyeli sunması değerli olsa da, bu pasif özelliğe güvenmek yerine, **kubbe kasnağındaki pencerelerin sabit olmak yerine, duman tahliyesine olanak tanıyacak şekilde otomatik veya manuel olarak açılabilir (operable) tasarlanması** gibi aktif ve güvenilir duman tahliye sistemlerine olan ihtiyaç açıktır. Dolayısıyla, elde edilen sonuçlar, mevcut yangın yönetmeliklerinin modern camilerin karşılaştığı bu özgün riskleri ve potansiyel çözüm yaklaşımlarını (hızlı duman yayılımı, dinamik doluluk, aktif/pasif sistem entegrasyonu vb.) ne ölçüde etkin bir şekilde ele aldığının sorgulanması gerektiğini ve potansiyel olarak güncellenmesi veya tamamlayıcı, performansa dayalı tasarım kılavuzları ile desteklenmesi gerekliliğini güçlü bir şekilde ortaya koymaktadır.

6.1. Çalışmanın Kısıtlamaları

Bu çalışmadan elde edilen değerli bulguların yorumlanmasında, bazı metodolojik kısıtlamaların göz önünde bulundurulması önemlidir. Öncelikle, analizler belirli iki yangın senaryosuyla (elektrik kaynaklı, merkezi konumlu) sınırlıdır; farklı yangın başlangıç noktaları, daha yüksek veya farklı yanıcı yükler ya da farklı yangın büyüme hızları (örneğin kundaklama gibi kasıtlı durumlar) duman yayılım dinamiklerinde değişikliklere yol açabilir. Bununla birlikte, kullanılan üç boyutlu model her ne kadar gerçek geometriyi yüksek doğrulukla temsil etse de kaçınılmaz olarak bazı basitleştirmeler içermektedir ve modele atanan malzeme özellikleri literatür verileri ile makul mühendislik varsayımlarına dayanmaktadır; gerçek yapıdaki malzemelerin kesin özellikleri farklılık gösterebilir. Ayrıca, simülasyonlarda varsayılan doğal havalandırma koşulları (kapalı kapılar, belirli menfezlerin açık olması), gerçek bir yangın olayında panikle açılan kapılar veya dış hava koşulları (rüzgar vb.) gibi dinamik faktörlerden etkilenebilir ve duman hareketini farklılaştırabilir. Ek olarak, bu çalışma duman yayılımına odaklandığı için, insan tahliye davranışını ve dumanın tahliye süreci üzerindeki doğrudan etkileşimini modelleyen bir tahliye simülasyonu içermemektedir. Son olarak, seçilen 0.4 metrelik hesaplama ağı (mesh) çözünürlüğü, genel akış dinamiklerini yakalamak için yeterli olsa da, özellikle yangın kaynağına çok yakın bölgelerdeki mikro ölçekli akış yapılarını tam detaylarıyla çözmede bazı sınırlılıklar barındırabilir.

6.2. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu çalışmanın ortaya koyduğu bulgular ve yukarıda belirtilen kısıtlamalar, camilerde yangın güvenliği alanında daha ileri araştırmaların gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır. Gelecekteki çalışmaların öncelikle, FDS gibi duman yayılımı simülasyonlarını, etmen tabanlı tahliye modelleri (örneğin, FDS+Evac veya benzeri araçlar) ile entegre etmesi önerilmektedir; bu sayede dumanın görünürlük ve toksisite etkileri altında gerçekçi tahliye süreleri, çıkış kullanım paternleri ve potansiyel darboğazlar daha doğru bir şekilde belirlenebilir. Bir diğer önemli araştırma alanı, farklı yangın başlangıç noktalarını (girişler, merdiven boşlukları, yüksek yanıcı yük bulunan alanlar vb.), farklı yangın türlerini (örn. halı, ahşap elemanlar, elektrik panoları)

