



Exploring fire safety conditions of double skin facades

Eylem Ezgi Aşlar¹ , Gülsu Ulukavak Harputlugil^{2*}

¹Göknur Gıda, Erler Mah., 06790, Ankara, Türkiye

²Department of Architecture, Faculty of Architecture, Çankaya University, 06790, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Exploring fire safety conditions in buildings with double skin facade
- Effect of different facade types combined with two different plan types on fire safety performance
- Fire safety analysis by Fire Dynamics Simulation

Keywords:

- Fire safety
- Double skin facades
- Fire simulation
- Fire safety design

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the flame and smoke propagation of buildings with double-skin facades during a fire is analyzed by simulation-based analysis method.

Facade Specifications		HRR Value		Temp. Value		
Model	Plan Type	Facade Type	Max.	sn	Max.	sn
A1	Open Space	Non-separated	820	55	75	63
A2		Vertical	840	82	85	40
A3		Horizontal	880	35	80	90
A4		Box	36000	49	102	50
A4'	Separated rooms	Box (ventilated)	851	93	108	80
B1		Non-separated	957	91	127	47
B2		Vertical	810	24	200	100
B3		Horizontal	845	18	160	45
B4		Box	44000	16	95	16
B4'		Box (ventilated)	574	41	163	96

Table A. The comparative table of quantitative findings of all scenario models

Article Info:

Research Article

Received: 05.08.2022

Accepted: 11.06.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1157018

Correspondence:

Author: Gülsu Ulukavak Harputlugil
e-mail: gharputlugil@cankaya.edu.tr
phone: +90 532 625 7158

Purpose: In this study, the double-skin facades of the virtual building, which has the same floor height, two different plan types were examined (Table A). It has been determined what effects each of these facade types have on the spread of flame and smoke emerging at the time of fire and the results are aimed to reveal that design and planning are as important as material and component selection in fire safety.

Theory and Methods:

Two virtual buildings with an open office plan and a separated rooms plan, 18 meters high, with double-layered facades were studied. According to the division of the air corridor of the façade, 4 different types are considered as non-separated type, vertical type, horizontal type and box type along the facade. In addition, 2 more types obtained by adding ventilation grilles to the box-type facade. For each type, in the context of the relevant scenario, smoke and flame spreads that occur at the time of fire were examined through the Fire Dynamics Simulation (FDS) program. The temperature, Heat Release Rate (HRR) and smoke emissions of the 10th, 25th, 50th, 75th and 100th seconds of the simulation of 10 different models were obtained as tables and graphics.

Results:



The results obtained in the context of all scenarios were basically evaluated from two aspects in terms of the design approach. Firstly, according to all the results, fire spread possibility of each model to other floors by façade is analyzed. It has been seen that scenario B1 is the most permissive facade type among all scenarios. The second type of evaluation is on understanding whether the time and temperature that will allow the evacuation of living creatures from the space without harm is occurred. From this point of view, the most problematic façade is scenario B4, both the trapping of smoke and the temperature reaching very high degrees cause conditions that make it difficult for living creatures to evacuate.

Conclusion:

As a result of the data obtained, it was determined that box-type systems in double-layer facades are the most problematic facade type in terms of evacuation of living creatures. In terms of smoke spread, it has been revealed that the systems that continue uninterruptedly along the facade pose a problem when ease of access and spread to other floors is considered. It is revealed that, not only maintaining code compliance but also application of appropriate design strategies are necessary for fire safety



Çift katmanlı cephelerin yangın güvenliği açısından incelemesi

Eylem Ezgi Aşlar¹ , Gülsu Ulukavak Harputlugil^{2*} 

¹Göknur Gıda, Erler Mah., 06790, Ankara, Türkiye

²Çankaya Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 06790, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Çift katmanlı cepheye sahip binalarda yangın güvenlik koşullarının araştırılması
- Farklı cephe tipleri ile iki farklı plan tipi kombinasyonunun yangın güvenliği performansının etkileri
- Yangın dinamiği simülasyonu (YDS) ile yangın güvenlik analizi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 05.08.2022

Kabul: 11.06.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1157018

Anahtar Kelimeler:

Yangın güvenliği,
çift cephe sistemleri,
yangın simülasyonu,
yangın güvenliği tasarımı

ÖZ

Yapılı çevrede insan sağlığı, konforu ve güvenliği öncelikli öneme sahiptir. Güvenlik önlemleri içerisinde en önemli risklerin başında yangın riski gelmektedir. Bu nedenle yangın riski, yayılımı ve güvenliği konusu, yapı tasarımı aşamasından itibaren dikkat edilmesi gereken başlıca konular arasında yer alan kriterlerden biri olarak kabul edilir. Bu çalışma kapsamında, 3 boyutlu olarak tasarlanan, aynı kat yüksekliğine, farklı plan ve cephe türüne sahip yapı modellenerek PyroSim yangın simülasyon programında analiz edilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen veriler üzerinden cephe ve plan tiplerine göre yangın anında ortaya çıkan sıcaklık, duman ve alev yayılım sonuçları tablolar halinde sunulmuştur. Elde edilen veriler sonucunda, çift katmanlı cephelerde kutu tipi sistemlerin canlıların tahliyesi konusunda en sorunlu cephe tipi olduğu belirlenmiştir. Duman yayılımı açısından ise, diğer katlara erişimi ve yayılımı göz önüne alındığında cephe boyunca kesintisiz devam eden sistemlerin sorun oluşturduğu ortaya çıkmıştır. Yangın güvenliğini bir tasarım problemi olarak ele almak gerekmektedir. Bu konu üzerinde ülkemizde daha detaylı çalışmalar yapılması gerektiği, yapının karar aşamasından uygulama aşamasına kadar simülasyonların dikkate alınarak projelendirme yapılması gerektiği ve yönetmeliklerin gerek tasarım, gerek uygulama aşamasında iyi bir kılavuz olması adına geliştirilmesi gerektiği değerlendirilmektedir.

Exploring fire safety conditions of double skin facades

H I G H L I G H T S

- Exploring fire safety conditions in buildings with double skin facade
- Effect of different facade types combined with two different plan types on fire safety performance
- Fire safety analysis by Fire Dynamics Simulation (FDS)

Article Info

Research Article

Received: 05.08.2022

Accepted: 11.06.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1157018

Keywords:

Fire safety,
double skin facades,
fire simulation,
fire safety design

ABSTRACT

Human health, comfort and safety are of primary importance in the built environment. Among the security measures, the most important risk is the risk of fire. For this reason, the issue of fire risk, spread and safety is considered as one of the criteria that should be considered from the building design stage. Within the scope of this study, building models with the same floor height, different plan and facade types, designed in 3D, were analyzed in the fire simulation program called PyroSim. Based on the data obtained as a result of the analyzes, the results of the temperature, smoke and flame spread at the time of fire according to the facade and plan types are presented in tables. As a result of the data obtained, it was determined that box-type systems in double-layer facades are the most problematic facade type in terms of evacuation of living creatures. In terms of smoke spread, it has been revealed that the systems that continue uninterruptedly along the facade pose a problem when the access and spread to other floors are taken into account. It is necessary to consider fire safety as a design problem. It is considered that more detailed studies should be carried out in our country on this subject, that the project should be designed by considering the simulations from the decision stage to the implementation stage of the building, and that the regulations should be developed in order to be a good guide in both the design and implementation stages.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : eylemezgiaslar95@gmail.com, *gharputlugil@cankaya.edu.tr /
Tel: +90 532 625 7158

1. Giriş (Introduction)

Yapılı çevrede insan sağlığı, konforu ve güvenliği öncelikli öneme sahiptir. Özellikle güvenlik önlemleri içerisinde, tasarımın ilk aşamasından itibaren ele alınması gereken en önemli risklerden biri, yangın riskidir. Yangınlar ortaya çıkardığı maddi ve manevi zararlar bakımından yıkıcı etkiye sahiptir. Bu nedenle yangının oluşmasına ve oluşun yangının yayılmasına neden olacak her türlü riskin minimuma indirilmesi ve oluşabilecek yangın anında güvenliğin sağlanabilmesi için bazı önlemlerin alınması gerekmektedir. Oluşan yangının yayılmasında, kullanılan yapı malzemelerinin ve elemanlarının büyük rolü olduğu bilinmektedir.

İç ve dış ortam arasında ayırıcı eleman görevi üstlenen yapı kabuğu, alevlerin ve dumanın yayılımı bakımından yangın anında kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle özellikle, cephelerde meydana gelen veya cepheye sirayet etmiş yangınların ve yangın riskinin dikkatle üzerinde durulması gereken bir konu olduğu bilinmelidir. Yangın durumuna karşı alınan önlemler yerleşim ölçeğinden yapı bileşeni ölçeğine kadar, projelerin tasarım aşamasında, malzeme seçiminde ve uygulama detaylarında en önemli parametre olarak görülmelidir. Yangın anında ortaya çıkan alev ve dumanın maddi ve manevi kayıplara neden olmaması açısından yangının çabuk müdahale ile kontrol altına alınması büyük önem taşır. Binadan tahliyenin kontrollü bir biçimde sağlanmasının, dumanın ve alevin kontrol altına alınmasının hızlı ve başarılı bir biçimde gerçekleşmesi gerekmektedir.

Son yıllarda gelişen malzeme teknolojisi ve enerji verimli bina anlayışının da etkisi ile yapıları çevrede daha çok görülen çift katmanlı cepheye sahip yapıların, yangın anında ortaya çıkardığı alev ve duman yayılımının etkisi, incelenmesi gereken bir konu haline gelmiştir. Bugüne dek pek çok araştırmacı yaptığı çalışmalarda bu konunun önemini vurgulamış ve bu konu üzerinde araştırmalar yürütmüştür.

Bu çalışmada çift katmanlı cepheye sahip yapıların yangın anında ortaya çıkardığı alev ve duman yayılımı, PyroSim yazılımı kullanılarak, simülasyona dayalı analiz yöntemi ile incelenmektedir. Söz konusu yazılım, yangın simülasyon modeli (Fire Dynamics Simulator (FDS)) kullanılarak, yangın çıkışı ve duman yayılımını üç boyutlu model üzerinde test etmeye yardımcı olmaktadır. Simülasyon ile elde edilen sonuçların, yangın güvenliğinde tasarım ve planlamanın, malzeme ve bileşen seçimi kadar önemli olduğunun ortaya çıkartılması hedeflenmektedir.

