



Fire safety optimization in vertical voids in green buildings: performance and sensitivity analysis for smoke extraction and temperature control

Mehmet Akif Yıldız¹ , Figen Beyhan^{2*}

¹Department of Architecture, Faculty of Art, Design and Architecture, Sakarya University, 54050, Sakarya, Türkiye

²Department of Architecture, Faculty of Architecture, Gazi University, 06570, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Vertical void design model for smoke extraction in the building.
- Numerical and sensitivity analysis for smoke extraction and indoor temperature control
- Interaction of natural ventilation design and fire safety design in green buildings

Keywords:

- Green buildings
- Vertical interior voids,
- Smoke extraction,
- Ambient Temperature
- Sensitive analysis

Article Info:

Research Article

Received: 03.11.2024

Accepted: 24.12.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1578525

Graphical/Tabular Abstract

Fire development in vertical voids in green buildings was analyzed, and a smoke extraction and temperature control model were proposed. A total of 28 scenarios were developed with input parameters consisting of vertical void dimensions, air inlet-outlet dimensions, and window dimensions (Table A).

Table A. Mean temperature values calculated for the scenarios

Scenario	Gap width	Gap height	Gap air inlet and outlet width	Gap air inlet and outlet height	Window width	Window height	Temperature mean (°C)
A1	200	1050	360	100	100	150	52.99
A2	150	1050	360	100	100	150	54.00
A3	100	1050	360	100	100	150	48.76
A4	50	1050	360	100	100	150	50.35
A5	150	1400	360	100	100	150	50.29
A6	150	1575	360	100	100	150	52.57
A7	50	1400	360	100	100	150	51.83
A8	50	1575	360	100	100	150	52.89
B1	50	1400	360	250	100	150	53.63
B2	50	1400	360	200	100	150	52.36
B3	50	1400	360	150	100	150	50.51
B4	50	1400	360	50	100	150	48.39
B5	50	1400	250	50	100	150	48.64
B6	50	1400	200	50	100	150	46.30
B7	50	1400	150	50	100	150	44.67
B8	50	1400	100	50	100	150	44.38
B9	50	1400	50	50	100	150	32.53
C1	50	1400	50	50	200	150	25.73
C2	50	1400	50	50	150	150	30.58
C3	50	1400	50	50	50	150	49.02
C4	50	1400	50	50	50	200	45.23
C5	50	1400	50	50	50	100	54.11
C6	50	1400	50	50	50	50	53.49
C7	50	1400	50	50	100	50	47.97
C8	50	1400	50	50	150	50	45.96
C9	50	1400	50	50	200	50	43.58

Purpose: It was aimed to provide smoke extraction through the void in case of fire and to provide indoor temperature control through the design of the vertical void in the building.

Theory and Methods: In this study, Fire Dynamics Simulator (FDS), which is a computational fluid dynamics model, and sensitivity analysis, which is a statistical analysis method, were used to provide optimum criteria for architectural design parameters related to the vertical void. As a result of determining the geometries of the void, air inlets and outlets in the outer skin of the void, and the geometries of the windows as input variables, sequential scenarios were performed by parametric analysis as a result of a total of 28 scenarios, the most effective geometries were presented for the extraction of smoke through the void. Finally, the sensitivity analysis method statistically expressed the effect levels of the design parameters on the ambient temperature.

Results: The analyses of the scenarios in the context of smoke spread showed that narrowing the void width and increasing the void's height by one layer positively affected the extraction of smoke through the void. As the air inlet and outlet size decreased, the density of smoke in the void increased. In addition, rectangular window surfaces contributed positively to the evacuation of smoke in the fire room. According to the multivariate regression analysis results from the mean temperatures, the cavity height did not affect the ambient temperature. In contrast, the air inlet, outlet width, and ambient temperature had the highest effect.

Conclusion: It has been shown in the study that with appropriate architectural design parameters, significant contributions can be made to smoke extraction in fire through vertical voids in the building.

Correspondence:

Author: Figen Beyhan
e-mail: fbeyhan@gazi.edu.tr
phone: +90 312 258 2370



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

Journal of The Faculty of Engineering
and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Yeşil binalardaki düşey boşluklarda yangın güvenliği optimizasyonu: Duman tahliyesi ve sıcaklık kontrolü için performans ve duyarlılık analizi

Mehmet Akif Yıldız¹, Figen Beyhan^{2*}

¹Sakarya Üniversitesi, Sanat Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 54050, Sakarya, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 06570, Ankara, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Duman tahliyesi için bina içi düşey boşluk tasarım modeli
- Duman tahliyesi ve bina içi sıcaklık kontrolü için sayısal ve duyarlılık analizi
- Yeşil binalardaki doğal havalandırma tasarımı ile yangın güvenliği tasarımının etkileşimi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 03.11.2024

Kabul: 24.12.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1578525

Anahtar Kelimeler:

Düşey iç boşluklar,
duman tahliyesi,
ortam sıcaklığı,
simülasyon,
duyarlılık analizi

ÖZ

Bu çalışmada, yeşil bina tasarımlarında düşey iç boşluklarda oluşan baca etkisine bağlı hava akımları ve bu akımların duman tahliyesi ile bina içi sıcaklık kontrolüne etkilerini incelemek amacıyla performansa dayalı bir yangın tasarımı yaklaşımı geliştirilmiştir. Çalışma, yazarlar tarafından daha önce literatürde sunulan, duman tahliyesine yönelik tasarım tahliye boşluğu içeren bir prototip bina modelinin geliştirilmesi ve optimize edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Modelde, boşluk genişliği ve yüksekliği, boşluktaki hava giriş-çıkış açıklıkları ve odalardaki pencere genişliği ile yüksekliği olmak üzere altı bağımsız değişkene dayalı tasarım senaryoları oluşturulmuştur. Parametrik analiz yöntemiyle her bir değişken sıralı olarak analiz edilmiş ve tasarım değişkenlerinin duman yayılımı ve sıcaklık kontrolü üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Çok değişkenli regresyon analizi kullanılarak bağımsız değişkenlerin ortam sıcaklığı üzerindeki etkileri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, duman tahliyesi ve sıcaklık kontrolü için tasarım parametrelerinin benzer düzeyde etkili olduğunu göstermiştir. Ancak, boşluk yüksekliği duman tahliyesi üzerinde önemli bir etkiye sahipken, ortam sıcaklığını anlamlı şekilde etkilemediği belirlenmiştir. Çalışmada elde edilen regresyon denklemiyle modelin doğruluğu %99 oranında sağlanmış ve bulguların güvenilirliği teyit edilmiştir.

Fire safety optimization in vertical voids in green buildings: performance and sensitivity analysis for smoke extraction and temperature control

HIGHLIGHTS

- Vertical void design model for smoke extraction in the building
- Numerical and sensitivity analysis for smoke extraction and indoor temperature control
- Interaction of natural ventilation design and fire safety design in green buildings

Article Info

Research Article

Received: 03.11.2024

Accepted: 24.12.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1578525

Keywords:

Vertical interior voids,
smoke extraction,
ambient temperature,
simulation,
sensitivity analysis

ABSTRACT

This study developed a performance-based fire design approach to investigate the air currents due to the stack effect formed in vertical interior voids in green building designs and the effects of these currents on smoke extraction and indoor temperature control. The study was conducted to develop and optimize a prototype building model with a design exhaust void aimed at smoke extraction, which was previously presented in the literature by the authors. The model created design scenarios based on six independent variables: void width and height, air inlet-outlet openings in the void, and window width and height in the rooms. Each variable was analysed sequentially using the parametric analysis method, and the effects of design variables on smoke spread and temperature control were determined. The effects of independent variables on ambient temperature were statistically evaluated using multivariate regression analysis. The results showed that the design parameters for smoke extraction and temperature control were effective at a similar level. However, while void height significantly affected smoke extraction, it was determined that it did not significantly affect ambient temperature. With the regression equation obtained in the study, the accuracy of the model was provided at a rate of 99%, and the reliability of the findings was confirmed.

1. Giriş (Introduction)

Yapılı çevrelerin sürdürülebilirlik sorunlarına mimari çözüm yollarından biri olarak ortaya çıkan yeşil binalar, kaynakları verimli kullanmayı ve yapıların insan kaynaklı ekolojik etkilerini en aza indirmeyi hedefleyen yüksek performanslı yapılar olarak yaygınlaşmaktadır. Faydalı tasarım bileşenlerinin bir araya gelmesi ile meydana gelen yeşil binalar için yangın güvenliği önemli bir konu olarak ortaya çıkmaktadır. Yangın risklerinin tasarımın erken aşamalarında tespit edilememesi ve çözümlerin geliştirilememesi durumunda, bina inşa ya da kullanım aşamasında meydana gelebilecek bir yangın; can ve mal kaybına, hizmetlerin aksamasına ve sürdürülebilirlik hedeflerinin başarısız olmasına yol açmaktadır. Yangın güvenliği, tüm binalar için dikkate alınması gereken önemli bir risk olmasına rağmen, yeşil binaların sürdürülebilirlik hedeflerini içeren tasarım özellikleri bu konunun önemini daha da artırmaktadır. Yeşil binalarda iç mekân konfor kalitesini artırmak ve doğal havalandırmadan maksimum fayda sağlamak amacıyla tasarlanan bina içi düşey boşluklar, oluşturdukları düzensiz hava hareketleri nedeniyle yangın güvenliği açısından dikkatle değerlendirilmesi gereken alanlardır.

Yeşil binalar, iklim koşullarından üst düzeyde faydalanmayı sağlamak amacıyla, dış kabuktaki ve bina içerisindeki boşluk oranlarının geleneksel binalara göre artırılmasıyla ayrılmaktadır. Ancak, özellikle düşey boşluklarda oluşan düzensiz hava akımları, yangın sırasında yüksek ısı ve zehirli gaz içeren dumanın bu boşluklar aracılığıyla mekânlar arasında hızla yayılmasına neden olmaktadır. İç boşluklarda meydana gelen hava hareketlerinin kontrolü, yalnızca doğal havalandırmanın etkin kullanımını değil, yangın güvenliği tasarımını da doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, binanın herhangi bir yerinde meydana gelebilecek yangının, katlar arasında hızla yayılmasını ve büyümesini kolaylaştıran düşey boşluklar, bu çalışmanın temel problemi olarak ele alınmıştır. Kontrollü hava akışlarının sağlanabilmesi amacıyla, yeşil bina tasarımlarının temel unsurlarından biri olan düşey boşlukların ve bunlarla ilişkili havalandırma açıklıklarının konumu ile geometrik özellikleri dikkate alınarak bir yöntem geliştirilmiştir. Performansa dayalı yangın güvenliği tasarımı kapsamında, duman tabakası seviyesi ve sıcaklık kontrolü için uygun tasarım stratejilerini içeren bir model oluşturulmuş ve optimal bir çözüm önerisi sunulmuştur.