ve farklı ısı yayılım oranlarını içeren daha kapsamlı bir senaryo matrisi üzerinden analizler yapmaktır. Ayrıca, çeşitli duman kontrol stratejilerinin (kubbede otomatik açılır pencereler/bacalar, mekanik duman tahliye sistemleri, duman perdeleri gibi) performanslarının ve maliyet etkinliklerinin karşılaştırmalı olarak simülasyonlarla incelenmesi ve optimize edilmesi büyük fayda sağlayacaktır. Bunlara ek olarak, model girdilerinin (malzeme özellikleri, havalandırma açıklıklarının durumu, mesh boyutu vb.) sonuçlar üzerindeki etkisini sistematik olarak değerlendirmek amacıyla parametrik çalışmalar ve hassasiyet analizleri yürütülmelidir. Bulguların genelleştirilebilirliğini artırmak adına, farklı mimari özelliklere (tarihi yapılar, farklı plan ve kubbe tipleri, değişen kapasiteler) sahip camiler üzerinde de benzer analizlerin yapılması önemlidir. Son olarak, tüm bu detaylı çalışmalardan elde edilecek derinlemesine bilgilerin, camilerin özgün koşullarını dikkate alan, performansa dayalı yangın güvenliği tasarım kılavuzlarının geliştirilmesine temel oluşturması hedeflenmelidir. Bu yönde yapılacak ileri araştırmalar, camilerde ibadet edenlerin güvenliğini en üst düzeye çıkarmak için gerekli olan bilgi birikimini ve mühendislik çözümlerini geliştirmede kritik bir rol oynayacaktır.

REFERANSLAR

"Ahmet Hamdi Akseki Camii." 2024. Wikipedia. Accessed May 13, 2024. https://tr.wikipedia.org/w/index.php?title=Ahmet_Hamdi_Akseki_Camii&oldid=31101397. (Accessed May 13, 2024)

"PyroSim." 2025. Erişim Tarihi Mart 13, 2025. https://www.thunderheadeng.com/pyrosim.

Alfakhry, A. A., & Yahya, L. M. (2022). A Simulation Study to Suggest an Emergency Exits in Mosul's Mosques in Case of Emergency. International Journal of Safety and Security Engineering, 12(5), 569–575. https://doi.org/10.18280/ijsse.120504

Alghamdi, M. (2015). Software Evaluation for Crowd Evacuation - Case Study: Al-Masjid an-Nabawi. (Master's Thesis, University of Malaya).

Alginahi, Y., Mudassar, M., Kabir, M. N., & Tayan, O. (2019). Analyzing the Crowd Evacuation Pattern of a Large Densely Populated Building. Arabian Journal for Science and Engineering, 44(3), 3289–3304. https://doi.org/10.1007/s13369-018-3411-z

Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. Proceedings of the National Academy of Sciences, 99(Suppl 3), 7280–7287. https://doi.org/10.1073/pnas.082080899

Casareale, C., Bernardini, G., Bartolucci, A., Marincioni, F., & D'Orazio, M. (2017). Cruise ships like buildings: Wayfinding solutions to improve emergency evacuation. Building Simulation, 10(6), 989–1003. https://doi.org/10.1007/s12273-017-0381-0

Chen, Y., Wang, C., & Hu, B. (2023). An agent-based simulation framework for developing the optimal rescue plan for older adults during the emergency evacuation. Simulation Modelling Practice and Theory, 128, 102797. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2023.102797

Gwynne, S., Galea, E. R., Owen, M., Lawrence, P. J., & Filippidis, L. (2016). A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment. Building and Environment, 106, 149–160. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.011

Haron, F., Alginahi, Y. M., Kabir, M. N., & Mohamed, A. I. (2012). Software Evaluation for Crowd Evacuation - Case Study: Al-Masjid An-Nabawi. International Journal of Computer Science Issues, 9(2), 128–134.

McGrattan, K., McDermott, R., Hostikka, S., & Floyd, J. (2013). Fire Dynamics Simulator (Version 6) Technical Reference Guide. National Institute of Standards and Technology.

Nassar, K., & Bayyoumi, A. (2012). A simulation study of the effect of Mosque design on egress times. In Proceedings - Winter Simulation Conference (pp. 1–8). https://doi.org/10.1109/WSC.2012.6465153

NFPA-101. (2018). Life Safety Code. National Fire Protection Association.

Nguyen, M. H., Ho, T. V., & Zucker, J.-D. (2013). Integration of Smoke Effect and Blind Evacuation Strategy (SEBES) within fire evacuation simulation. Simulation Modelling Practice and Theory, 36, 44–59. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2013.04.001

Onay, A. (2008). Türkiye'nin Cami Profili (1. Basım). Dem Yayınları.