Gelişen teknolojiyle birlikte binaların yapım aşamasından önce afetlere karşı önlemler alınabilmesi için, tüm dünyada tasarım aşamasından itibaren simülasyon programlarından ve model prototiplerinden yararlanılmaktadır. Simülasyonlar sonucunda afetler anında binanın göstereceği bütüncül performansın anlaşılmasının yanı sıra, yapının kritik noktaları ve dikkat edilmesi gereken bileşen ve malzemeler de belirlenebilmektedir. Bu simülasyon uygulamaları ve prototipler sayesinde afetler yaşanmadan önce birtakım önlemler alınabilmekte ve felaketlerin önüne geçilmektedir.

Bu çalışmada aynı kat yüksekliğine sahip, açık planlı ve bölme duvarlı olmak üzere iki farklı plan tipine sahip sanal yapının çift katmanlı cepheleri incelenmiştir. Çift katmanlı cepheler, hava koridorunun bölünme şekline göre dört tipte ele alınmıştır: i) kutu tipi; ii) şaft tipi; iii) koridor tipi ve iv) cephe boyunca bırakılan boşluk tipi. Bu cephe tiplerinin her birinin, yangın anında ortaya çıkan alev ve dumanın yayılımında ne gibi etkileri olduğunun belirlenmesi için 8 yangın senaryosu kurgulanmıştır. Simülasyonlar sonucunda elde edilen sonuçlar, grafik ve tablolar ile açıklanarak tasarımcı ve araştırmacılara yardımcı olabilecek bir kaynak ortaya çıkartılması amaçlanmıştır.

2. Literatür Taraması (Literature Review)

Literatüre bakıldığında yangın güvenliği ve çift katmanlı cephelere sahip yapılarda ortaya çıkabilecek yangınlar üzerine çok sayıda araştırma yapılmış olduğu görülmektedir. Yangın güvenliği konusunda, Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik çerçevesinde konuyu ele alan Başdemir vd. [1] Yangın Yönetmelik Kontrol Otomasyon (YYKO) modeli ortaya çıkartarak, yönetmelikte yer alan mimari hükümlerin tasarımcı tarafından kolay anlaşılır ve uygulanabilir olmasını hedeflemiştir. Benzer şekilde bir başka çalışmada [2] yönetmelik hükümleri hastane tasarımı özelinde değerlendirilerek, yangın güvenliğine yönelik politikalar önerilmektedir.

Çift katmanlı cephelerde oluşabilecek yangın konusu ile ilgili öne çıkan çalışmalar temelde iki açıdan ele alınmaktadır. Bunlardan birincisi, malzeme odaklı olup, cephe sistemlerinde kullanılan malzeme ve bileşenlerin yangın dayanımları, yanma sırasında ortaya çıkan zehirli gazların insan sağlığı üzerindeki etkisi ve cepheye yangın bariyerlerinin değerlendirildiği çalışmaları kapsamaktadır. Bu çerçevede, yangın dayanımı yönünden malzeme seçim kriterleri, Wade ve Clappett [3] tarafından hazırlanan raporda ele alınmakta; malzemelerin seçiminde, i) yangın dayanım sınıfı, ii) tutuşma kolaylığı, iii) duman ve zehirli gazların oluşumu ve iv) mekanik zarar hassasiyetinin gözetilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Cepheye kullanılan malzemelerin yangın karşısındaki dayanımları ve zehirli gaz salımları konusunda ise, Uygunoğlu vd. [4] yalıtım malzemelerinin özellikleri üzerinden değerlendirmelerde bulunmakta; Lamont ve Ingolfsson [5] ise, cepheye kullanılan metal kompozitlerin taşıdığı riskleri sıralamaktadır. Yangın dirençli cephe sistemleri ve yangın bariyerleri hakkında ise, Kılıç [6], Huang, vd. [7], Güleşen ve Yılmaz [8]'in çalışmaları bulunmaktadır. Araştırmalarda öne çıkan ikinci yaklaşım ise, cephelerde hava akımına bağlı olarak, yangının ve dumanın cephe içindeki hareketi üzerine yoğunlaşıldığı görülmektedir. Bu çalışmalar çoğunlukla hava akımlarının benzetiminin modellendiği hesaplanabilir akışkanlar mekaniğine dayalıdır. Ayrıca bu araştırmalarda yangın simülasyon modeli (Fire Dynamics Simulator-FDS) veya kısmi gerçekçi model oluşturularak, model üzerinde ortaya çıkan yangın konusunda incelemeler yapılmaktadır. Bu makale kapsamında literatürde, konuyu yangın simülasyon modelleri ile ele alan ve çift cephe içinde duman hareketinin modellenmesine dayalı çalışmalara ağırlık verilmiştir.

Çift katmanlı cephe üzerinde meydana geldiği varsayılan yangını, oluşturdukları prototip üzerinden inceleyen Ding, W. vd. [9], çift cidara sahip yapılarda yangın esnasında iki kabuk arasında bulunan boşluğa çıkan dumanın incelemesini, binanın prototipinden yararlanarak yapmıştır. Dumanın yayılmasını engellemek için odadaki duman basıncı ve boşluktaki duman basıncı arasındaki ilişkiyi incelemiş ve uygun şartlar sağlanırsa duman yayılımının engellenebileceği sonucuna ulaşmıştır.

Çift katmanlı cephe üzerinde meydana geldiği varsayılan yangını hem prototip hem de yangın simülasyon programı ile inceleyen Chow [10], çift katmanlı cephelerde iki kabuk arasındaki mesafenin değişmesi ile yangın sırasında ortaya çıkan alev yayılımı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Bu ilişkiyi incelemek için 15 m yüksekliğinde bir model inşa etmiş ve testlerin doğruluğu aynı zamanda çift katmanlı cephe analiz programı ile de onaylanmıştır.

Çift katmanlı cephe üzerinde meydana geldiği varsayılan yangını yangın simülasyon programı kullanılarak analiz eden Babilolyaei [11], çift kabuğa sahip yapılarda yangın sonucunda ortaya çıkan dumanın iki kabuk arasındaki yayılımını genişlik, havalandırma koşulu, rüzgâr gibi etkenler üzerinden incelemiştir. İnceleme için CFD tabanlı Pyrosim programını kullanmıştır.

Çift katmanlı cephe üzerinde meydana geldiği varsayılan yangını, yangın simülasyon programı kullanarak özelleştirilmiş cephe türünde inceleyen Wang, vd. [12], çift katmanlı cepheye sahip bir yapı modelinde şaft ve kutu tiplerinin birleşiminden oluşan bir cephe modellemiş ve yangın sonucu ortaya çıkan dumanın yayılımını incelemiştir. Şafta yayılan dumanın en çok hangi katta bulunan daireye zarar verdiği belirlenmiştir.

Cephe yangını konusunu, ulusal ve uluslararası mevzuatlar üzerinden yaptığı çalışmalar ile ortaya koyan Yaman [13], cephede oluşabilecek yangına karşı ulusal ve uluslararası yangın mevzuatlarını; cephede kullanılan malzeme, yatay yangın bariyeri, cephe açıklığı, binaların arasında bulunan mesafe, dış duvarların dayanım süresi ve otomatik söndürme sistemleri üzerinden incelemiştir. Türkiye'deki ulusal yangın mevzuatı, diğer ülkelerin yangın güvenlik önlemleriyle birlikte karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Çift katmanlı cephe üzerinde meydana gelen yangını yangın simülasyon programı kullanarak inceleyen Karakoyun [14], farklı özelliklere sahip güneş kontrol sistemlerinde, farklı boyutlardaki açıklıklar kullanıldığında yangın anında oluşan alev ve duman hareketlerini incelemiştir. İnceleme için CFD tabanlı Pyrosim programını kullanmıştır.

Giraldo, P. vd. [15], yaptıkları çalışmada cephenin havalandırma şekline göre bölümlenmesinden meydana gelen havalandırma boşluğu ve yangının yayılımı üzerine inceleme yapmışlardır. Bu çalışmayı yaparken yangın yayılımının önlemesi için İspanyol bina yönetmeliğini gözden geçirmişler ve çalışma esnasında matematiksel entegrasyon modellerini sayısal olarak çözmek için Fire Dynamics Simulator (FDS) yazılımını kullanmışlardır.

Literatürde, cephe sistemleri, malzemeleri ve yalıtım çözümlerinin yangın dayanımına yönelik yapılan değerlendirmelere de rastlanmaktadır [16, 17]. Bu çalışmalarda da "Yangın Dinamiği Simülatörü" (FDS) yazılımı ve ölçekli modellerden yararlanılarak, karşılaştırmalı analizler yapıldığı görülmüştür.

Civelek E. [18] çalışmasında, cephe yangın senaryoları üzerinden yüksek katlı binalarda cephe tasarımının yangın yayılımına etkisini analiz etmiştir. FDS (Fire Dynamic Simulation) yazılımını kullanarak, çeşitli cephe tasarım modellerinin analizleri ile belirli performans kriterlerine göre, en güvenli sistemleri ortaya çıkarabilecek bir yöntem geliştirmiştir.

Cephede havalandırma stratejileri ve yangın riski üzerine yapılan bir başka çalışmada Miao and Chow [19] pencere açıklığı ve cephe havalandırma boşluğunda duman yayılımı hareketi üzerine, CFD tabanlı FDS yazılımını kullanarak analizler yapmış ve belirli boşluk genişliği için, ısı yayma hızının ve pencere açıklığının geometrisinin, duman yörüngesini belirlemede iki anahtar faktör olduğunu göstermişlerdir.

Koridor tipi cephe boşluğunda yangına bağlı ısı yayılımının incelendiği bir başka çalışmada [20] bir açıklıktan (örneğin, bir pencere) çıkan alevin koridor benzeri bir kapalı alan içindeki sıcaklık değişimi araştırılmıştır. Yangın ısı yayma hızı ve açıklık boyutları 28 farklı deney koşuluyla değiştirilmiştir. Çeşitli açıklık boyutlarının düşeyde sıcaklık dağılımını ve HRR'yi karakterize eden genel bir model oluşturulmuş, bölme içindeki ısı salımı / ısı kaybı oranı, HRR ve pencere en-boy oranı test edilmiştir.