Binalardaki düşey boşluklarla ilgili olarak yangın güvenliği problemlerini ortaya koyma ve çözüm sunma çabaları literatürde yer almaktadır. Sayısal ve deneysel çalışmalarla atrium, çift kabuklu cephe (DSF) boşluğu ile rüzgâr ve güneş bacalarındaki riskler analiz edilmiş ve çözüm stratejileri sunulmuştur. Atriumlar ile ilgili bazı çalışmalar mekanik egzoz sistemlerinin geometrileri ile taze hava çıkış hızlarının duman ve alev dağılımına etkilerini değerlendirirken [1-3], bazı çalışmalarda ise geniş ölçekli atriumlarda mekanik egzoz sistemleri ile doğal duman tahliye sistemlerinin farklı ısı salınım oranlarına sahip yangınlarda duman yayılımına etkisini incelemiştir [4-7]. Ayrıca doğal hava akımlarının atrium dış ortamı ile doğrudan ilişkisini göstermek için bir çalışmada atrium içindeki hava hızı ve hava sıcaklığı üzerindeki etkilerini farklı panjur açıklığı senaryoları ile analiz etmiştir [8]. Bu çalışmalara ek olarak mimari tasarım parametreleri ile yangın parametrelerinin bir arada değerlendirildiği çalışmalarda ise havalandırma açıklıklarının konumu ve büyüklüğü, bina geometrisi, atrium çevresi havalandırma koşulları ile birlikte atrium boyutlarının yangına etkisini inceleyerek atriumda duman ve alev dağılımı için tasarım kriterleri tartışılmıştır. [9, 10].

Çift cidarlı cephe boşluklarında dış veya iç camlara yerleştirilen jaluzilerin termal performansın yanı sıra yangına etkilerini sayısal analizlerle araştıran çalışmalar jaluzilerin duman yayılımını

hızlandırdığını, sıcaklık dağılımını değiştirdiğini göstermiştir [11-13]. Çift kabuklu cephe boşluğu tasarımının yangın gelişimine etkisini inceleyen bazı çalışmalarda ise boşluğun boyutsal özelliklerinin boşluktaki sıcaklık seviyeleri, duman ve alev hareketlerini sayısal ve deneysel yöntemlerle irdelemiştir. Boşlukta oluşan baca etkisi ile iç ve dış sıcaklık farklılıklarında boşluk genişliğinin değişimi ve ısı yama oranı önemli etkiler göstermiştir [14-18]. Bu çalışmalara ilave olarak DSF sistemlerini yüksek sayıda senaryo ile inceleyen bir çalışma ise boşluk boyutlarının yanı sıra havalandırma açıklıklarının boyutlarını da inceleyerek duman gelişimini analiz etmiştir. Bu çalışma boşluk genişliğinin yanı sıra pencere geometrisinin duman yayılımını etkilediğini göstermiştir [19]. Diğer çalışmalarda ise DSF boşluk tipleri ve plan tiplerinin yangın anında ortaya çıkan dumanın yayılmasını nasıl etki ettiği araştırılmış olup, özellikle DSF tiplerinin dumanın hareket yönünü ve hızını değiştirdiğini gözlemlemiştir [20,21].

Düşey iç boşluklarda biri sıcak, diğeri soğuk hava giriş ve çıkışları ile bina içi hava akımları oluşturarak güneş ışımasını ve rüzgâr etkisiyle soğutma veya ısıtmanın kontrol altına alınmasını amaçlayan güneş ve rüzgâr bacaları kullanılmaktadır. Bu bacaların dumanın boşluk aracılığıyla tahliyesi için de uygulanabileceğini irdeleyen sayısal çalışmalar bulunmaktadır [17, 22, 23]. Sayısal çalışmalarda tasarlanan modellerde farklı boyutlardaki giriş ve çıkış açıklıkları ile yangın boyutu farklılaşmasına dayalı duman tahliyesini analizleri gerçekleştirilmiştir.

Düşey iç boşlukların yangın güvenliği bağlamında incelendiği çalışmalar genel olarak duman, alev yayılımı ve sıcaklık seviyelerinin meydana getirdiği riskleri incelemiştir. Düşey iç boşluk yoluyla yangının mekânlar arası ve cephe boyunca gelişimi, cephedeki cam yüzeylerde yüksek sıcaklıkta patlama riski seviyeleri araştırılmıştır. Bu çalışmada literatüre katkı olarak düşey boşlukla ilişkili mimari tasarım parametreleri için optimum kriterler ortaya koyulması amacıyla bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli olan Yangın Dinamiği Simülatörü (FDS) ve istatistiksel analiz yöntemi olan duyarlılık analizi yöntemleri kullanılmıştır. Boşluğun, boşluk dış kabuğunda yer alan hava giriş çıkışların ve pencerelerin geometrilerinin girdi değişkeni olarak belirlenmesi neticesinde parametrik analize uygun olarak sıralı senaryolar gerçekleştirilmiştir. Toplam 28 senaryo neticesinde dumanın diğer mekânlara yayılmadan boşluk aracılığıyla tahliyesi için en uygun geometriler sunulmuştur. Son olarak duyarlılık analizi yöntemi ile ortam sıcaklığına tasarım parametrelerinin etki düzeyleri istatistiksel olarak ifade edilmiştir.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Yeşil binalarda yangın güvenliği açısından değerlendirilmesi gereken, ancak akademik çalışmalarda sıkça ele alınmayan iç mekân hava akışlarını kontrol eden düşey boşluklar için yangın güvenliği tasarım bileşenleri belirlenmiştir. Bu bileşenleri belirlemek için performansa dayalı yangın güvenliği tasarımı uygulanmıştır. Bu çalışmada sunulan performansa dayalı model, Yıldız ve Beyhan [17] çalışmasıyla tasarlanan prototip bina üzerine geliştirilmiş ve duman tahliyesi ve sıcaklık kontrolü için optimize edilmiş bir versiyondur. Önceki çalışmada, diğer tasarım parametreleri sabit tutularak yalnızca tahliye boşluğunun genişlik ve yüksekliğinin duman tahliyesine etkisi analiz edilmiştir. Ancak bu çalışmada herhangi bir optimizasyon sunulmamış, yalnızca en uygun tahliye boşluğu genişliği ve yüksekliği için kriterler belirlenmiştir.

Yeni çalışmada, önceki çalışmadaki 8 senaryoya ek olarak tahliye boşluğuna ilişkin diğer doğal havalandırma tasarım parametreleri de dahil edilerek toplam 28 senaryo modellenmiştir. 2 bağımsız değişkene (tahliye boşluğu genişliği ve yüksekliği), tahliye boşluğuna

bakan odaların pencere genişlik ve yüksekliği ile hava giriş-çıkış açıklıklarının genişlik ve yüksekliği olmak üzere 4 yeni bağımsız değişken eklenmiştir. Bu sayede, bina içindeki alanlara yayılmadan, tahliye boşluğu yoluyla dumanın etkin bir şekilde tahliyesi için optimum kriterler belirlenmiştir.

İlk çalışmada, yangın simülasyonları için FDS 6.7.6 ve Smokeview 6.7.6 kullanılmış, geometrik düzenlemeler ve simülasyonlar için PyroSim 2021 sürümünden yararlanılmıştır. Yeni çalışmada ise CFD çözümleri için FDS 6.9.1 ve Smokeview 6.9.1, geometri ve simülasyonlar için PyroSim 2024 kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken (ortam sıcaklığı) üzerindeki etkilerini istatistiksel olarak değerlendirmek için çok değişkenli regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarını düzenlemek için Matlab 2021b, regresyon analizini yapmak için ise IBM SPSS Statistics 2021 (Version 28.0) kullanılmıştır. Tablo 1, bu çalışmada önceki ve yeni modelin temel farklılıklarını özetlemektedir.

Performansa dayalı yangın güvenliği tasarımı, birçok sistemi ve alt bileşenleri içeren karmaşık bir süreçtir. Society of Fire Protection Engineers (SFPE) kuruluşunca oluşturulan ve bu çalışmaya göre düzenlenen performansa dayalı yangın güvenliği tasarım aşamaları, yangın modelleme ve model değerlendirme aşamalarıyla geliştirilmiş olup, bu modelin aşamaları Şekil 1'de gösterilmiştir [24].

2.1. Projenin Tanımlanması (Define the Project)

Performansa dayalı model metodolojisinin ilk aşaması, kapsam, amaç ve hedeflerin tanımlandığı proje tanımlama aşamasıdır. Projenin kapsamı, yeşil binalardaki düşey iç boşluklarda yangın yayılımıdır. Amaç ise yeşil binaların sürdürülebilirlik ilkeleri çerçevesinde can ve mal güvenliğini sağlamak, hizmet kayıplarını önlemektir. Yangın yayılma alanını en aza indirmek, sıcaklık ve dumanı düşey boşluk aracılığıyla tahliye etmek çalışmanın hedefleridir.

2.2. Performans Kriterlerinin Belirlenmesi (Determination of Performance Criteria)

Sürecin ikinci adımı olan performans kriterleri, doğrudan kullanıcı güvenliğine odaklanır ve aşılması halinde can güvenliği için tehdit oluşturacak eşik değerlerin tanımlanmasını içerir. İnsan derisi 10 saniye boyunca 60°C sıcaklığa maruz kaldığında cilt yanığı meydana gelir; 100 saniyelik maruz kalınca ise tam yanığa yol açar [25]. Sıcaklığın birincil endişe kaynağı olmadığı yangınlar için, NFPA 101'e göre kapalı alanlardaki veya çıkış yollarındaki en üst duman tabakasının zeminden en az 2,20 m yukarıda olması gerektiği belirtilmiştir [26]. Yangın sırasında bina sakinlerinin, görüş mesafesi 5 m olan optik yoğunlukla kirlenmiş bir kaçış yoluna girmeleri durumunda, dumana maruz kalan kişilerin karanlıktaymış gibi hareket ettikleri gözlemlenmiştir [27].

2.3. Tasarımın Tanımlanması (Define the Design)

Bu çalışmada, 2024 yılındaki çalışmada kullanılan güneş ve rüzgâr bacası ile çift kabuklu cephe boşluğu prensibinden yola çıkarak tasarlanan model geliştirilerek kullanılmaktadır [17]. Düşey boşluğun genişlik ve yüksekliğinin yangın gelişimine etkisinin incelendiği 2024 yılındaki çalışma diğer tasarım parametreleri eklenerek geliştirilmektedir. Üç katlı, 10,50 m yüksekliğinde bir bina modeli tasarlanmıştır. Her katta, 4,00 x 6,00 x 3,50 m (genişlik x uzunluk x yükseklik) ölçülerinde birer oda bulunmaktadır. Odalar bir cephede tasarım tahliye boşluğuna, diğer cephede ise sirkülasyon holü ile atriuma (4,00 x 3,50 x 10,50 m) bitişiktir. Hava giriş ve çıkışları, tasarım tahliye boşluğunun üst ve alt kısımlarında planlanmıştır. Atrium boşluğunun tavanında 100 x 300 cm'lik bir hava çıkışı tasarlanmıştır. Tasarım tahliye boşluğu, odalar arasında bir pencere boşluğu ve odalar ile atrium arasında bir kapı boşluğu bulunmaktadır. Duvarlar, tavan ve zemin için yanmaz özellikte, yaklaşık 2 kW/m²K termal ataletle sahip betonarme malzeme tercih edilmiştir. Ayrıca atrium alanı, her kat döşemesine tavandan sarkan 60 cm yüksekliğinde bir duman perdesi ile çevrelenmiştir. Yangın senaryoları için bina modeli tasarımı Şekil 2'de gösterilmiştir.