Pelechano, N., & Badler, N. I. (2006). Modeling crowd and trained leader behavior during building evacuation. IEEE Computer Graphics and Applications, 26(6), 80–86. https://doi.org/10.1109/MCG.2006.112

Başlık, İlk Harfler Büyük Harflerle, İtalik, Calibri, 10 Punto

Sabah, S. Al, Alsharqawi, N., & Haddad, E. Al. (2018). The aftermath of the Kuwait mosque bombing: A retrospective cohort analysis and lessons learned. International Journal of Surgery, 56, 15–20. https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2018.06.003

Satır, M. S., & Topraklı, A. Y. (2021). Qualitative and quantitative analysis of fire evacuation risks of 18 historical mosques in Ankara-Altındağ region. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36(3). https://doi.org/10.17341/gazimmfd.824520

Selim, O. M., Abdelmaksoud, W., ElBialy, E. E., & Khalil, E. E. (2016). Smoke Behaviour and Management in Domed Mosques. 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, San Diego, California. https://doi.org/10.2514/6.2016-0995

Song, W., Lu, W., Fan, W., & Lo, S. (2006). Analysis of pedestrian evacuation in stadiums based on cellular automata model, Building and Environment, 41(8), 1184-1191. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.015.

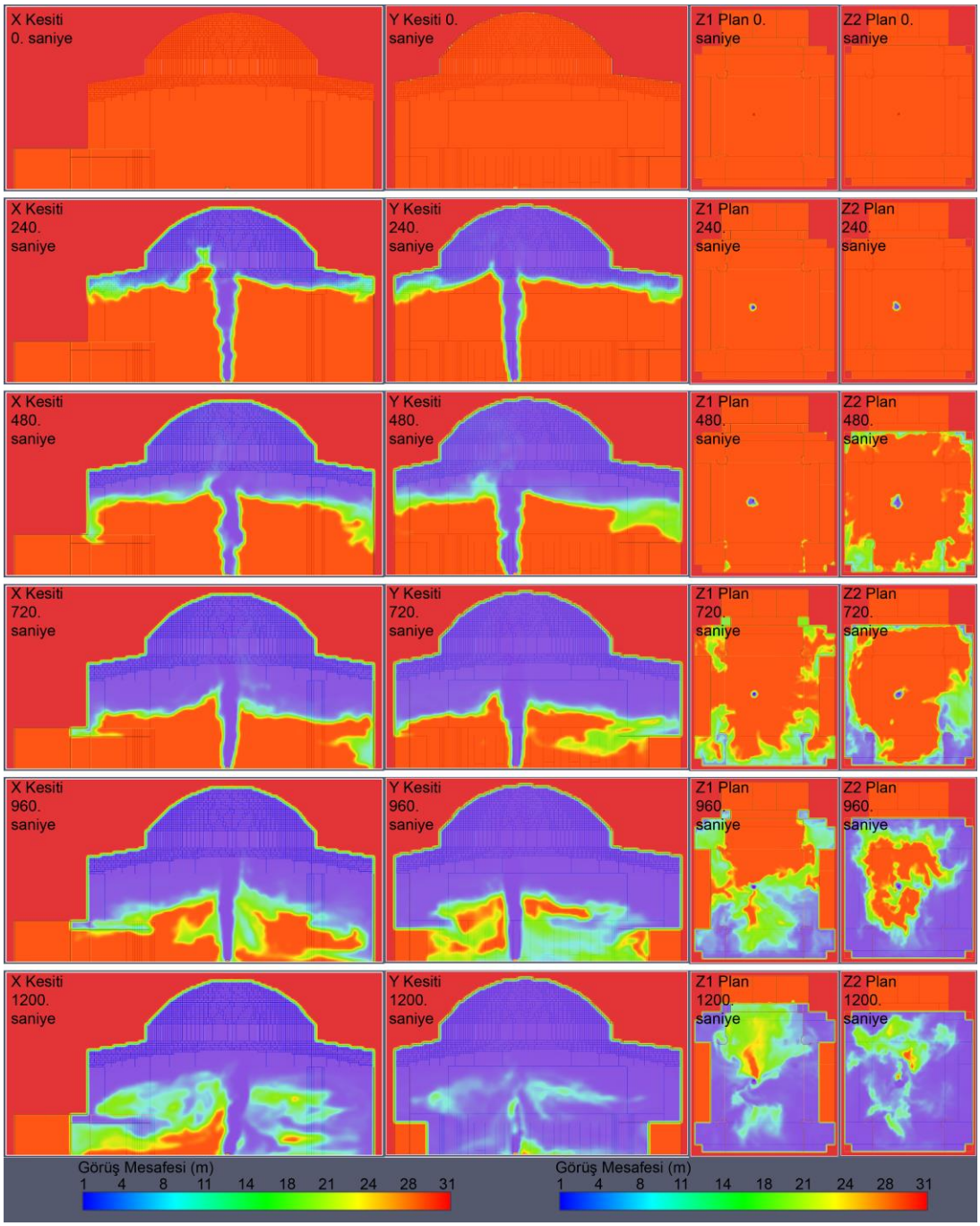
Topraklı, A. Y., & Satır, M. S. (2024). Assessing Evacuation Risks in Prominent Historical Mosques: An Integrated Quantitative and Qualitative Approach via the HM-ERI Framework. https://doi.org/10.2139/ssrn.4793000