Çift katmanlı cephelerde yangın güvenliği konusunda Abdoh vd. [21] matematiksel bir model geliştirerek, yangın koşulları altında çift kabuk sistemlerin termal performansını simüle etmek için sayısal bir çerçeveye önermişlerdir. Sayısal model, yangına maruz kalan bir çift

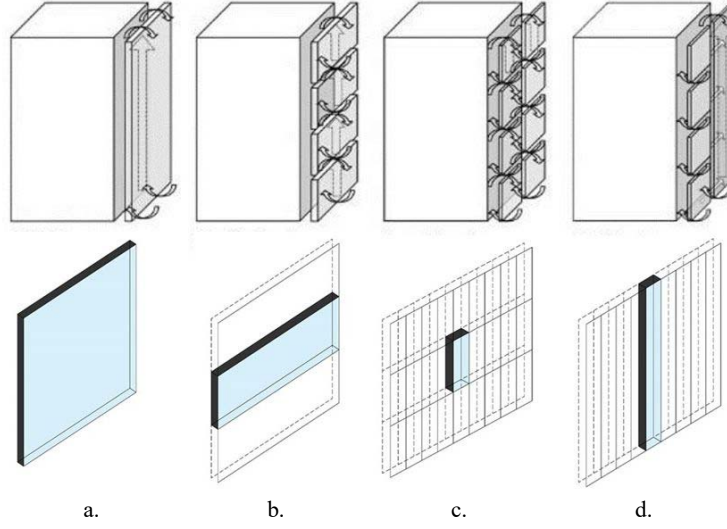
kabuk sisteminde yangın deneyleriyle ölçülenlerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Sayısal simülasyonları yürütmek için bir MATLAB kodu geliştirilmiş ve elde edilen sonuçlar, çift cephe sistemlerinin yangın yayılma özelliklerini ve sıcaklık dağılımını önemli ölçüde etkileyebileceğini ve bu nedenle yüksek binalar için cephe sistem tasarımında yangın güvenliğinin dikkate alınması gerektiğini göstermişlerdir. Ayrıca, bina yangın güvenliği açısından yapılan pek çok çalışmada [22-25] yangın yayılımı açısından CFD tabanlı ve FDS'ye dayalı simülasyon yöntemleri kullanılarak, en güvenli tasarım alternatiflerinin ortaya çıkarılması üzerine değerlendirmelerin yer aldığı görülmüştür.

Literatüre bakıldığında, çift katmanlı cephe sistemlerinde yangın riskinin tek bir cephe tipinde veya karşılaştırmalı iki tip üzerinden incelendiği, gerçek boyutlu veya ölçekli modeller üzerinde yapılan çalışmalar olduğu gibi, daha sıklıkla simülasyona dayalı yöntemler ile analizlerin gerçekleştirildiği anlaşılmaktadır. Yangının cepheden yayılımında, çift katmanlı cephe tiplerinin ve aradaki hava boşluğunun iç mekâna etkisinin önemli bir etken olduğu da yine literatür çalışmasından anlaşılmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu, yangın güvenliği stratejisini geliştirirken, bunu bir tasarım problemi olarak ele almanın gerekli olduğuna vurgu yapmaktadır.

3. Materyal Ve Metot (Material and Method)

20.yy başından beri çift katmanlı yapı kabuğuna sahip yapılar, teknolojik gelişmeler, yeni inşaat teknikleri, yeni malzemeler de kullanılarak her geçen gün daha fazla uygulama alanı bulmaktadır. Bu çalışma kapsamında şehir ölçeğinde uygunlukla karşılaşılabilecek, orta yükseklikteki bir yapı modeli olarak, altı katlı (18 metre yükseklikte) çift katmanlı cepheye sahip açık planlı ve kapalı planlı iki sanal yapı üzerinde çalışılmıştır. Bu yapıların çift katmanlı cephesi, hava koridorunun bölünme şekline göre aşağıda sıralanan 4 farklı tipe ele alınmıştır (Şekil 1).

- **Kutu tipi cephe bölünme**, en eski çift katmanlı cephe tipidir. Genellikle iç bölümde çift, dış bölümde tek katmanlı cam kullanılarak oluşturulan kutu biçiminde bir araya getirilen paneller sistemidir. Diğer kutu pencere bölümlerinin de birbirine bitişik olarak düzenlendiği bu kutular, devamlı biçimdeki dikey ve yatay bölmeler sayesinde bitişik odalardan gelen sesleri ve koku aktarımını önlemektedir [26]. İç ve dış katman arasında bulunan boşluğun derinliği istenilen işleve göre 10 cm ile 50 cm arasında değişir [27]. Bu sistemin avantajlarından biri her bir kutu bölümünün altında ve üstünde konumlandırılabilen giriş ve çıkış menfezlerinin havalandırmaya olanak sağlamasıdır [11].
- **Şaft tipi cephe bölünme** ile amaç, katlarda bulunan hava boşluklarının bina yüksekliğinde bir hava boşluğuna açılmasını sağlayarak bu boşluğun daimi olarak havalandırmasını sağlamak ve bunu sağlarken de baca etkisini artırarak bu etkiden faydalanmaktır. Zemin seviyesinden giren doğal hava menfezlerden içeri alındıktan sonra ısınarak merkezi şafta çekilir ve şafttan dışarı atılır. Bu sayede cephenin içerisinde doğal bir havalandırma imkânı da sağlanmış olur [11]. Şaft tipi cephelerde iki katman arasında kalan boşluk 0,3 m ile 1,2 m arasında değişebilir [27]. Kat yüksekliğinin fazla olduğu binalarda şaft boşluğunun içindeki hava akımının kontrolünün zor olması nedeniyle bu tip yapılarda şaft tipi cephenin uygulanması uygun değildir [26].
- **Koridor tipi cephe bölünme**, çift katmanlı cephelerin en çok kullanılan türlerinden biridir. Bu cephe tipinde her kata taze havayı içeri alan ve kirli havayı dışarı veren kanallar yerleştirilir [28]. Bu sayede her katın havalandırması kendi içinde gerçekleştirilmektedir. Boşluk içine alınan havanın boşluktaki hareketi kat yüksekliği ile sınırlı kaldığından ve havanın boşluğun



Şekil 1. Cephe bölümlenme türüne göre çift katmanlı cephe a. Cephe boyunca kesintisiz tip; b. Koridor tipi; c. Kutu tipi d. Şaft tipi [29]
(Double Skin Facade types based on divisions a. Multi-storey; b. Corridor facade; c. Box window type; d. Shaft box type)

içinde kalma süresinin az olmasından dolayı, havanın boşluğa girdiği andaki sıcaklığı ile boşluktan çıktığı andaki sıcaklığı arasında fazla ısı farkı oluşmamaktadır. Bu nedenle; boşlukta ısınan havanın boşluktan çıkış noktasında bile doğal havalandırmanın gerçekleşmesini olumsuz şekilde etkilemediği bu sayede etkin bir doğal havalandırma elde edildiği görülmektedir [26]. Koridor tipi cephede bulunan boşluğun derinliği 0,3 m ile 1,2 m arasında değişir, çoğunlukla içten açılan veya sürgülü kapılar ile boşluğa erişim sağlanır [27].

- **Cephe boyunca kesintisiz tip** cephede, katmanları arasında kalan boşluk, bina yüksekliği boyunca kesintiye uğramadan devam etmektedir [26]. Bu cephe tipinde katmanlar arasında bulunan boşluk aralığı 0,6 m ile 2,0 m arasında değişebilir [27]. Bu cephe tipinde bazı durumlarda kat hizasında temizlik ve bakımın yapılabilmesi amacıyla yürüme yolları yapılabilir ancak bu yürüme yollarının hava akımına engel olmayacak biçimde tasarlanmasına dikkat etmek gerekmektedir. Dış kabuk içerde bulunan taşıyıcı yapıya genellikle çelik taşıyıcılar yardımı ile taşınmaktadır [28]. Cephede bulunan menfezler yapının en alt ve en üst seviyesinde yer almaktadır. Alt seviyede bulunan menfezlerden içeri doğru alınan hava, cephe kabukları arasında ısındıkça yükselir ve yükselen sıcak havanın yerini alt seviyedeki menfezlerden içeri giren yeni soğuk hava alır. İçeri alınan bu soğuk hava cephe kabukları arasında bulunan sıcak havanın yükselmesi sağlar. Böylelikle ısınan hava yükselerek, binanın üst seviyesinde yer alan menfezlerden dışarı doğru atılır [26]. Bu sistemin önemli bir dezavantajı, katlar arasındaki yangın ve duman izolasyonunun sağlanamamasıdır [26].

Bu çalışma kapsamında, bu dört tip cephe sistemi uygulanan yapılarda yangın anında ortaya çıkan duman ve alev yayılımı simülasyon programı üzerinden incelenmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Günümüzde bina performansının sınanması için simülasyon programlarının kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde literatürde kullanım sıklığı da gözetilerek Pyrosim programı tercih edilmiştir. Pyrosim programı [30], Fire Dynamics Simulator (FDS) [31] için kullanılabilen bir uygulamadır. Bu program genellikle yangın anında ortaya çıkan dumanın hareketini, sıcaklığını ve toksin konsantrasyonlarını doğru bir şekilde tahmin eden yangın simülasyonları oluşturmak için tercih

edilmektedir. PyroSim, FDS'nin metin tabanlı girdi dosyasını otomatik olarak oluşturan grafiksel bir arayüz sağlamaktadır. Özelleştirebilecek ve mevcut modele aktarılacak bir kütüphaneye sahiptir. Bu kütüphanede, reaksiyonlar, ısı dedektörleri, malzemeler, parçacıklar, yüzeyler ve diğer model parametreleri bulunmaktadır. PyroSim programının simülasyon motoru olan FDS'nin geçerliliği, NIST [32] (National Institute of Standards and Technology) tarafından hazırlanan geçerlilik raporunda detaylı bir şekilde aktarılmaktadır [33]. Her modelleme aracında olduğu gibi, PyroSim'de de girdi verilerinin güvenilirliğinin sağlanması ve simülasyonun sonuçlanabilmesi için hata ayıklama gereksinimi kullanıcının sorumluluğundadır.