2.4. Aday Model Seçimi (Candidate Model Selection)

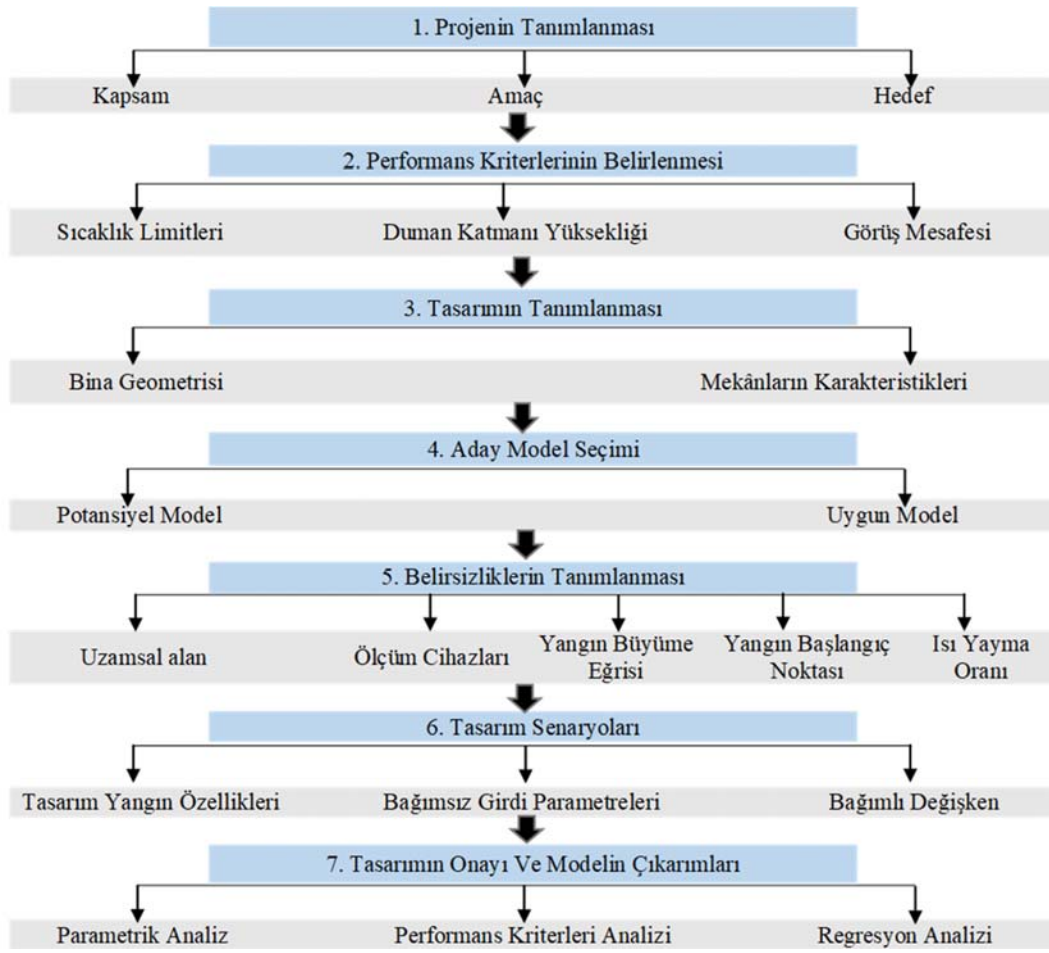
Sayısal model olarak akışkanlar dinamiğinin temellerini kullanan, çeşitli sınır koşullarının simülasyonuna ve detaylı geometri modellemesine imkân veren CFD modeli (saha modeli) seçilmiştir. Yazılım olarak, CFD Navier-Stokes denklemleriyle momentum, kütle, basınç ve türbülans çözümleri üreten Fire Dynamic Simulation 6.9.1, (FDS) ve FDS çıktı dosyalarını okuyan ve grafiklere dönüştüren Smokeview (SMV) 6.9.1 programından yararlanılmıştır [28]. FDS'nin gerektirdiği giriş parametrelerini içeren metin dosyasını oluşturmak için üçüncü taraf program olan, FDS ve SMV fonksiyonlarını içeren ve geometrik düzenlemeye izin veren Pyrosim 2024.1 sürümü modelin oluşumu ve senaryoların çalıştırılması için kullanılmıştır.

2.5. Girdi Belirsizliklerinin Belirlenmesi (Determination of Input Uncertainties)

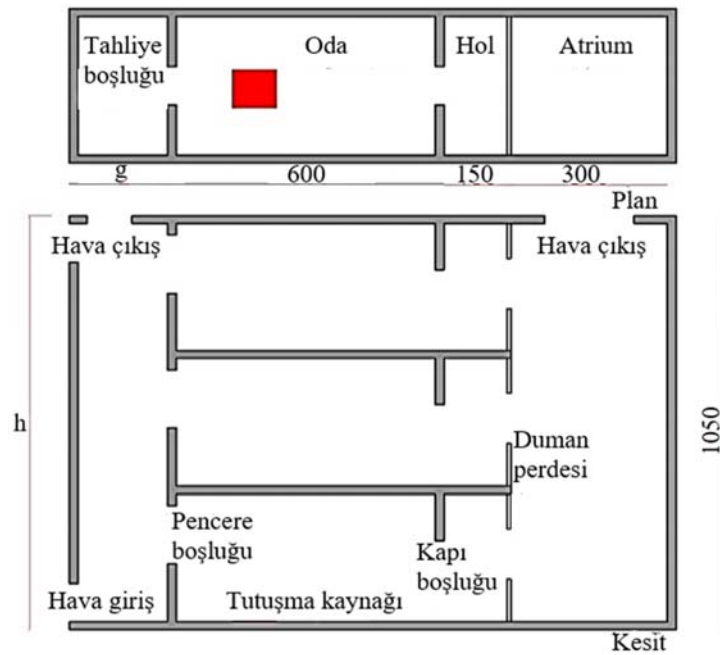
Yangın modeli için gerekli hesaplama araçları ve programlar tanımlandıktan sonra, tasarım senaryolarının oluşturulması amacıyla modelin girdi parametrelerinin k belirlenmesi gerekmektedir. Prototip binada CFD simülasyonlarının yapılabilmesi için mekânsal etki alanı, reaksiyon kaynağının ısı yayma oranı, yangın başlangıç noktası, ölçüm cihazları ve ölçüm düzlemleri belirlenmiştir. Üç boyutlu modeli oluşturmak amacıyla, 0,2 m boyutlarında 105,000 hücreden oluşan bir ağ yapısı tanımlanmıştır. Sıcaklık, duman hareketi için ölçüm dilimleri yerleştirilmiş; atrium, tasarım tahliye boşluğu kat seviyeleri ile yangın odası ve son kat odadaki noktasal sıcaklıkları ölçmek üzere 8 adet ısı çift yerleştirilmiştir (Şekil 3).

Tablo 1. Önceki ve yeni modelin temel farklılıkları (Main differences between the previous and new models)

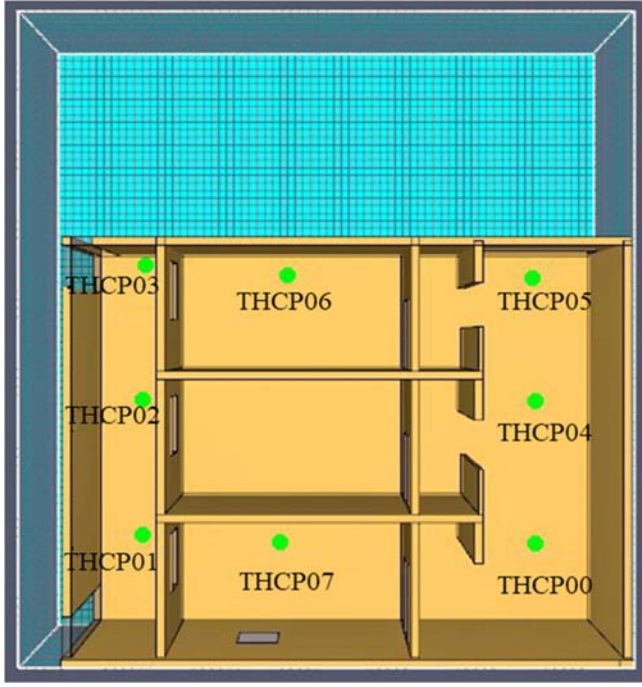
	Önceki Çalışma	Güncel Çalışma
Senaryo sayısı	8	28
Bağımsız değişkenler	Tahliye boşluğu genişliği, yüksekliği	Tahliye boşluğu genişliği, yüksekliği Hava giriş çıkış genişliği, yüksekliği Pencere yüksekliği ve genişliği
Bağımlı değişkenler	Sıcaklık, duman, alev	Sıcaklık, duman
Yazılım	FDS 6.7.6, Smokeview 6.7.6, Pyrosim 2021	FDS 6.9.1, Smokeview 6.9.1, Pyrosim 2024, Matlab 2021b, SPSS Statistics 28 2021
Yöntem	Performansa dayalı yangın güvenliği CFD model analizi	Performansa dayalı yangın güvenliği CFD model analizi Parametrik analiz Duyarlılık analiz



Şekil 1. Çalışma kapsamında geliştirilen performansa dayalı yangın modeli aşamaları
(Performance-based fire model stages developed within the scope of the study)

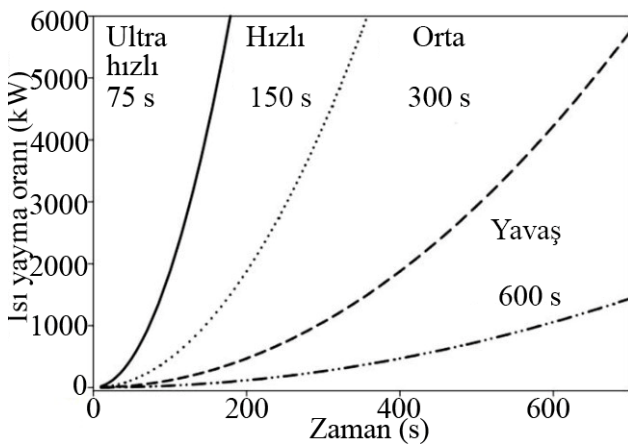


Şekil 2. Tasarım modeli plan ve kesiti (Design model plan and section)



Şekil 3. Bilgisayar modeli uzamsal alan özellikleri
(Computer model spatial domain properties)

Herhangi bir malzeme için yangının büyüme hızı olan ısı yayma oranı, zamanın karesiyle orantılı bir eğri ile ifade edilir. Eğri, maksimum ısı yayma oranı ve belirli bir ısı yayma oranı değerine ulaşmak için gereken süre ile tanımlanır. NFPA 92B standardına göre, yangın modeli çalışmaları için yangın büyüme hızının hızlı ve referans ısı salınım hızı 1055 kW olarak alınması gerçek yangınlar için uyumlu sonuçlar vereceğini açıklamaktadır. (Şekil 4) [27]. Sayısal modelde tasarım yangınları için yangın büyümesini tanımlamak üzere basitleştirilmiş Eş. 1 kullanılmıştır. Eş. 1'e göre, hızlı büyüme oranının 1055 kW ısı yayma oranına ulaşması için büyüme katsayısı 0,047 kW/s² olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. Yangın büyüme eğrisi (Fire growth curve)

$$Q = \alpha t^2 \quad (1)$$

Q = ısı iletim oranı (HRR) Btu/s (kW),
 α = Yangının büyüme katsayısı, Btu/s³ (kW/s²),
 t = Tutuşma sonrası zaman, s,

Dumanın tüm odalara yayılma riskinin en yüksek olacağı zemin kattaki odaya yangın kaynağı yerleştirilmiştir. Zemin kattaki odanın zemininde bulunan 1 m² yüzey alanına sahip esnek poliüretan köpük yangın kaynağı olarak seçilmiştir. Yangın reaksiyonunun kaynağı olan GM27 (esnek poliüretan köpük) 1,00 karbon, 1,7 hidrojen, 0,3 oksijen ve 0,08 azot atomundan oluşmaktadır [24]. Açığa çıkan ısı oranı 1055 kW olarak seçilmiş ve 1055 kW'a ulaşma süresi Eşitlik (1)'e göre 150 saniye olarak hesaplanmıştır. Tutuşma başlangıcı 10 saniye olarak tanımlandığında, yangın simülasyonunun toplam süresi 160 saniye olmuştur. Konum ve hâkim rüzgâr gibi iklimsel unsurların etkisi ihmal edilmiş ve tutuşma öncesi ortam sıcaklığı 10°C olarak belirlenmiştir.