Topraklı, A. Y., Sedıhemaıtı, S., & Ağraz, G. (2019). Evaluation of evacuation problem of modern Ottoman classical period mosques types. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34(4), 2261–2270. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.490086

EK A:

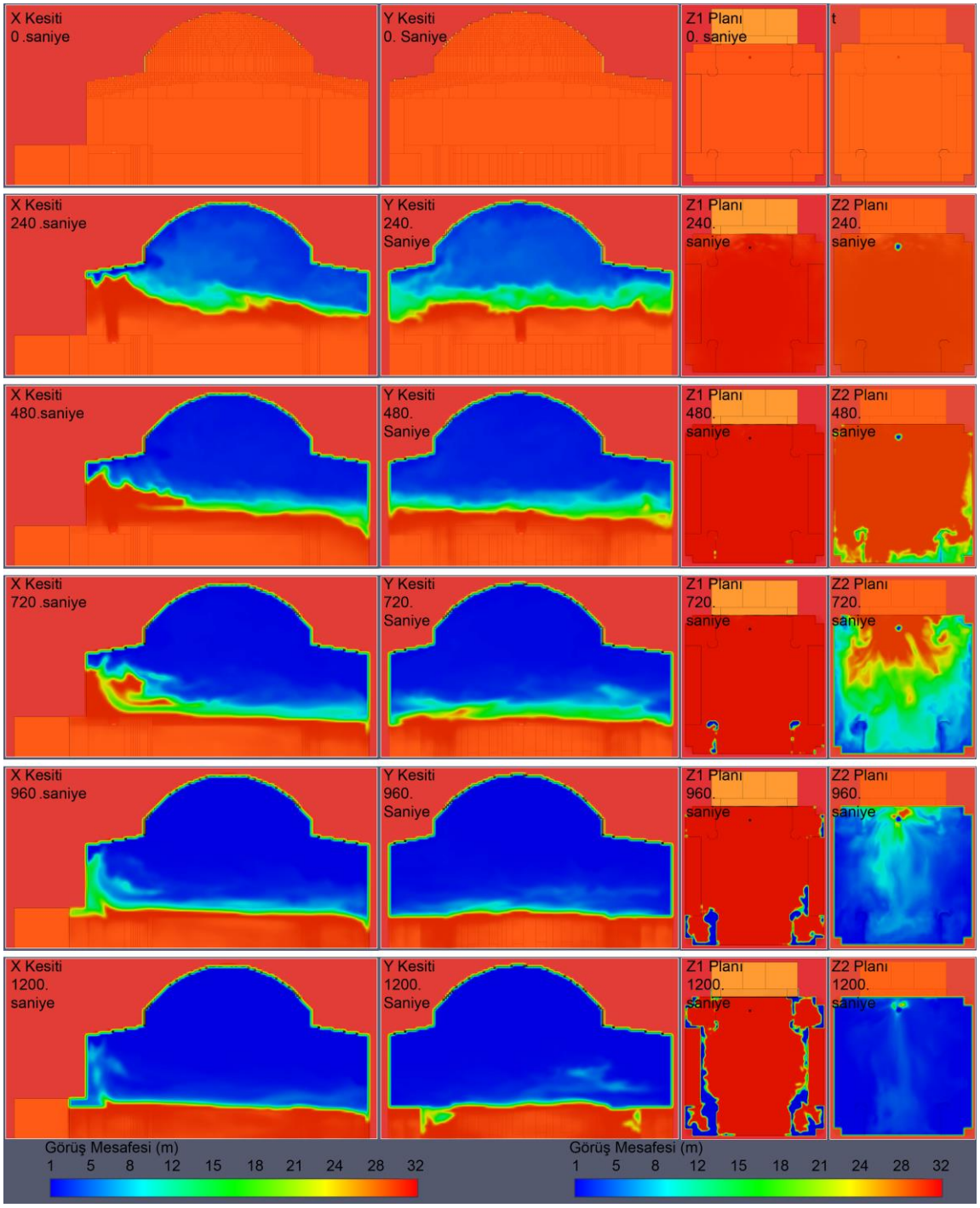
Bu bölümde, FDS simülasyonlarından elde edilen görsel sonuçlar sunulmaktadır. Görselleştirmeler, özellikle dumanın zaman içindeki yayılımını ve tahliye güvenliği açısından kritik olan görüş mesafesindeki (visibility) değişimi göstermektedir. Sonuçlar, belirli zaman aralıklarında (0, 240, 480, 720, 960 ve 1200 saniye) alınan kesitler halinde sunulmuş ve görüş mesafesi değerleri, metrenin altında tehlikeli kabul edilen düşük değerlerden (örn. kırmızı/turuncu tonlar) yüksek değerlere (örn. mavi/yeşil tonlar) doğru değişen bir renk ölçeği ile temsil edilmiştir. Görüş mesafesi, duman yoğunluğuna bağlı olarak hesaplanan ve bir kişinin çevresini ne kadar net görebildiğini ifade eden bir ölçüttür; genellikle güvenli tahliye için minimum 5-10 metre arası bir eşik değer kabul edilir.