Bu çalışma kapsamında oluşturulacak yangın senaryosu üzerinden, farklı cephe tiplerinin simülasyon yolu ile yangın performansları test edilmektedir. Tasarlanarak oluşturulacak olan yangının analizinin en önemli parçalarından biri tasarım senaryosudur. Bu senaryonun analitik olarak açıklanmasını sağlayan veri ise açığa çıkan ısı oranı olarak adlandırılan Heat Release Rate (HRR değeri) dir. Dolayısıyla tasarlanarak oluşturulacak olan yangının analizi için açığa çıkan ısı oranının (HRR değeri) anlaşılması gerekmektedir. HRR değeri, Watt (W) ile ölçülür [17]. Bir yangının tutuşma aşamasından korlanma (sönme) aşamasına kadar olan süreç ISO 834'te [33] yangın gelişim eğrisi olarak açıklanmaktadır. Yangın eğrisinde tutuşma aşamasından parlama (*flashover*) aşamasına kadar olan bölüm yangının gelişime aşamasıdır. Bir oda içerisinde pencere ve/veya kapı açıklığı varsa sıcaklık kademeli bir şekilde artar ve yangın parlama (*flashover*) aşamasına kadar ilerler. Parlama aşamasında, yangında açığa çıkan ısı oranı (HRR) önemli miktarda artar ve yangının söndürülmesi zorlaşabilir. Bu nedenle parlama aşaması öncesi önlem alınması çok önemlidir. Parlamadan sonraki aşama büyüme aşaması olarak tanımlanmaktadır. Açığa çıkan ısı oranının (HRR) düşmesi yangının son aşaması olan sönme aşaması olarak ifade edilir [17]. Bu çalışma kapsamında HRR değeri, önemli bir gösterge olarak dikkate alınmaktadır.

3.1. Parametrelerin Belirlenmesi ve Modelin Tanımlanması (Definition of Parameters and Modelling)

Bu çalışmada ele alınacak yapıya ait planlar CAD programı ile çizilmiştir. Bu kapsamda temelde farklı iki plan tipine sahip (açık planlı ve bölme duvarlı olmak üzere) iki yapı kullanılmıştır. Bu

yapılar simülasyona uygun şekilde tasarlanan, hipotetik yapılardır. Her bir plan tipindeki yapıya dört farklı cephe türü ayrı ayrı uygulanmıştır. Böylece, bu cepheler üzerinde alev ve dumanın hareketini incelemek için toplamda sekiz farklı tasarım oluşturulmuştur.

Planları ortaya çıkan yapılar, ayrıca üç boyutlu olarak da modellenmiş ve simülasyona hazır hale getirilmiştir. Oluşturulan modeller ayrı ayrı olarak Pyrosim analiz programının açabileceği uzantılarda kaydedilmiştir. Pyrosim programı üzerinde üç boyutlu haliyle erişilen modellerin değerlendirilmesi için, yangın anında oluşan alev ve dumanın açık bir pencereden dışarı çıkarak binanın tüm cephesi boyunca üst katlara doğru yayılma (*leap frog effect*) etkisine ait mesafenin azaltılması ve sıcaklığın ve dumanın azaltılması olmak üzere iki performans kriteri belirlenmiştir. Çalışma ile bir odadaki masa üzerinde başlayan ve bir tutuşmayla gerçekleşecek tasarım yangınının, pencerenin açıklığından dışarı doğru çıkması ve çift cephe içinde yayılması senaryosu üzerine kurgulanmıştır. Dışarıdaki bir yangının cepheye sirayeti, başka parametreler ve dinamikler altında değerlendirmeyi gerektirmektedir. Bu çalışmanın çerçevesi sadece çift cephe içindeki yayılım ile sınırlı tutulmuştur. Burada amaç, bina içinde çıkan bir yangının, plan tipi de gözetilerek, çift cephe içinde yayılmasını gözlemlemektir. Yangın tasarım senaryosu için yangının plan tipi ve çift katmanlı cephe türleri dikkate alınarak oluşturulan sekiz ayrı tip model ve belirlenen cephelere ait tasarım özellikleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

Yangın tasarım senaryosu için tasarlanan açık planlı ve bölme duvarlı yapı tiplerine ait planlar Şekil 2 ve Şekil 3'te yer almaktadır. Bina cephesi boyunca, yanma ve duman etkisini test edebilmeye yönelik olarak, yapının 1. katında yer alan mekânın içerisinde bir yangın oluşması ve bu yangının Şekil 2 ve 3'te kırmızı ile işaretli olarak gösterilen ve yangın modelinde açık olarak kurgulanan pencereden çıkması planlanmıştır. Yangın senaryoları bu durum dikkate alınarak oluşturulmuştur. Senaryo modelleri oluşturulurken, kullanılan malzemelerin yangın dayanımı ve zehirli gaz salımına ait özellikleri, cephe bileşenlerinin detayları, montaj ve işçilik özellikleri ile rüzgâr hızı ve yönü gibi çevresel faktörler göz ardı edilmiştir. Çalışma, sadece farklı cephe türlerinde, dumanın seyri ve iki farklı plan tipolojisinde, iç mekâna etki düzeyinin analizi ile sınırlandırılmıştır.

Açık plana ve bölme duvarlı plana sahip yapılarda kullanılan farklı cephe tiplerini yangın güvenliği bakımında analiz edebilmek için oluşturulan tasarım yangın senaryosu analizi yalınlaştıracak biçimde kurgulanmıştır. Her bir örnek için; kat yüksekliği 3,00 metre olarak belirlenmiştir. Yapı zemin kat üzeri beş kat olmak üzere toplam altı katlı olacak şekilde kabul edilmiştir. Tasarım senaryosu sonucunda alevlerin odadan çıkacağı 1,68 m. x 1,20 m. ölçülerinde olmak üzere toplam 2.01 metrekarelik yüzey alanına sahip pencere boşlukları oluşturulmuştur.

A Tipi Yapı Senaryosunda dört adet alt model oluşturulmuştur. Bu modellerin her biri açık plana sahip olacak biçimde tasarlanmıştır. Tüm modellerde 1. katta yangının çıkacağı pencere hariç tüm pencereler kapalı olarak modellenmiştir. A1 modelinde çift kabuklu cephenin cephe boyunca havalandırılan tipi, A2 modelinde şaft tipi, A3 modelinde koridor tipi ve A4 modelinde kutu tipi kullanılmıştır. Bu modellerden A1 tipine ait çizimler Şekil 3a'da verilmektedir.

B Tipi Yapı Senaryosunda dört adet alt model oluşturulmuştur. Bu modellerin her biri bölme duvarlı plana sahip olacak biçimde tasarlanmıştır. Tüm modellerde 1. katta yangının çıkacağı pencere hariç tüm pencereler kapalı olarak modellenmiştir. B1 modelinde çift kabuklu cephenin cephe boyunca tipi, B2 modelinde şaft tipi, B3 modelinde koridor tipi ve B4 modelinde kutu tipi kullanılmıştır. Bu modellerden B1 tipine ait çizimler Şekil 3b'de verilmektedir.

3.2. Bilgisayar Programında Modelin Oluşturulması (Modelling process in computer program)

Pyrosim programında oluşturulan alan 22,77 m x 15,29 m x 18 m. olarak belirlenmiştir. Her bir hücrenin programa girdisi 0,25 m. x 0,25 m. x 0,25 m. ebatlarında olacak şekilde yapılmıştır. Her bir kat 3 m. yüksekliğindedir ve her kat 20 cm. 'lik tutuşmaz malzeme özelliğindeki döşemeler ile birbirinden ayrılmıştır. Yangın yükünün belirlenmesinde, yanıcı malzemenin toplam kütlesi (kg) ve kalorifik değeri (MJ/kg) ile birlikte mekân alanı (m²) hesaba katılmaktadır. Ancak literatürde, çeşitli bina ve mekân tipleri için belirli yangın yükü değerleri tanımlıdır [35, 36]. Literatüre dayalı olarak, bu çalışma kapsamında senaryolarda yangın yükü yoğunluğu 500 MJ/m² olarak atanmıştır. İlk tutuşma oda içerisindeki masanın yanmaya başlamasıyla gerçekleşmiştir ve açığa çıkan ısı oranı (HRR) 1000 kW olarak atanmıştır.

4. Bulgular ve Hipotezin Sınanması (Results and Test of Hypothesis)

Pyrosim programında yapılan simülasyonlar sonucunda duman ve sıcaklık değerlerinin zamana göre grafiksel değişimi ve bunların görsel sonuçları elde edilmiştir. Açık plan ve bölme duvarlı plan tipine sahip yapılar kullanılarak elde edilen sonuçlar; ilk olarak aynı tipte yapıların duman, sıcaklık ve HRR değeri bakımından kendi içerisinde, daha sonra tüm cephe tipleri ve plan tipleri bir araya getirilerek hem plan tipi, hem de cephe tipinin gösterdiği farklılıklar baz alınarak incelenmiştir.

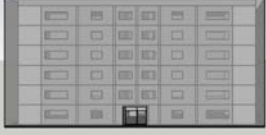

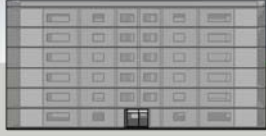



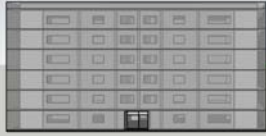

4.1. A Tipi Senaryo Modellerine Ait Sonuçları (Results of A Type Scenario Models)

A1 senaryosunda oluşturulan tasarım yangını sonucunda ortaya çıkan duman yayılımının 10., 25., 50., 75. ve 100. saniyesine ait görüntüler Tablo 2'de görülmektedir. 10. saniyede duman cephe yüzeyinde ikinci kat seviyesine ulaşmış olarak görülmektedir. 25. saniyede dumanlar ikinci kat penceresinde de yoğun bir biçimde görülmektedir. Duman bu saniyede aynı hizadaki diğer pencerelerde de kendini göstermiştir. 50. saniye sonrasında yangının ortaya çıktığı dairede bulunan diğer odalarda ve cephe üzerinde yayılımına devam ettiği gözlemlenmiştir. A1 senaryosunda, 100 saniyelik simülasyon sonucunda ısılı çiftten ölçülen en yüksek sıcaklık değeri 75°C olarak yaklaşık 63. saniyede görülmüştür. Aynı şekilde 100 saniyelik simülasyon süresince A1 senaryosundaki en yüksek HRR değeri 820 Kw olarak yaklaşık 55.saniyede ölçülmüştür. Simülasyona ait HRR ve sıcaklık değerleri Tablo 3'de verilmektedir.