2.6. Tasarım Senaryoları (Design Scenarios)

Projenin kapsamı ve amacı gereği, belirlenen performans kriterlerinin sınırlarını kontrol etmek ve tasarım tahliye boşluğu yoluyla duman tahliyesi sağlamak için tasarım girdi değişkenlerinin değer aralıkları Tablo 2'de verilmiştir. Tasarım senaryolarındaki girdi değişkenleri, boşluk genişliği ve yüksekliği, boşluk hava giriş ve çıkış genişlikleri ve yükseklikleri ile odalardaki pencere genişlikleri ve yükseklikleridir. Girdi değişkenleri neticesinde analizi yapılacak bağımlı çıktı değişkenleri ise duman katmanı seviyesi ve bina içerisindeki sıcaklık seviyeleridir.

Tablo 2. Tasarım senaryoları girdi parametreleri
(Design scenarios input variables value ranges)

Girdi değişkenleri	Değer aralıkları (cm)
Boşluk yüksekliği	50-200
Boşluk genişliği	1050-1575
Hava giriş çıkış yüksekliği	50-360
Hava giriş çıkış genişliği	50-250
Oda pencere yüksekliği	50-200
Oda pencere genişliği	50-200

2.8. Tasarımın Onayı ve Modelin Gözlemsel, İstatistiksel Çıkarımları (Design Validation and Observational, Statistical Inference of the Model)

Performansa dayalı yangın güvenliği ve yangın modellemesi aşamalarının uygulanması sonucunda tasarım yangın modeli sonuçlarının sistematik ve istatistiksel analizleri yapılarak belirsizliklerin giderilmesi için SFPE kılavuzundan yola çıkarak parametrik analiz, performans kriterleri analizi ve duyarlılık analizi yöntemleri kullanılmıştır.

2.8.1. Parametrik analiz ile senaryoların belirlenmesi (Determination of scenarios with parametric analysis)

Girdi değişkenlerinin değer aralığına göre senaryoların belirlenmesi sürecinde, her bir girdi değişkeninin sistematik olarak değiştirilmesi yoluyla, beklenen performans için en iyi sonucu elde etmeye yönelik parametrik bir analiz sistemi kullanılmıştır. İlk değişken için en iyi sonuç elde edildikten sonra, diğer değişken analiz edilerek sırayla tüm değişkenler incelenmiştir. Bu doğrultuda, parametrik analiz kapsamında girdi değişkenlerinin test edilme sırası Şekil 5'te gösterilmiştir."

2.8.2. Performans kriterlerinin analizi (Analysis of performance criteria)

Projenin amaç ve hedefleri doğrultusunda, tasarım senaryolarındaki performans kriterlerine göre en iyi sonuçlar analiz edilmiştir. Senaryo sonuçlarının birlikte değerlendirildiği duyarlılık analizi sürecinde performans kriterleri referans değerler olmuştur.

2.8.3. Duyarlılık analizi (Sensitivity analysis)

Duyarlılık analizi, bağımsız girdi değişkenleri ile bağımlı çıktılar arasındaki ilişkiyi anlamayı ve model sonuçlarında en etkili girdi değişkenlerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, modelde yer alan tüm değişkenlerin birlikte ölçülmesi ve etki değerlerinin hesaplanması için çok değişkenli regresyon analizi kullanılmıştır. Bağımlı değişkenler ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri bir arada değerlendirmek amacıyla regresyon analizi yoluyla istatistiksel yöntem kullanılmaktadır. Değişkenler bilindiğinde, bağımlı değişkeni bulmak için kullanılan denklem regresyon denklemi olarak adlandırılır ve Eş. 2’de verilmiştir [29, 30]:

$$Y_n = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n \quad (2)$$

Y_n : Tahmini istenen değer

β_0 : Başlangıç değeri

$\beta_1 \beta_2 \beta_n$: Değişkenlerin regresyon katsayıları

$X_1, X_2, \dots, X_n$: Bağımsız değişkenlerin değerleri

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Düşey iç boşluklarda yangın yayılımını analiz ederek duman tahliye stratejileri ve bina içi sıcaklık seviyelerinin kontrolünü sağlamak amacıyla performansa dayalı bir model sunulmaktadır. Tasarlanan prototip binada, parametrik analiz sıralamasına uygun olarak (Şekil 5) belirlenen senaryo aşamalarıyla duman ve sıcaklık analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda geliştirilen A, B ve C senaryolarının uygulama adımları ve sonuçları aşağıda sunulmuştur.

3.1. A Senaryoları (A Scenarios)

Prototip binada duman tahliyesinin hedeflendiği tasarım tahliye boşluğunun uygun boyutlarını belirlemek için tasarlanan senaryolara ait girdi değişkenleri Tablo 3’ te verilmiştir.

Tasarım tahliye boşluğunun genişlik ve yükseklik değişkenleriyle oluşturulan 10 senaryoya ait duman katmanı seviyeleri Şekil 6’da sunulmuştur. A senaryolarındaki ana bulgular özetle şöyledir:

- Tahliye boşluğu genişliği azaldıkça, dumanın tahliye boşluğuna yönelimi ve yoğunluğu artmış; genişlik arttığında ise duman, ilk 100 saniyede tahliye boşluğuna, ardından atriuma yönelmiştir.

- Genişlik 200 cm olan A1 senaryosunda duman son kat odaya 60. saniyede ulaşırken, genişlik 50 cm olan A4 senaryosunda bu süre 90. saniyeye çıkmıştır.
- Tahliye boşluğu yüksekliğinin bir kat artırılması, dumanın atriuma geçiş süresini uzatmış ve atriumdaki duman seviyesini düşürmüştür.
- Dumanın 130. saniyede son kata ulaştığı ve odadaki duman katmanı seviyesinin performans kriteri olan 2,20 m altında düşmediği A7 senaryosu genişlik ve yükseklik değişkenleri için en uygun tasarımıdır.

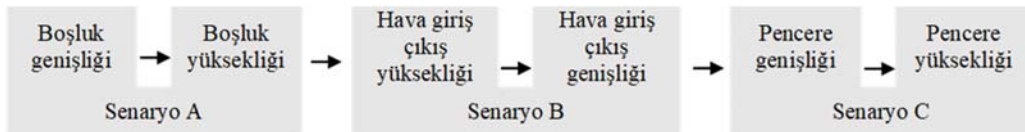
A senaryolarında son kat odadaki ısılıçiftlerden ölçülen sıcaklık değerlerine göre, boşluk genişliği ile son kat odadaki sıcaklık seviyesi arasında pozitif veya negatif bir korelasyon bulunmamıştır. Ancak A4 senaryosundaki sıcaklık 14,68°C ile A1, A2 ve A3 senaryolarına göre daha düşük seviyede ölçülmüştür. Boşluk yüksekliğinin bir kat artırıldığı senaryolarda ise son kat odadaki sıcaklık seviyesi düşmüştür. Atrium ve odalara yayılan duman seviyesinin riskli bölge olan 2,20 m altına düşmediği A7 senaryosunda son kat oda sıcaklığı 10,82°C ile A senaryoları arasında en düşük seviyede gerçekleşmiştir (Şekil 7).

Yangın güvenliği bağlamında bir diğer tasarım prensibi ise tasarım tahliye boşluğunda baca etkisinin artması sonucu dumanın boşluktan tahliye verimliliğini artmasıdır. Bu doğrultuda, atriumda sıcaklık seviyesinin düşük, tahliye boşluğunda ise yüksek olduğu senaryolar baca etkisi için en uygun boşluk parametrelerini gösterdiğinden, tasarım tahliye boşluğu ve atrium sıcaklıkları arasındaki oransal değerler analiz edilmiştir (Şekil 8). A7 ve A9 senaryolarında sıcaklık oranı yaklaşık 12 ile diğer A senaryolarına göre daha yüksek değerde hesaplanmış olup, baca etkisinin verimliliği için uygun tasarımlar olduğu belirlenmiştir.

3.2. B Senaryoları (B Scenarios)

Prototip binada duman tahliyesinin hedeflendiği tasarım tahliye boşluğuna açılan hava giriş ve çıkışlar için uygun boyutların belirlenmesi amacıyla oluşturulan senaryolar Tablo 4’ te verilmiştir.