Başlık, İlk Harfler Büyük Harflerle, İtalik, Calibri, 10 Punto



Şekil A1: Senaryo 1 (Harim'deki Merkezi Yangın) Duman Görünürlüğü Zaman Serisi

Bu şekil serisi (**Şekil A1)**, ana ibadet alanının (Harim) merkezinde başlayan yangın senaryosu (Senaryo 1) için farklı zaman anlarındaki (0, 240, 480, 720, 960, 1200 sn) duman yayılımını ve görüş mesafesi dağılımını göstermektedir. Görüntüler, hem yapı boyunca alınan dikey (X ve Y eksenleri) hem de farklı yüksekliklerde alınan yatay (Z ekseni, örn. Z=+2.0m ve Z=+8.0m gibi) kesitleri içermektedir. Renk ölçeği, görüş mesafesinin metre cinsinden değerini temsil eder (örneğin, 1m ile 31m arası). Şekiller, dumanın başlangıçta nasıl kubbe altında biriktiğini, zamanla nasıl aşağıya doğru indiğini ve özellikle 660 saniyeden (11 dakika) sonra Harim genelinde görüş mesafesinin nasıl kritik seviyelere (5 metrenin altına) düştüğünü görsel olarak ortaya koymaktadır.



Şekil A2: Senaryo 2 (Mahfil'deki Merkezi Yangın) Duman Görünürlüğü Zaman Serisi

Bu şekil serisi ise (**Şekil A2)** üst katta yer alan Mahfil'in merkezinde başlayan yangın senaryosu (Senaryo 2) için aynı zaman anlarındaki (0, 240, 480, 720, 960, 1200 sn) duman yayılımını ve görüş mesafesi dağılımını sunmaktadır. Yine benzer dikey ve yatay kesitler kullanılmıştır. Renk ölçeği bu seride de görüş mesafesinin metre cinsinden değerini temsil eder (örneğin, 1m ile 32m arası). Şekiller, dumanın Mahfil katında Harim'e kıyasla çok daha hızlı biriktiğini ve 480 saniye (8 dakika) gibi kısa bir sürede kat genelinde görüş mesafesinin tehlikeli seviyelere (5 metrenin altına) indiğini açıkça göstermektedir. Bu durum, Mahfil katının tahliye açısından taşıdığı yüksek riski görsel olarak doğrulamaktadır.