A2 senaryosunda oluşturulan tasarım yangını sonucunda ortaya çıkan duman yayılımının 10., 25., 50., 75. ve 100. saniyesine ait görüntüler Tablo 2'de görülmektedir. 10. saniyede dumanın cephe yüzeyinde 1.kat seviyesinden 4. kat seviyesine kadar gelmiş olduğu görülmektedir. 25. saniyede dumanların 1.kat seviyesinden 5.kat seviyesine kadar ilerlediği görülmüştür. 50. saniye sonrasında dumanın yangının çıktığı dairede bulunan diğer odalara da yayıldığı ve cephede zemin kat da dahil olmak üzere yayılımına devam ettiği gözlemlenmiştir. A2 senaryosunda, 100 saniyelik simülasyon sonucunda ısılı çiftten ölçülen en yüksek sıcaklık değeri 85°C olarak yaklaşık 40. saniyede görülmüştür. Aynı şekilde 100 saniyelik simülasyon süresince A2 senaryosundaki en yüksek HRR değeri 840 kW olarak yaklaşık 82.saniyede ölçülmüştür. Simülasyona ait HRR ve sıcaklık değerleri Tablo 3'te verilmektedir.

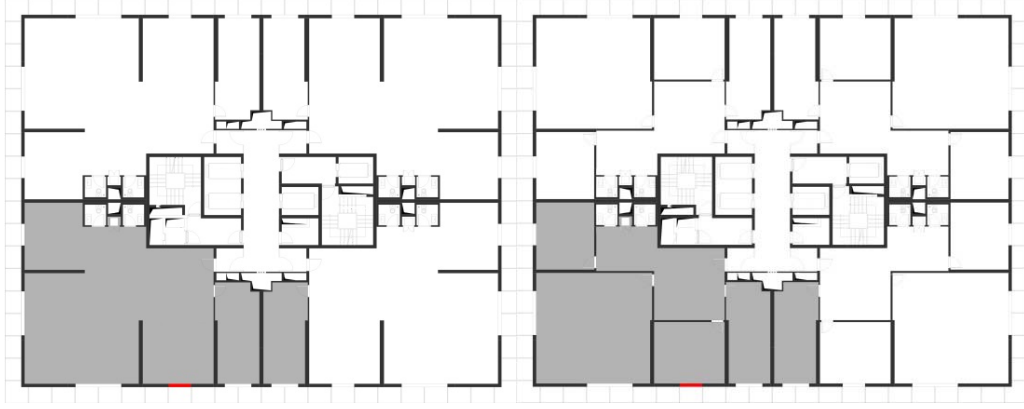
A3 senaryosunda oluşturulan tasarım yangını sonucunda ortaya çıkan duman yayılımının 10., 25., 50., 75. ve 100. saniyesine ait görüntüler Tablo 2'de görülmektedir. 10. saniyede dumanın cephe tipinden kaynaklı olarak yatay ilerlediği ve cephe yüzeyinde 1.kat seviyesinde

Tablo 1. Çalışma için oluşturulan yapı tipleri ve özellikleri (Building types and specifications defined for the study)

Cephe Özellikleri					
Model	Yapı yüksekliği	Plan Tipi	Cephe Tipi	Cepheler arası mesafe	Cephe Görünüşü
A1	18m	Açık plan	Cephe boyunca	120 cm	
A2	18m	Açık plan	Şaft tipi	120 cm	
A3	18m	Açık plan	Koridor tipi	120 cm	
A4	18m	Açık plan	Kutu tipi	120 cm	
B1	18m	Bölme duvarlı plan	Cephe boyunca	120 cm	
B2	18m	Bölme duvarlı plan	Şaft tipi	120 cm	
B3	18m	Bölme duvarlı plan	Koridor tipi	120 cm	
B4	18m	Bölme duvarlı plan	Kutu tipi	120 cm	

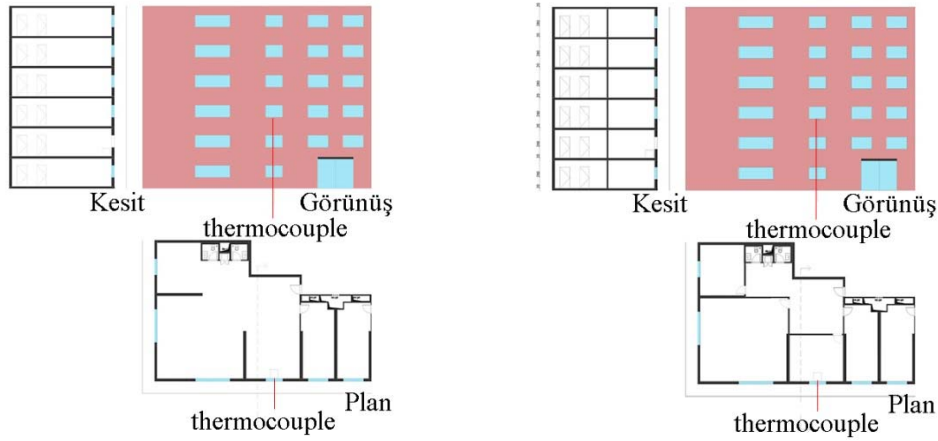
yangının ortaya çıktığı odanın iki yanında bulunan odalara geldiği görülmüştür. 25. saniyede dumanların bulunduğu kat boyunca ilerlediği görülmüştür ayrıca bu saniyede dumanın sadece cephede değil yangının çıktığı dairede bulunan diğer odalara da yayıldığı

gözlemlenmiştir. Simülasyonun devamında dumanların kat boyunca ilerlediği görülmüştür. 100 saniyelik simülasyon sonucunda ısılı çiftten ölçülen en yüksek sıcaklık değeri 80°C olarak yaklaşık 90. saniyede görülmüştür. Aynı şekilde 100 saniyelik simülasyon



Şekil 2. Solda açık planda açık bırakılan pencere kırmızı çizgi ile gösterilmiştir ve sağda bölme duvarlı planda açık bırakılan pencere kırmızı çizgi ile gösterilmiştir

(Left the open window in open space plan type shown by red line and right the open window in seperated rooms plan type shown by red line)



Şekil 3. Solda A1 modeli plan, kesit ve görünüşü, sağda B1 modeli plan, kesit ve görünüşü
(Left side A1 model plan, section and elevation; right side B1 model plan, section and elevation)

süresince A3 senaryosundaki en yüksek HRR değeri 880 kW olarak yaklaşık 35.saniyede ölçülmüştür. Simülasyona ait HRR ve sıcaklık değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

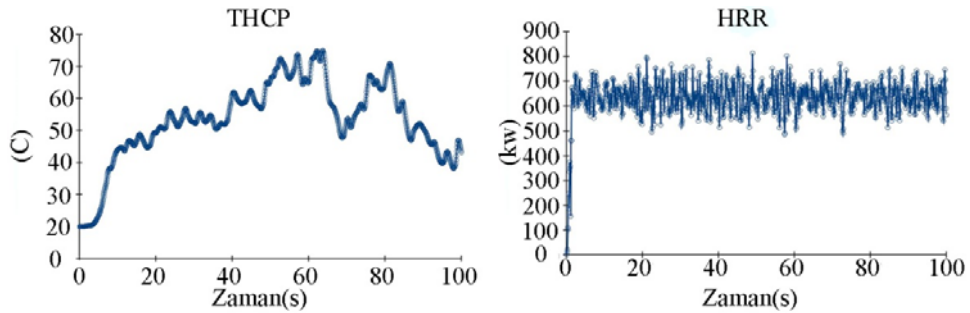
A4 senaryosunda oluşturulan tasarım yangını sonucunda ortaya çıkan duman yayılımının 10., 25. ve 50. saniyesine ait görünüşler Tablo 2'de görülmektedir. Kutu tipi cephe olması ve cephenin havalandırmasının olmamasından dolayı simülasyon süresi hedeflenen süre boyunca devam edememiştir. 10. saniyede dumanın yangının ortaya çıktığı odadan cepheye doğru ilerlemiş olduğu görülmüştür. 25. saniyede dumanların iki cephe arasında kalan kutu içerisine yayıldığı ve geçirimsiz ara bölmelerden dolayı yan mekânlara ilerleyemediği görülmüştür. 50. Saniyede yangının ortaya çıktığı dairenin diğer odalarında ve yangının ortaya çıktığı odanın cepheleri arasında bulunan boşluğu tamamen duman ile dolduğu gözlemlenmiştir. 50 saniyelik simülasyon sonucunda ısı çiftten ölçülen en yüksek sıcaklık değeri 102°C olarak yaklaşık 50. saniyede görülmüştür. Aynı şekilde 50 saniyelik simülasyon süresince A4 senaryosundaki en yüksek HRR değeri 36000 kW olarak yaklaşık 49.saniyede ölçülmüştür. Simülasyona ait HRR ve sıcaklık değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir. A4 senaryosunda oluşturulan tasarım yangını, yangın anında ortaya çıkan duman ve alevin cepheler arası kutuda sıkışması nedeniyle hedeflenen 100 saniyelik simülasyon sürecini tamamlayamamıştır ve simülasyon 50. saniyede son bulmuştur. Elde edilen simülasyonlarda

hareket alanı kısıtlanan alev ve duman yayılımı HRR değerinin normal değerlerin üstünde çıkmasına neden olmuştur. Oluşan bu durum bina statüğü ve yangın anında içeride bulunabilecek canlıların sağlığı konusunda risk oluşturmuştur. Bu nedenle alev ve dumanın kontrolünün sağlanabilmesi açısından A4' senaryo tasarlanmıştır. A4' senaryoda tasarım yangının ortaya çıktığı odanın penceresinin hizasında bulunan tüm pencerelerin bulunduğu alana cephe içinde 20*20 cm ölçülerinde 3 adet menfez görevi görecek açıklık tanımlanmıştır.