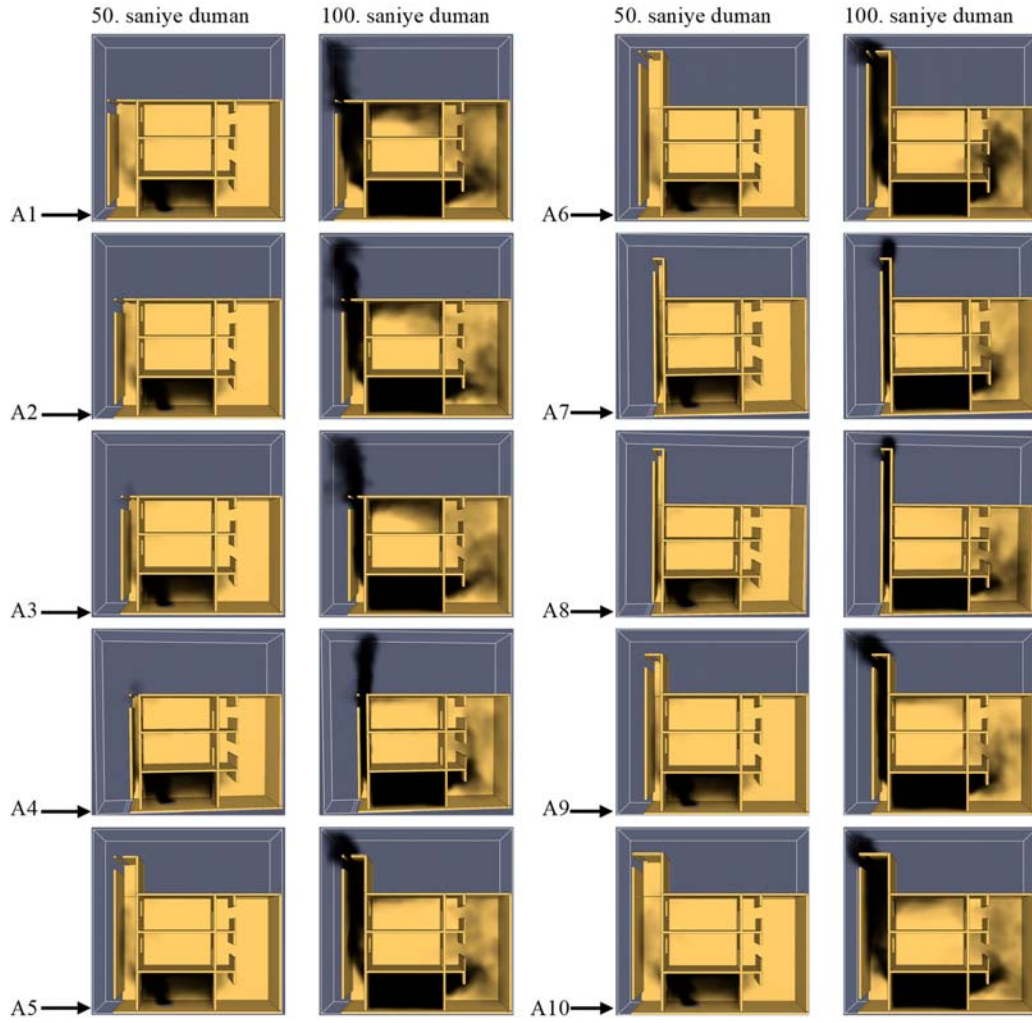
Tasarım tahliye boşluğuna açılan hava giriş çıkış genişlik ve yükseklik değişkenleriyle oluşturulan 9 senaryoya ait duman katmanı seviyeleri Şekil 9’da sunulmuştur. B senaryolarındaki ana bulgular özetle şöyledir:



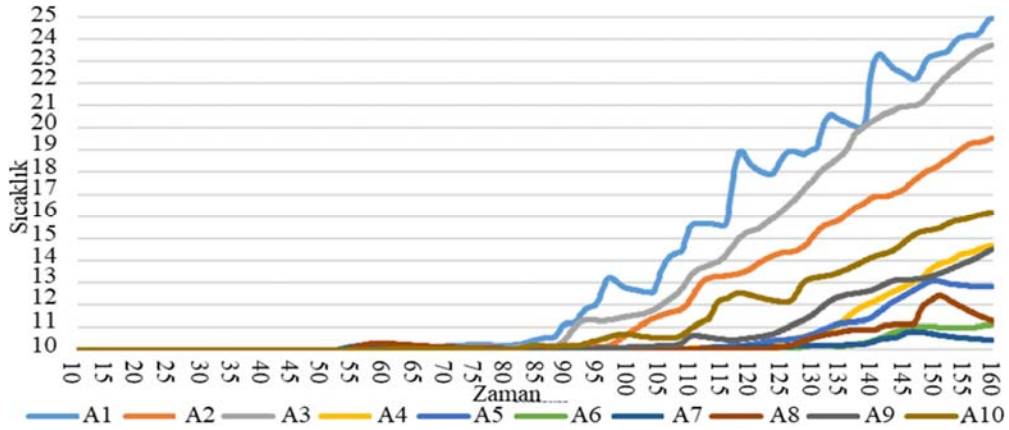
Şekil 5. Parametrik analize göre senaryoların sıralaması (Ranking of scenarios according to parametric analysis)

Tablo 3. A senaryoları girdi değişkenleri (A scenarios input variables) (cm)

Senaryo	Boşluk genişliği	Boşluk yüksekliği	Hava giriş çıkış genişliği	Hava giriş çıkış yüksekliği	Pencere genişliği	Pencere yüksekliği
A1	200	1050	360	100	100	150
A2	150	1050	360	100	100	150
A3	100	1050	360	100	100	150
A4	50	1050	360	100	100	150
A5	150	1400	360	100	100	150
A6	150	1575	360	100	100	150
A7	50	1400	360	100	100	150
A8	50	1575	360	100	100	150
A9	100	1400	360	100	100	150
A10	200	1400	360	100	100	150



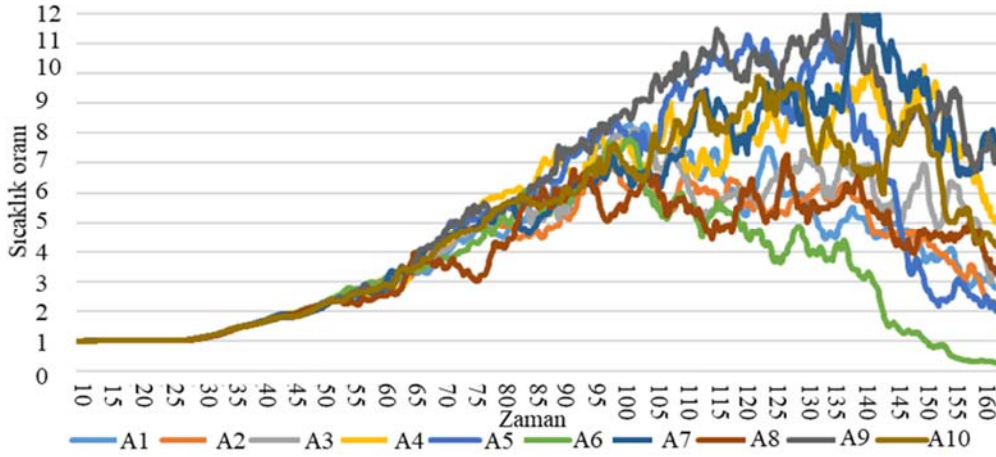
Şekil 6. A senaryoları için duman seviyeleri (Smoke levels for scenarios A)



Şekil 7. A senaryoları son kat odadaki ısılcıftlarla kaydedilen sıcaklık değerleri
(A scenarios temperature values recorded by thermocouples in the last floor room)

- B senaryolarının tamamında odalarda duman seviyesi performans kriteri olarak belirlenen 2200 mm altında düşmemiştir.
- Hava giriş çıkış yüksekliği arttıkça duman yangının ilk 100 saniyesinde tasarım tahliye boşluğuna doğru yönelmiştir. Ancak simülasyon sonunda tahliye boşluğundaki duman yoğunluğu azalmış ve atriumda yayılım artmıştır.

- Hava giriş ve çıkış açıklıklarının genişliklerinin değişken olduğu tasarım senaryolarında, hava giriş ve çıkış genişlikleri azaldıkça atriumdaki duman seviyesi azalmıştır.
- Hava giriş ve çıkış boyutları için 50 cm x 50 cm değerlerine sahip B9 tasarım senaryosu, simülasyon sırasında dumanın tahliye boşluğu dışında herhangi bir alana ulaşmaması ve ortam sıcaklığını önemli ölçüde azaltması nedeniyle en uygun modeli sunmuştur.



Şekil 8. A senaryoları tasarım tahliye boşluğu ve atrium sıcaklık oranları
(A scenarios design extraction cavity/ atrium temperature ratios)

Tablo 4. B senaryoları girdi değişkenleri (B scenarios input variables) (cm)

Senaryo	Boşluk genişliği	Boşluk yüksekliği	Hava giriş çıkış genişliği	Hava giriş çıkış yüksekliği	Pencere genişliği	Pencere yüksekliği
B1	50	1400	360	250	100	150
B2	50	1400	360	200	100	150
B3	50	1400	360	150	100	150
B4	50	1400	360	50	100	150
B5	50	1400	250	50	100	150
B6	50	1400	200	50	100	150
B7	50	1400	150	50	100	150
B8	50	1400	100	50	100	150
B9	50	1400	50	50	100	150

B senaryolarında, yangın odası dışındaki odalardaki sıcaklık seviyeleri performans kriteri olarak belirlenen 60°C 'nin oldukça altında kalmış, B2 senaryosunda ölçülen en yüksek sıcaklık 12,44°C olmuştur. Hava giriş ve çıkış yüksekliğinin 50 cm olarak belirlenmesinin ardından genişliğin değişken olarak test edildiği senaryolarda sıcaklık 10,50°C 'nin altında kalmıştır (Şekil 10).

Baca etkisinin gücü hakkında yorum yapmaya olanak sağlayan tasarım tahliye boşluğu ve atrium sıcaklık oranlarına göre, hava giriş ve çıkış yüksekliklerinin 50 cm'nin üzerinde olduğu senaryolar için oranın 1'in altına düştüğü gözlemlenmiştir. Boşluk genişliğinin değişken olduğu senaryolarda ise oranın doğrusal olarak arttığı ve B6, B7 ve B8 senaryolarında 20'ye ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, hava giriş çıkış boyutu azaldıkça, tasarım tahliye boşluğundaki baca etkisi gücünün arttığını göstermiştir (Şekil 11).

3.3. C Senaryoları (C Scenarios)

Prototip binada duman tahliyesinin hedeflendiği tasarım tahliye boşluğuna açılan pencere açıklıklarının uygun boyutlarını belirlemek için tasarlanan senaryolar Tablo 5'te verilmiştir.

C senaryolarının duman seviyeleri Şekil 12'de verilmiş olup, bulgular ve değerlendirmeler aşağıda özetlenmiştir:

- Pencere açıklıklarının yüksekliğinin ve genişliğinin azaltılması duman tahliyesi ve sıcaklık üzerinde olumsuz bir etki yaratmıştır.