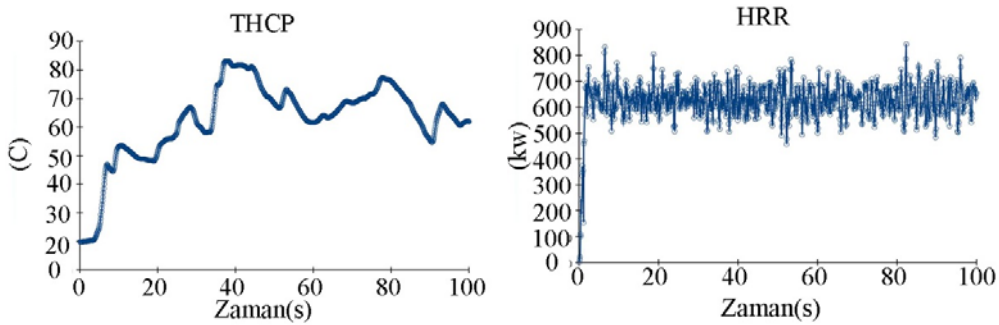
A4' senaryosunda oluşturulan tasarım yangınının simülasyonu sonucunda ortaya çıkan duman yayılımının 10., 25., 50., 75. ve 100. saniyesine ait görünüşler Tablo 2'de görülmektedir. 10. saniyede dumanın cephe yüzeyinde 1.kat seviyesinden çıkıp 2. kat seviyesine kadar gelmiş olduğu görülmektedir. 25. saniyede dumanların 1.kat seviyesinden 4.kat seviyesine kadar ilerlediği belirlenmiştir. 50. saniye sonrasında dumanın yangının çıktığı dairede bulunan diğer odalara da yayıldığı ve cephe üzerinde de zemin kat da dahil olmak üzere yayılımına devam ettiği gözlemlenmiştir. 100 saniyelik simülasyon sonucunda ısı çiftten ölçülen en yüksek sıcaklık değeri 108°C olarak yaklaşık 80. saniyede görülmüştür. Aynı şekilde 100 saniyelik simülasyon süresince A4' senaryosundaki en yüksek HRR değeri 851 kW olarak yaklaşık 93. saniyede ölçülmüştür. Simülasyona ait HRR ve sıcaklık değerleri Şekil 4-Şekil 8'de gösterilmiştir.

Tablo 2. A tipi senaryo modellerinin zamana bağlı duman yayılımına ait görselleri.
(The images of smoke emission of A type scenario models by time)

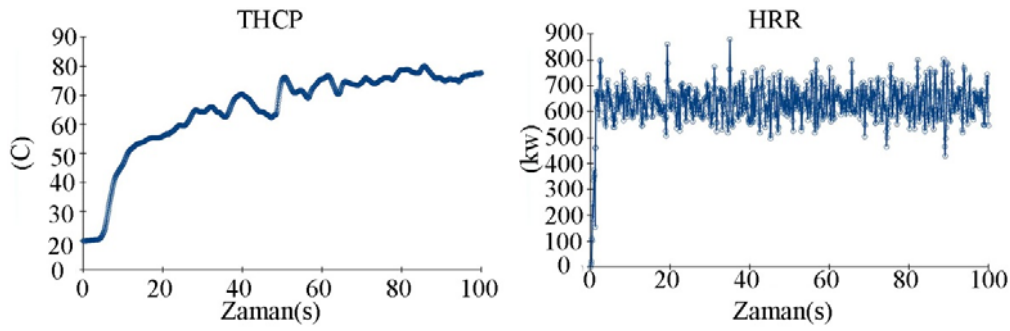
Model	Zamana bağlı duman yayılımı görselleri				
	10. Sn.	25. Sn.	50. Sn.	75. Sn.	100 sn.
A1					
A2					
A3					
A4					
A4'					



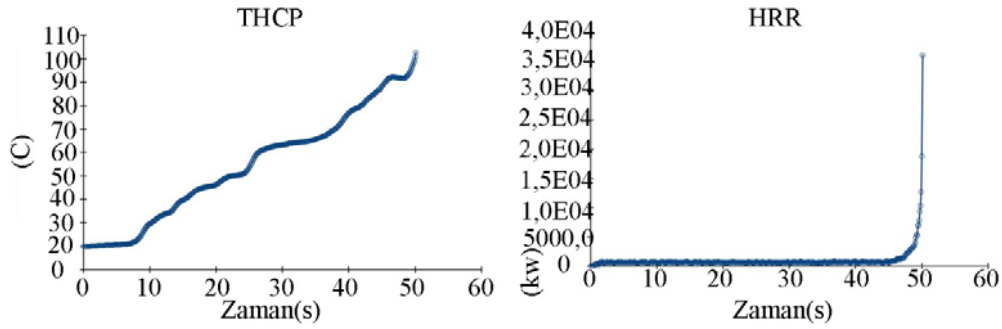
Şekil 4. A1 senaryosu sıcaklık/zaman ve HRR/zaman eğrisi (A1 type scenario model temperature and HRR values by time)



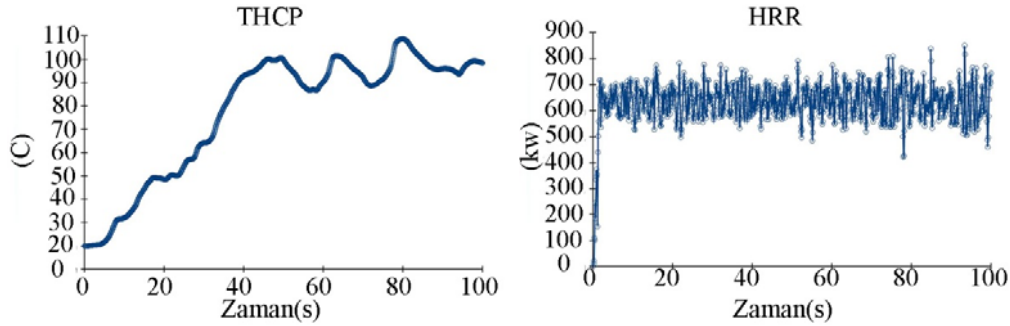
Şekil 5. A2 senaryosu sıcaklık/zaman ve HRR/zaman eğrisi (A2 type scenario model temperature and HRR values by time)



Şekil 6. A3 senaryosu sıcaklık/zaman ve HRR/zaman eğrisi (A3 type scenario model temperature and HRR values by time)



Şekil 7. A4 senaryosu sıcaklık/zaman ve HRR/zaman eğrisi (A4 type scenario model temperature and HRR values by time)



Şekil 8. A4' senaryosu sıcaklık/zaman ve HRR/zaman eğrisi (A4' type scenario model temperature and HRR values by time)

4.2. B Tipi Senaryo Modellerine Ait Sonuçları (Results of B Type Scenario Models)

B1 senaryosunda oluşturulan tasarım yangını sonucunda ortaya çıkan duman yayılımının 10., 25., 50., 75. ve 100. saniyesine ait görüntüleri Tablo 4'te görülmektedir. 10. saniyede duman cephe yüzeyine çıkmış ve ikinci katın penceresinin alt seviyesine ulaşmış olarak görülmektedir. 25. saniyede dumanlar ikinci kat penceresinde de yoğun bir biçimde görülmesinin yanı sıra aynı hizadaki diğer pencerelerde de kendini göstermektedir. 50. saniye sonrasında yangının ortaya çıktığı pencere hizası haricinde diğer katların pencerelerine doğru da gittiği görülmüştür. 100 saniyelik simülasyon sonucunda ısı çiftten ölçülen en yüksek sıcaklık değeri 127°C olarak yaklaşık 47. saniyede görülmüştür. Aynı şekilde 100 saniyelik simülasyon boyunca B1 senaryosundaki en yüksek HRR değeri 957 kW olarak yaklaşık 91. saniyede ölçülmüştür. Simülasyona ait HRR ve sıcaklık değerleri Tablo 5'te gösterilmiştir.

B2 senaryosunda oluşturulan tasarım yangını sonucunda ortaya çıkan duman yayılımının 10., 25., 50., 75. ve 100. saniyesine ait görüntüleri Tablo 4'te görülmektedir. 10. saniyede duman hareketinin cephe yüzeyinin 1.kat seviyesinden 4. kat seviyesine kadar gelmiş olduğu

görülmektedir. 25. saniyede dumanların 1.kat seviyesinden 5.kat seviyesine kadar ilerlediği belirlenmiştir. 50. saniye sonrasında dumanın, yangının cepheye çıktığı camın hizasındaki diğer katlara kadar yayıldığı gözlemlenmiştir. 100 saniyelik simülasyon sonucunda ısı çiftten ölçülen en yüksek sıcaklık değeri 200°C olarak yaklaşık 100. saniyede görülmüştür. Aynı şekilde 100 saniyelik simülasyon süresince B2 senaryosundaki en yüksek HRR değeri 810 kW olarak yaklaşık 24. saniyede ölçülmüştür. Simülasyona ait HRR ve sıcaklık değerleri Tablo 5'te gösterilmiştir.