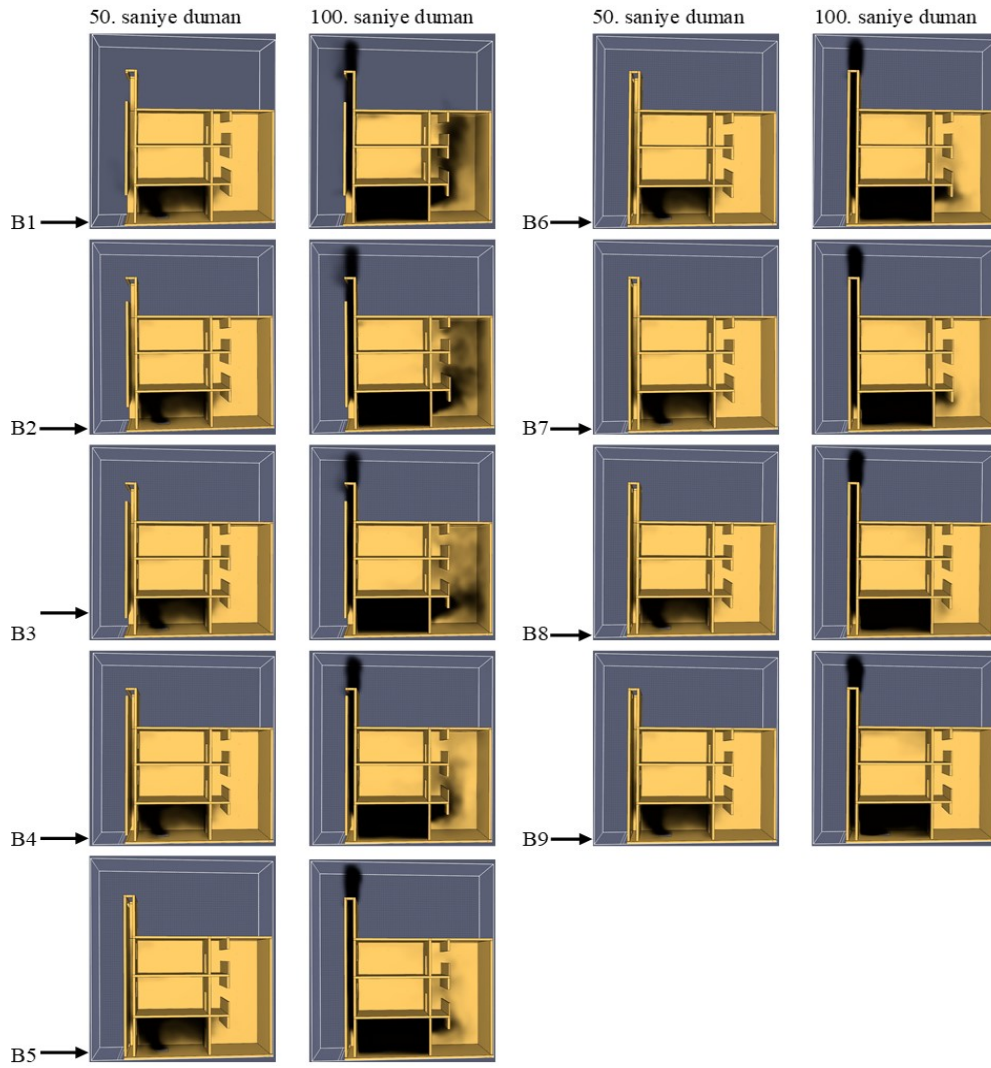
- Pencere açıklığı boyutunun 50 cm x 100 cm, 50 cm x 50 cm ve 100 cm x 50 cm olduğu C5, C6 ve C7 senaryolarında atrium dumanla dolmuş, duman odalara yayılmıştır.
- Pencere genişliği 100 cm ve üzeri olan senaryolarda duman 2200 mm'nin altına inmemiş, atriumda ise zemin kat seviyesinde kalmıştır.
- Pencere genişliği 100 cm ve yüksekliği 150 cm olan B9 senaryosunda duman tasarım tahliye boşluğu ve yangın odası dışında binanın diğer alanlarına yayılmayarak en uygun tasarımı sağlamıştır.

C senaryolarında, yangın odası dışındaki odalarda sıcaklık seviyeleri belirtilen performans kriterinin altında ölçülmüştür. Dikdörtgen boyutlu pencerelerde son kat odadaki sıcaklık en düşük seviyelere düşerek, C3, C4, C8 ve C9 senaryolarında sıcaklık seviyesi 10,50°C 'nin altında kalmıştır (Şekil 13).

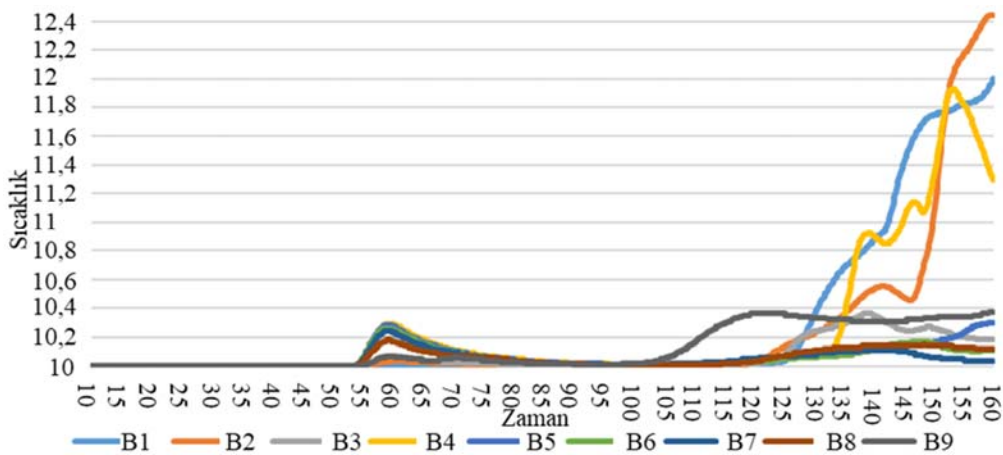
Pencere yüksekliğinin minimum, genişliğinin maksimum olduğu C9 ve C8 senaryolarda, tasarım tahliye boşluğundaki baca etkisi artmıştır. Dikdörtgen boyutlu olup, pencere uzun kenarı ile kısa kenar arasında fark atıkça tasarım tahliye boşluğunda baca etkisinin verimliliği artmış ve duman tahliyesine olanak sağlanmıştır (Şekil 14).

3.4. Modelin İstatistiksel Çıkarımları – Duyarlılık Analizi (Statistical Implications of the Model - Sensitivity Analysis)

28 adet senaryonun parametrik analize göre sıralı olarak değerlendirildiği bölümlerde, performans kriterlerine dayalı analizler

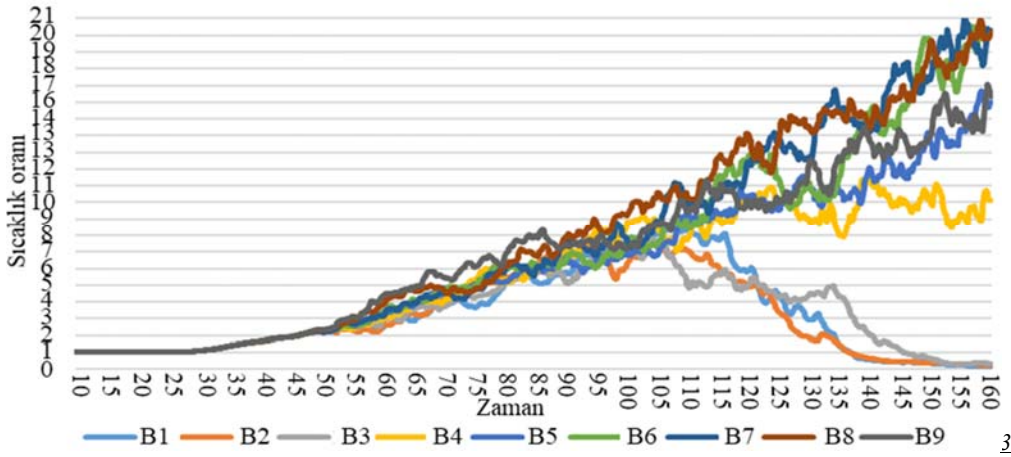


Şekil 9. B senaryoları için duman seviyeleri (Smoke levels for scenarios B)

Şekil 10. B senaryoları son kat odadaki ısılcıftlarla kaydedilen sıcaklık değerleri
(B scenarios temperature values recorded by thermocouples in the last floor room)

önceki başlıklarda gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, modelin tasarıma katkı gücünü ve tasarım parametrelerinin modele etkisini belirlemek amacıyla duyarlılık analizi yöntemi olarak çok değişkenli regresyon analizi uygulanmıştır. Her bir senaryoya ait 1001 ortam sıcaklık

verisindeki "E" ile gösterilen bilimsel notasyon formatındaki değerleri düzenlemek ve analiz için uygun hale getirmek amacıyla Matlab 2021a programı kullanılmıştır. Tanımlayıcı istatistik yöntemlerinden merkezi eğilim ölçüleri, senaryolarda zamana bağlı olarak kaydedilen



Şekil 11. B senaryoları tasarım tahliye boşluğu ve atrium sıcaklık oranları
(B scenarios design extraction cavity/ atrium temperature ratios)

Tablo 5. C senaryoları girdi değişkenleri (C scenarios input variables) (cm)

Senaryo	Boşluk genişliği	Boşluk yüksekliği	Hava giriş çıkış genişliği	Hava giriş çıkış yüksekliği	Pencere genişliği	Pencere yüksekliği
C1	50	1400	50	50	200	150
C2	50	1400	50	50	150	150
C3	50	1400	50	50	50	150
C4	50	1400	50	50	50	200
C5	50	1400	50	50	50	100
C6	50	1400	50	50	50	50
C7	50	1400	50	50	100	50
C8	50	1400	50	50	150	50
C9	50	1400	50	50	200	50

sıcaklık değerlerini istatistiksel olarak tanımlamak amacıyla kullanılmıştır. Sıcaklık değişkenlerinin genellikle doğrusal bir artış göstermesi nedeniyle verilerin özetlenmesinde ortalama değerler tercih edilmiştir. Tablo 6’da sunulan ortalama değerler temel alınarak çok değişkenli regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir.

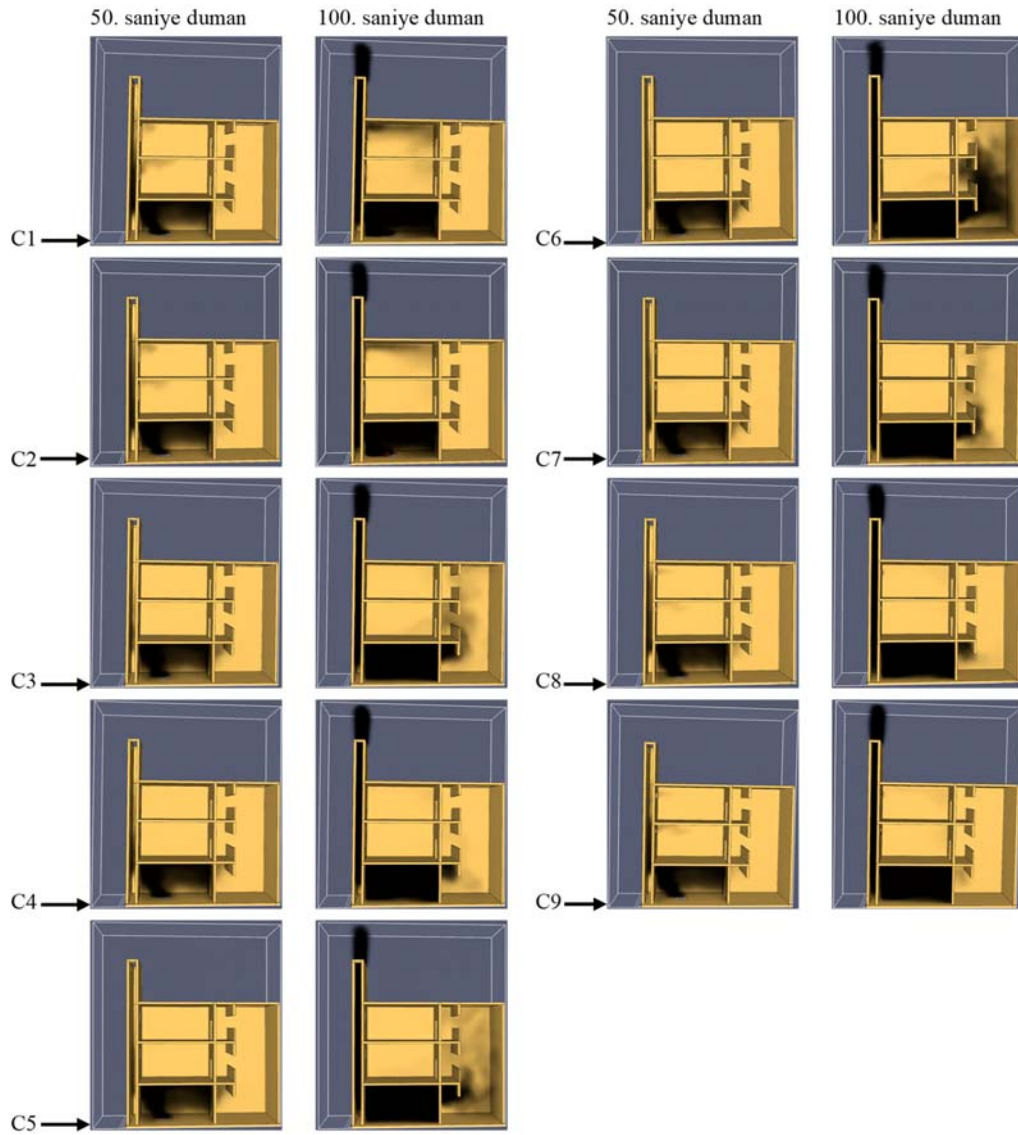
Yangının gelişimi için önemli bir referans olan ortam sıcaklığı değerleri üzerinde, tasarım girdi değişkenlerinin etkisini belirlemek amacıyla çok değişkenli regresyon analizi yapılmıştır. Bu analiz için IBM SPSS Statistics 28 programı kullanılmış ve Tablo 6’daki değerler SPSS programına aktarılmıştır. Regresyon analizinin genel uygunluğunu değerlendiren model özeti Tablo 7’de verilmektedir. Modeldeki R değeri (korelasyon katsayısı) bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenle olan toplam ilişkisini göstermektedir. $R = 0,967$ değerinden bağımsız ve bağımlı değişkenler arasında güçlü bir doğrusal ilişki olduğu anlaşılmaktadır. Bu ilişkinin bağımlı değişkende açıklanan varyans yüzdesini gösteren R Kare (R^2) = 0,935 ile bağımsız değişkenler bağımlı değişkendeki varyansın %93,5’ini açıkladığı görülmüştür. Bu, modelin bağımlı değişkeni yüksek oranda açıkladığını ve dolayısıyla güçlü bir tahmin gücüne sahip olduğunu ifade etmektedir.

Çok değişkenli regresyon sonuçlarına ait katsayılar Tablo 8’ de verilmektedir. Anlamlılık (p), bir değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisinin rastlantısal mı yoksa anlamlı mı olduğunu belirleyen katsayı olup, p değeri 0,05’in altındaysa değişkenin etkisi anlamlı kabul edilmektedir. Standartlaşmış Beta katsayısı ise, beta ve

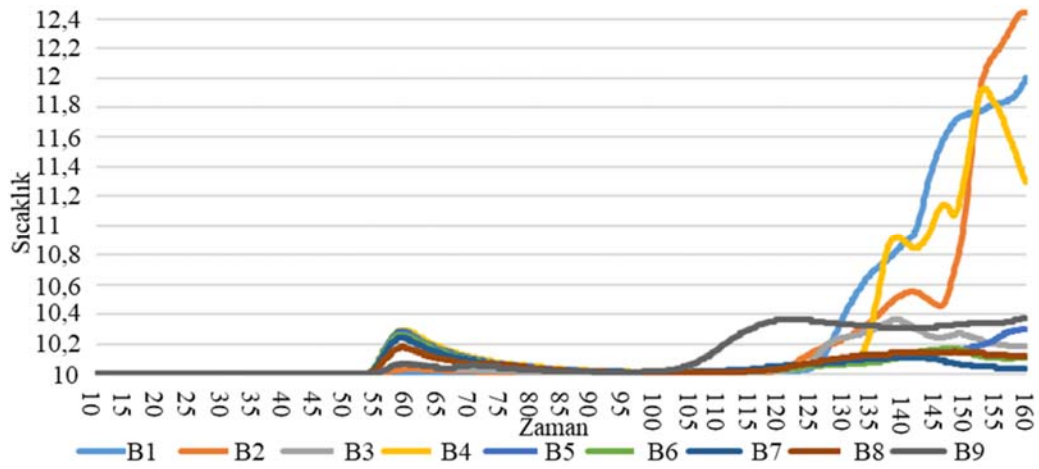
standart hata sütunlarından yararlanarak her bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisini birim farklılıklarını ortadan kaldırarak göstermektedir.

Tablo 8’ e göre yapılan analiz sonucunda, boşluk genişliği arttıkça ortam sıcaklığı artmaktadır, ancak zayıf etkiye sahip olup %5 seviyesinde anlamlıdır ($\beta = 0,125$; $p = 0,042$). Boşluk yüksekliğinin ortam sıcaklığı üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmamaktadır ($\beta = -0,0004$; $p = 0,944$). Boşluk hava giriş-çıkış genişliği, pozitif ve yüksek bir beta değeriyle değişkenler arasında en yüksek derece etkilemekte olup, genişlik arttıkça sıcaklık artmaktadır ($\beta = 0,721$; $p = 0,000$). Boşluk hava giriş-çıkış yüksekliği arttıkça sıcaklık üzerinde sınırlı ancak anlamlı bir artış meydana gelmektedir ($\beta = 0,220$; $p = 0,010$).

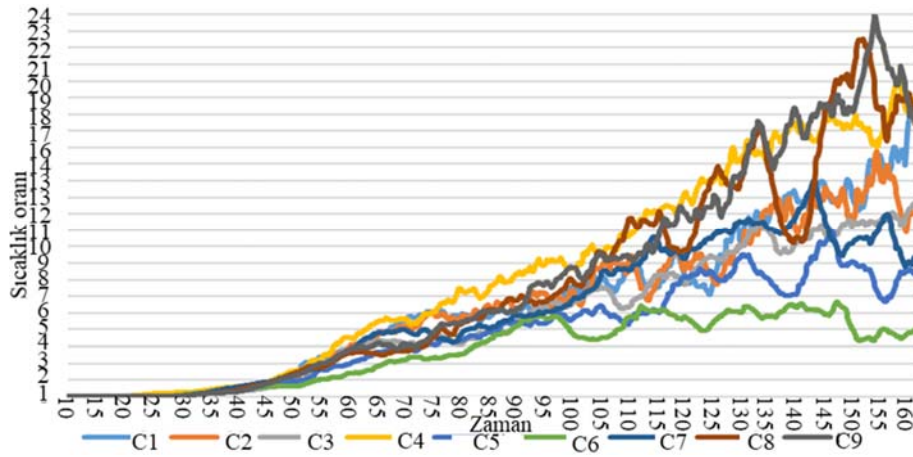
Pencere genişliği, negatif bir beta değeriyle genişlik arttıkça ortam sıcaklığını düşürmekte olup, bu etki oldukça güçlüdür ($\beta = -0,455$; $p = 0,000$). En güçlü düşüş etkisine sahip değişken ise pencere yüksekliği olup, yüksekliği arttıkça ortam sıcaklığı anlamlı biçimde azalmaktadır. ($\beta = -0,507$; $p = 0,000$). Sonuç olarak, genişlik arttıkça boşluk genişliği ve boşluk hava giriş-çıkış genişliği ortam sıcaklığını artırırken, oda havalandırma genişliği ve oda havalandırma yüksekliği sıcaklığı düşürmektedir. En güçlü artırıcı etki hava giriş-çıkış genişliğinden (0,721), en güçlü düşürücü etki ise pencere yüksekliğinden (-0,507) kaynaklanmaktadır.



Şekil 12. C senaryoları için duman seviyeleri (Smoke levels for scenarios C)



Şekil 13. C senaryoları son kat odadaki ısıçiftlerle kaydedilen sıcaklık değerleri
(C scenarios temperature values recorded by thermocouples in the last floor room)



Şekil 14. C senaryoları tasarım tahliye boşluğu ve atrium sıcaklık oranları
(C scenarios design extraction cavity/ atrium temperature ratios)

Tablo 6. Senaryolar için ortalama ortam sıcaklık değerleri (Mean ambient temperature values for the scenarios)

Senaryo	Boşluk genişliği (cm)	Boşluk yüksekliği (cm)	Boşluk hava giriş çıkış genişliği (cm)	Boşluk hava giriş çıkış yüksekliği (cm)	Pencere genişliği (cm)	Pencere yüksekliği (cm)	Sıcaklık ortalaması (°C)
A1	200	1050	360	100	100	150	52,99
A2	150	1050	360	100	100	150	54,00
A3	100	1050	360	100	100	150	48,76
A4	50	1050	360	100	100	150	50,35
A5	150	1400	360	100	100	150	50,29
A6	150	1575	360	100	100	150	52,57
A7	50	1400	360	100	100	150	51,83
A8	50	1575	360	100	100	150	52,89
A9	100	1400	360	100	100	150	47,83
A10	200	1400	360	100	100	150	52,22
B1	50	1400	360	250	100	150	53,63
B2	50	1400	360	200	100	150	52,36
B3	50	1400	360	150	100	150	50,51
B4	50	1400	360	50	100	150	48,39
B5	50	1400	250	50	100	150	48,64
B6	50	1400	200	50	100	150	46,30
B7	50	1400	150	50	100	150	44,67
B8	50	1400	100	50	100	150	44,38
B9	50	1400	50	50	100	150	32,53
C1	50	1400	50	50	200	150	25,73
C2	50	1400	50	50	150	150	30,58
C3	50	1400	50	50	50	150	49,02
C4	50	1400	50	50	50	200	45,23
C5	50	1400	50	50	50	100	54,11
C6	50	1400	50	50	50	50	53,49
C7	50	1400	50	50	100	50	47,97
C8	50	1400	50	50	150	50	45,96
C9	50	1400	50	50	200	50	43,58

Tablo 7. Model özeti (Model summary)

Model	R	R ²	Düzeltilmiş R ²	Tahmini Standart Sapma
1	0,967 ^a	0,935	0,916	3,85993

Modelin regresyon denklemi Tablo 8' deki beta katsayıları kullanılarak Eş. 2'ye göre hesaplanmaktadır. Modeli test etmek ve doğrulamak için modelin regresyon denkleminde rastgele değerler uygulanmış ve bu değerlerle simülasyon gerçekleştirilmektedir (Tablo 9). Denklemdaki sıcaklık değeri simülasyondan elde edilen ortalama sıcaklık değeri ile karşılaştırılmaktadır.