B3 senaryosunda oluşturulan tasarım yangını sonucunda ortaya çıkan duman yayılımının 10., 25., 50., 75. ve 100. saniyesine ait görüntüleri Tablo 4'te görülmektedir. 10. saniyede dumanın cephe tipinden kaynaklı olarak yatay ilerlediği ve 1.kat seviyesinde komşu odalara da geldiği görülmüştür. 25. saniyede dumanların bulunduğu kat boyunca ilerlediği belirlenmiştir. 100 saniyelik simülasyon sonucunda ısı çiftten ölçülen en yüksek sıcaklık değeri 160°C olarak yaklaşık 45. saniyede görülmüştür. Aynı şekilde 100 saniyelik simülasyon süresince A3 senaryosundaki en yüksek HRR değeri 845 kW olarak yaklaşık 18.saniyede ölçülmüştür. Simülasyona ait HRR ve sıcaklık değerleri Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 4. B tipi senaryo modellerinin zamana bağlı duman yayılımına ait görselleri.
(The images of smoke emission of B type scenario models by time)

Model	Zamana bağlı duman yayılımı görselleri				
	10. Sn.	25. Sn.	50. Sn.	75. Sn.	100 sn.
B1					
B2					
B3					
B4					
B4'					

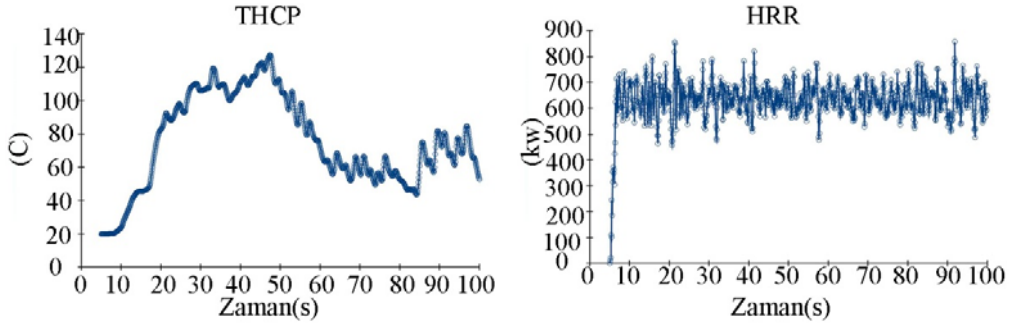
B4 senaryosunda oluşturulan tasarım yangını sonucunda ortaya çıkan duman yayılımının 10. saniyesine ait görünüş Tablo 4'te görülmektedir. Cephe tipinin kutu tipi olması ve cephenin havalandırılmaması nedeniyle simülasyon hedeflenen süre kadar devam edememiştir. 10. saniyede dumanın yangının ortaya çıktığı odadan cepheye doğru ilerlediği görülmüştür. 16. saniyede yangının meydana geldiği oda ve cephe boşluğunu tamamen duman ile dolduğu gözlemlenmiştir. 16 saniyelik simülasyon sonucunda ısı çiftten ölçülen en yüksek sıcaklık değeri 95°C olarak yaklaşık 16. saniyede görülmüştür. Aynı şekilde 16 saniyelik simülasyon süresince B4 senaryosundaki en yüksek HRR değeri 44000 kW olarak yaklaşık 16.saniyede ölçülmüştür. Simülasyona ait HRR ve sıcaklık değerleri Tablo 5'te gösterilmiştir.

B4 senaryosunda oluşturulan tasarım yangını sonucunda ortaya çıkan duman ve alev yayılımı, cephede havalandırma unsuru göz ardı edilerek yapılan tasarım nedeniyle simülasyon süresi hedeflendiği gibi 100 saniyeye ulaşamamıştır ve simülasyon 16. saniyede son bulmuştur. Simülasyonda yangın sonucu oluşan duman ve alev yayılım alanının kısıtlı olması nedeniyle ölçülen HRR değeri normal değerlerin üzerinde çıkmıştır. HRR değerinin bu kadar yüksek çıkması durumu bina statığı ve yangın anında içeride bulunan canlı sağlığı konusunda risk oluşturmuştur. Bu nedenle alev ve dumanın kontrolünün sağlanabilmesi açısından B4' senaryo oluşturulmuştur. B4' senaryoda tasarım yangının ortaya çıktığı odanın penceresinin hizasında bulunan tüm pencerelerin bulunduğu alana cephe içinde 20*20 cm ölçülerinde 3 adet menfez görevi görececek açıklık tanımlanmıştır. B4' senaryosunda oluşturulan tasarım yangın sonucu

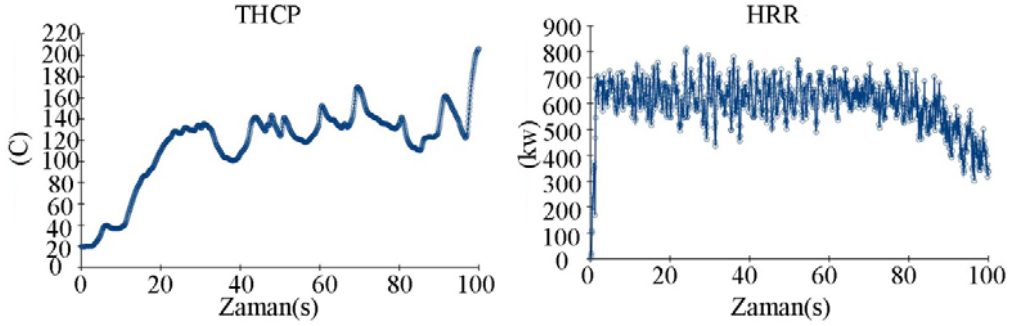
ortaya çıkan duman yayılımının 10., 25., 50., 75. ve 100. saniyesine ait görünüşler Tablo 4'te görülmektedir. 10. saniyede dumanın cephe yüzeyinde 1. kat seviyesinden çıkıp 2. kat seviyesine kadar gelmiş olduğu görülmektedir. 25. saniyede dumanların 1. kat seviyesinden 4. Kat seviyesine kadar yükseldiği ilerlediği gözlemlenmiştir. 100 saniyelik simülasyon sonucunda ısı çiftten ölçülen en yüksek sıcaklık değeri 162°C olarak yaklaşık 69. saniyede görülmüştür. Aynı şekilde 100 saniyelik simülasyon süresince B4' senaryosundaki en yüksek HRR değeri 569 kW olarak yaklaşık 1,6. saniyede ölçülmüştür. Simülasyona ait HRR ve sıcaklık değerleri Şekil 9-13'te gösterilmiştir.

4.3. Tartışma (Discussion)

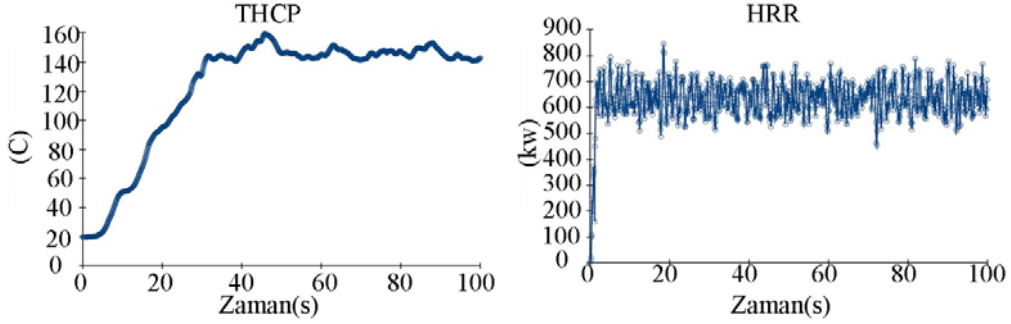
Çalışma kapsamında ele alınmış tüm senaryolara ait simülasyonlardan elde edilen HRR ve maksimum sıcaklık değerleri ile bu değerlerin görüldüğü saniyeler Tablo 6'da yer almaktadır. A tipi senaryoları kendi içinde incelendiğinde maksimum HRR değerinin A4 senaryosu olarak adlandırılan modelde görüldüğü tespit edilmiştir. 36000 olarak ölçülen bu değer 100 saniyelik simülasyonun tamamlanamayarak hata verdiği 49. saniyesine ait olduğu belirlenmiştir. En yüksek sıcaklık değerinin de A4 senaryosu olarak adlandırılan modelde görüldüğü belirlenmiştir. 102°C olarak ölçülen bu değer 100 saniyelik simülasyonun tamamlanamayarak hata verdiği 50. saniyesine ait olduğu belirlenmiştir. B tipi senaryoları kendi içinde incelendiğinde maksimum HRR değerinin B4 senaryosu olarak adlandırılan modelde görüldüğü tespit edilmiştir. 44000 olarak ölçülen bu değer 100 saniyelik simülasyonun hata verdiği 16.



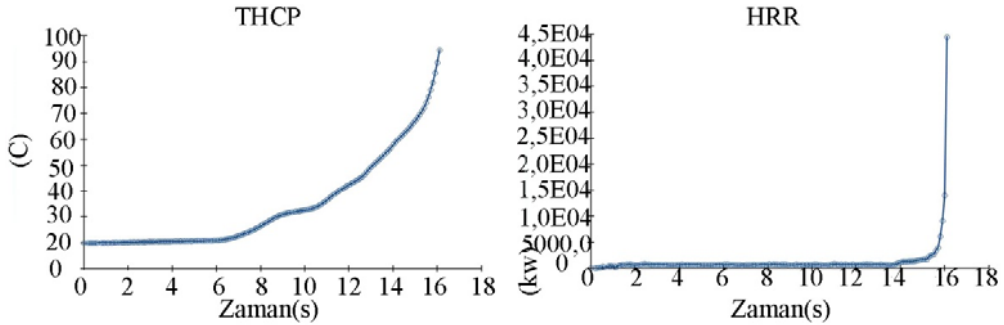
Şekil 9. B1 senaryosu sıcaklık/zaman ve HRR/zaman eğrisi (B1 type scenario model temperature and HRR values by time)



Şekil 10. B2 senaryosu sıcaklık/zaman ve HRR/zaman eğrisi (B2 type scenario model temperature and HRR values by time)



Şekil 11. B3 senaryosu sıcaklık/zaman ve HRR/zaman eğrisi (B3 type scenario model temperature and HRR values by time)



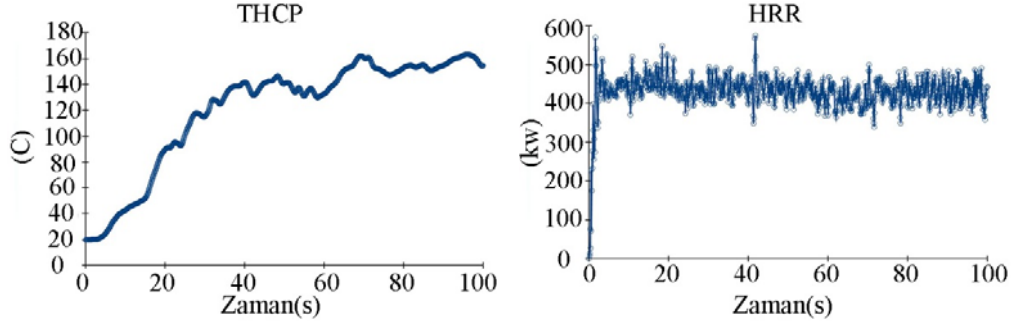
Şekil 12. B4 senaryosu sıcaklık/zaman ve HRR/zaman eğrisi (B4 type scenario model temperature and HRR values by time)

saniyesine ait olduğu belirlenmiştir. En yüksek sıcaklık değerinin ise B2 senaryosu olarak adlandırılan modelde görüldüğü belirlenmiştir. 200°C olarak ölçülen bu değer 100 saniyelik simülasyonun 100. saniyesine ait olduğu belirlenmiştir. Tüm senaryolar bir araya getirildiğinde en yüksek HRR değerinin 44000 kw ile B4, en yüksek sıcaklık değerinin ise 200°C ile B2 senaryosuna ait olduğu saptanmıştır.