Modeli test etmek amacıyla gerçekleştirilen örnek simülasyonda, tasarım yangını özellikleri başlangıçtaki modelle aynı şekilde

kullanılmış ve herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. 160 saniyelik simülasyon süresince, ortam sıcaklığı en yüksek 170,80°C , ortalama olarak ise 67,12°C olarak ölçülmüştür. Simülasyon değişkenlerinin regresyon denklemi üzerinden hesaplanması sonucu ise ortalama sıcaklık 66,87°C olarak bulunmuştur. Regresyon denkleminde hesaplanan 66,87°C ile simülasyondan hesaplanan 67,12°C sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında, değerlerin %99,6 oranında benzer olduğu görülmüştür. Bu durum, modelin öngördüğü sıcaklık değerleri ile simülasyon verileri arasında uyum olduğunu göstermektedir. Simülasyon değişkenlerinin Eş. 2 ile hesap sonucu aşağıda verilmektedir:

$$Y_n = 82,194 + 0,0350 \cdot 75 + 0,0001 \cdot 1300 + 0,0650 \cdot 75 + 0,060 \cdot 75 - 0,170 \cdot 75 - 0,177 \cdot 75 = 66,87^\circ\text{C}$$

Tablo 8. Regresyon sonuçlarının katsayıları (Coefficients of regression results)

Model	Standartlaşmamış Katsayılar Beta	Std. Hata	Standartlaşan Katsayılar Beta	t	Anlamlılık
(Sabit)	82,194	9,286		8,851	0,000
Boşluk genişliği	0,0350	0,019	0,125	1,824	0,042
Boşluk yüksekliği	0,0001	0,006	-0,0004	-0,071	0,944
Boşluk hava giriş çıkış genişliği	0,0650	0,009	0,721	7,608	0,000
Boşluk hava giriş çıkış yüksekliği	0,0600	0,021	0,220	2,844	0,010
Pencere genişliği	-0,1700	0,021	-0,455	-7,956	0,000
Pencere yüksekliği	-0,1770	0,022	-0,507	-7,923	0,000

Table 9. Modelin test edilmesi için belirlenen değişken değerleri (cm) (Variable values determined for testing the model)

Değişkenler	Boşluk genişliği	Boşluk yüksekliği	Boşluk hava giriş çıkış genişliği	Boşluk hava giriş çıkış yüksekliği	Pencere Genişliği	Pencere Yüksekliği
Değer	75	1300	75	75	75	75

5, Sonuçlar (Conclusions)

Çalışmada, doğal havalandırma ve iç hava akışının etkin kullanımına olanak sağlayan düşey iç boşluklar aracılığıyla yangın durumunda duman tahliyesi ve sıcaklık kontrolü sağlamak için performansa dayalı bir model geliştirilmiştir. Baca etkisinin görüldüğü düşey iç boşluklarda, taze havanın ısıtılarak kirletilip boşluk aracılığıyla odadan dışarı atılması esasına dayanan doğal havalandırma tasarımının, duman tahliye sistemi ile entegre edilebileceği hipotezinden yola çıkarak model oluşturulmuştur.

Belirlenen boyutsal parametrelerle tasarım tahliye boşluğu uygunluk kriterleri doğrultusunda incelenmiş ve bu parametrelerin model üzerindeki katkıları analiz edilmiştir. Analizlerin sonucunda, simülasyon yapılmadan ortam sıcaklığını tahmin etmek için bir regresyon denklemi geliştirilmiştir. Bu bağlamda, kaçış alanı olarak belirlenen odalardaki, hol ve atrium zemin kat düzeyindeki sıcaklık seviyeleri tüm senaryolarda 60°C 'nin altında ölçülmüştür. Ancak, duman tabakası seviyeleri senaryolara göre değişiklik göstermiştir. Boşluk yüksekliğinin artırılması, boşluk genişliğinin ve hava giriş-çıkış boyutlarının küçültülmesi gibi iyileştirmelerle, dumanın binanın diğer alanlarına yayılmadan tahliye edilmesi sağlanmıştır.

Tasarım tahliye boşluğu boyutları, hava giriş-çıkış boyutları ve pencere boşluk boyutları parametrik analize uygun olarak sıralı olarak incelenmiş ve uygun tasarım parametreleri belirlenmiştir. Değişkenlerin birlikte değerlendirildiği durumda, her bir değişkenin etki derecesini belirlemek için regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, duman tahliyesi için uygun parametrelere sahip bir model geliştirilmiş; ancak, değişkenlerin ortam sıcaklığı üzerindeki etkileri karmaşık bir yapıya sahip olmuştur. Bu karmaşıklık sistematiğe hale getirmek ve modelin güvenilirliğini artırmak için 28 tasarım senaryosu üzerinden çok değişkenli doğrusal regresyon analizi yapılmış ve modelin %94 oranında anlamlı ve güvenilir olduğu belirlenmiştir. Duman tahliyesi ve ortam sıcaklığı kontrolü için tasarım parametrelerinin katkı düzeyleri yaklaşık olarak aynıdır, ancak boşluk yüksekliği duman tahliyesi için etkili iken, ortam sıcaklığını anlamlı olarak etkilememiştir. Geliştirilen regresyon denklemi ile test edilen model sonucu yüksek oranda doğru çıkması modelin anlamlılığını kanıtlamışken, benzer koşullardaki yangın senaryolarında simülasyona gerek kalmadan ortam sıcaklığı değerlerinin hesaplanabileceğini göstermiştir.

Tasarlanan prototip binada, cephenin dar genişliği boyunca boşluk tasarımı uygulanmış ve tehlike durumunda etkinliği değerlendirilerek optimum boşluk tasarım yöntemi ortaya konulmuştur. Bu çalışmada kullanılan tasarım parametreleri ve metodoloji göz önünde bulundurularak, düşey boşluk tasarımlarının yeşil bina konseptine

uygun olarak çeşitli lokasyonlarda uygulanabilirliği sağlanabilir. Yeşil bina tasarımının bir bileşeni olan düşey boşluklar, tehlike anında dumanın, yanmamış gazların ve yüksek ısının yayılmasını engelleyerek tahliye amacıyla kullanılabilecek bir tasarım unsuru olarak değerlendirilebilir. Bu sayede, doğru tasarım yaklaşımları ile yangın riski azaltılarak binalarda yangın güvenliği sağlanabilir.

Kaynaklar (References)

1. Hadjisophocleous G. and Fu X., Effect of make-up air velocity and air curtain on smoke layer interface height with asymmetric fire in atrium fires, *Journal of Building Engineering*, 25, 100933, 2019.
2. Ayala P., Cantizano A. and Rein G., Factors affecting the make-up air and their influence on the dynamics of atrium fires, *Fire Technology*, 54, 1067–1091, 2018.
3. Lei W., Zhang Z., Tai C., Zhang L., and Zhao S., Scaled experiment and numerical study on the effect of a novel makeup air system on smoke control in atrium fires, *Journal of Building Engineering*, 95, 110237, 2024.
4. Ivanov M. L., Peng W., Wang Q., and Chow W. K. Sustainable smoke extraction system for atrium: a numerical study, *Sustainability*, 13, 7406–7428, 2021.
5. Lin W., Liu Q., Zhang M., Cai B., Wang H., Chen, J., and Zhou Y., Numerical simulation on smoke temperature distribution in a large indoor pedestrian street fire, *Fire*, 6 (3), 115–133, 2023.
6. Montes C. G., Rojas S., Kaiser A. S., and Viedma A., Numerical model and validation experiments of atrium enclosure fire in a new fire test facility, *Building and Environment*, 43 (11), 1912–1928, 2008.
7. Montes C. G., Rojas S., Viedma A., and Rein G., Experimental data and numerical modelling of 1.3 and 2.3 MW fires in a 20 m cubic atrium, *Building and Environment*, 44 (9), 1827–1839, 2009.
8. Al-Waked R., Nasif M., Groenhout N., and Partridge L., Natural ventilation of residential building Atrium under fire scenario, *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 101041–10105, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101041>
9. Qin T. X., Yincheng G., Chan C. K., and Lin W. Y., Numerical simulation of the spread of smoke in an atrium under fire scenario, *Building and Environment*, 44, 56–65, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.01.014>.
10. Xu X. Y., Wang Z., Liu X., Ji C., Yu N., Zhu H., Li, J., and Wang, P., Study on fire smoke control in super-high building atrium, *Procedia Engineering*, 211, 844–852, 2018.
11. Abdoh D. A., Kodur V. K. R., and Liew K. M., Smoothed particle hydrodynamics modeling of the thermal behavior of double skin facades in fires considering the effects of venetian blinds, *Applied Mathematical Modelling*, 84, 357–376, 2020.
12. Huang Y., Yeboah S., and Shao J. Numerical data on fire in the cavity of naturally ventilated double skin façade with venetian blinds, *Data in Brief*, 46, 108859–108863, 2023.
13. Huang Y., Yeboah S., and Shao, J. Numerical investigation of fire in the cavity of naturally ventilated double skin façade with venetian blinds, *Building Services Engineering Research and Technology*, 44 (1), 45–61, 2023.

14. Shao J., Yeboah S. K., Zhu T., and Li, Y., Simulation study on the spreading of fire-induced smoke in natural-ventilated double-skin facade buildings, 11th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, Harbin, China, July 12-15, Springer, 2019.
15. Livkiss K., Svensson S., Husted, B. and Patrick, H., Flame heights and heat transfer in façade system ventilation cavities, *Fire Technol* 54, 689–713, 2018.
16. Chow C. L., A qualitative investigation on double-skin façade fires. *MATEC Web of Conferences*, 9, 03007, 2013.
17. Yıldız M. A., Beyhan, F., Evaluation of vertical interior voids in green building designs in the context of smoke extraction, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (3), 1485–1498, 2024.
18. Yıldız M. A., Beyhan, F., Evaluation of the effect of outer skin slope on fire safety in double-skin façade systems, *SAUJS*, 28 (1), 174–186, 2024.
19. Miao L. and Chow C. L., A study on window plume from a room fire to the cavity of a double-skin façade, *Applied Thermal Engineering*, 129, 230-241, 2018.
20. Aşlar E.E., G. Ulukavak Harputlugil G., Exploring fire safety conditions of double skin facades, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (2), 1083–1098, 2023.
21. Yıldız, M. A., Yıldız, M. E. Numerical analysis of the effect of double-skin façade types on fire behaviour, *GRAĐEVINAR*, 76 (11), 1017-1028, 2024.
22. Xudong C., Long S., Peng D., Guomin Z., Hui Y., and Jie L., Study on optimizing design of solar chimney for natural ventilation and smoke exhaustion, *Energy and Buildings*, 170, 145–156, 2018.
23. Cheuk C., Initial buoyancy reduction in exhausting smoke with solar chimney design, *Journal of Heat Transfer*, 132, 014502, 2010.
24. Hurley J M. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Fifth Edition, New York, Springer, 2016.
25. Pursel A. D. and McAllister J. L., Assessment of hazards to occupants from smoke, toxic gases, and heat. In: Hurley M J (Ed.) *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. New York, Springer, 2308-2422, 2016.
26. National Fire Protection Association, *NFPA 101 Life Safety Code*, 2021 edition, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2021.
27. National Fire Protection Association, *NFPA 92 Standart for Smoke Control Systems*, 2021 edition, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2021.
28. Mcgrattan K, Hostikka S, Mcdermott R, Floyd J, Weinschenk C, and Overholt K, *Fire dynamics simulator, technical reference guide*, Sixth edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2013.
29. Schneider A., Hommel G. and Blettner M., Linear regression analysis: Part 14 of a series on evaluation of scientific publications, *Dtsch Arztebl Int.*, 107, 776–782, 2010.
30. Khushbu K., and Suniti Y., Linear regression analysis study, *Journal of the Practice of Cardiovascular Sciences*, 4 (1), 33–36, 2018.