100 saniyelik simülasyonun 10., 25., 50., 75. ve 100. saniyesinde ölçülen HRR ve sıcaklık değerleri Tablo 7'de verilmiştir. Kritik değer belirlenmesi için maksimum değerler baz alınmıştır, en yüksek HRR değerinin B4 senaryosu simülasyonunda ortaya çıktığı görülmüştür. Bu değer simülasyonun 16. saniyesinde ölçülmüştür. Simülasyonda baz alınan saniyeler arasında olmamasına karşın ortaya çıkan bu değer oldukça ciddi bir boyutta olmasından ötürü bu değere

ayrı olarak yer verilmesi gerektiği düşünülmüştür. Tablo 7’de yer alan verilere bakarak en yüksek HRR değerlerinin kutu tipinde çift katmanlı cepheye sahip yapılarda görüldüğü açıkça ortaya çıkmıştır. Bu yapılar cephe olarak aynı tipte olmasına karşın plan tipi olarak farklılık göstermiştir. Plan tiplerine göre bakıldığı zaman açık plan tipine sahip olan A4 senaryosundaki yapının maksimum HRR değerine 50. saniyede ulaşmasına karşı, B4 senaryosundaki yapının maksimum HRR değerine 16. saniyede ulaşmış olması oldukça kritik bir sonuç ortaya çıkarmıştır. Senaryoların belirlenmesi aşamasında havalandırma durumu göz ardı edildiği için A4 ve B4

simülasyonlarında açığa çıkan duman iki cephe arasında bulunan alanda hapsolüp bulunduğu hacmi doldurmuş ve daha sonrasında hareket edemez hale gelmiştir, bu nedenle bu senaryoda modeller simülasyon süresini tamamlayamayıp kendini sonlandırmıştır. Söz konusu kutu tipi cephelerde, değerlendirmeye dahil edilmek üzere havalandırma menfezleri tanımlanarak A4’ ve B4’ senaryoları oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar Tablo 8’de yer almaktadır. Havalandırma menfezleri dahil edilmiş kutu tipi cephe sisteminde, simülasyonun 100 saniye sonunu görebildiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında ise, A’ senaryo modelinde, halen HRR



Şekil 13. B4’ senaryosu sıcaklık/zaman ve HRR/zaman eğrisi (B4’ type scenario model temperature and HRR values by time)

Tablo 6. Oluşturulan senaryolardan elde edilen sayısal bulguların karşılaştırmalı tablosu
(The comparative table of quantitative findings of all scenario models)

Cephe Özellikleri		Cephe Tipi	HRR Değeri		Sıcaklık Değeri	
Model	Plan Tipi		Maksimum değer	Sn.	Maksimum değer	Sn.
A1	Açık plan	Cephe boyunca	820	55	75	63
A2	Açık plan	Şaft tipi	840	82	85	40
A3	Açık plan	Koridor tipi	880	35	80	90
A4	Açık plan	Kutu tipi	36000	49	102	50
A4'	Açık plan	Kutu tipi (menfezli)	851	93	108	80
B1	Bölme duvarlı plan	Cephe boyunca	957	91	127	47
B2	Bölme duvarlı plan	Şaft tipi	810	24	200	100
B3	Bölme duvarlı plan	Koridor tipi	845	18	160	45
B4	Bölme duvarlı plan	Kutu tipi	44000	16	95	16
B4'	Bölme duvarlı plan	Kutu tipi (menfezli)	574	41	163	96

Tablo 7. Belirlenen ortak saniyelerde elde edilen HRR ve sıcaklık değerleri
(Temperature and HRR values at specific seconds of time)

Model	HRR değerleri					Sıcaklık değerleri				
	10. Sn.	25. Sn.	50. Sn.	75. Sn.	100. Sn.	10. Sn.	25. Sn.	50. Sn.	75. Sn.	100. Sn.
A1	632	635	617	609	565	43.9	52.9	65.7	59.6	43.3
A2	632	731	664	718	654	53.2	58.5	68.3	71.6	62
A3	619	644	599	603	547	46.4	59.5	75.4	75.5	77.7
A4	656	693	18838			29.7	53.9	100.8		
B1	677	688	705	586	646	24.1	95.8	108.4	54.5	52.9
B2	610	649	643	681	337	38.1	126.7	124	138.7	206.2
B3	725	665	641	589	632	50.7	111.6	146.3	147	142.9
B4	651	44496 (16.sn)				32.6				

Tablo 8. A4, A4', B4 ve B4' senaryoları karşılaştırma tablosu
(Comparative table of A4, A4', B4 and B4' scenario models)

Cephe Özellikleri		Cephe Tipi	HRR Değeri		Sıcaklık Değeri	
Model	Plan Tipi		Maksimum değer	Sn.	Maksimum değer	Sn.
A4	Açık plan	Kutu tipi	36000	49	102	50
A4'	Açık plan	Kutu tipi (menfezli)	851	93	108	80
B4	Bölme duvarlı plan	Kutu tipi	44000	16	95	16
B4'	Bölme duvarlı plan	Kutu tipi (menfezli)	574	41	163	96

değeri, diğer tüm senaryolarla karşılaştırıldığında en yüksek değere ulaşmaktadır. B2 senaryo modelinde ise, HRR değeri diğer B senaryolarının altında kalmış ancak en yüksek değerine diğerleri ile karşılaştırıldığında en çabuk (41. sn.) eriştiği de gözlenmiştir. Bu senaryonun sıcaklık değeri açısından da en yüksek değerde olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar bir bütün olarak değerlendirildiğinde, bölme duvarlı plan tipine sahip yapılarda duman ve alevlerin hareket edememesi enerjinin sıkışmasına neden olmuştur. Simülasyonlara bakıldığı zaman, canlıların içinde bulunduğu alanı tahliye süresi ve canlıların soluduğu havadaki zehirli gazlara maruziyet süresi açısından bölme duvarlı plana sahip B tipi senaryoların kritik olabileceği gözlemlenmiştir. Bu faktörler baz alındığında açık plan tipine sahip yapılarda duman ve zehirli gazın tüm odaya yayılıyor olması, yangın anında içeride bulunan canlıların tahliye edilebilmesini sağlayacak sürenin mümkün olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 2 ve Tablo 4'te duman yayılımının cephe üzerindeki etkileri görülmektedir. Duman yayılımı, yangın anında içeride bulunan canlıların tahliyesinin sağlanabilmesi ile cephede gösterdiği hareket açısından da incelenmiştir. A tipi senaryolar cephede duman yayılımı bakımından incelendiği zaman A1 tipi senaryoda dumanın etki ettiği alanın diğer tiplere göre daha çok olduğu görülürken, A4 tipi senaryoda dumanın etki ettiği alanın daha küçük bir alan olduğu görülmüştür. A tipi senaryo modellerinin açık plana sahip olması, dumanın daha az yoğun şekilde tüm metrekareye yayıldığını göstermiştir. İçeride bulunan canlılar ve bunların tahliye edilmesi konusunda en avantajlı cephenin A1 olduğu, dezavantajlı cephenin ise A4 olduğu sonucu çıkarılmıştır. B tipi senaryolar, cephe içinde dumanın yayılımı bakımından incelendiğinde, B1 tipi senaryoda dumanın en geniş etki alanına sahip olduğu görülmektedir. B4 tipi senaryoda ise, kutu içine hapseden dumanın etki alanı en kısıtlıdır. Mekan içinde bulunan canlılar ve bunların tahliye edilmesi açısından duman yayılımının etkisi incelendiğinde ise, B tipi senaryo modellerinin bölme duvarlı plana sahip olması nedeniyle, dumanın tek bir odada yoğun etki gösterdiği, bu nedenle açık plan tipli A modellerine göre dezavantajlı olduğu belirlenmiştir.

Tüm senaryolar bir arada incelendiğinde, duman yayılımı ve diğer katlara dumanın erişimi açısından en riskli senaryonun B1 senaryosu olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni bölme duvarlı plan tipinden dolayı oda hacmini dolduran dumanın açık pencereden cepheye doğru hızla hareket etmesidir. Senaryolar canlıların tahliyesi bakımından incelendiğinde ise, en riskli senaryo B4 senaryosu olarak ortaya çıkmaktadır. Hem bölme duvarlar çevrili küçük hacim, hem de kutu tipi cephe (havalandırma menfezleri olsa bile) nedeniyle, açığa çıkan dumanın bulunduğu hacmi doldurması ve artık hareket edemez hale gelmesi nedeniyle yangın anında içeride bulunan bir canlı varsa zehirli gazı yüksek oranda maruz kalacaktır, bu nedenle canlı sağlığı açısından en riskli cephe tipinin bu olduğu kanaatine varılmıştır.

5. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Yangın anında bina bütünlüğünün bozulmaması ve bina içerisinde bulunan canlıların güvenli bir şekilde tahliyesinin sağlanabilmesi için tasarımcıların bina tasarımı sürecinde yapının biçimi, malzeme seçimi ve birleşim detayları gibi noktaları göz önünde bulundurması gerektiği açıktır. Sadece tasarım aşamasında değil yapının yapım aşamasında da inşaat teknikleri ve malzeme birleşim detayları deneyimli bir ekibin kontrolünde uygulanmalıdır. Gelişen teknolojiyle birlikte binaların yapım aşamasından önce afetlere karşı önlemler alınabilmesi adına dünya çapında tasarım aşamasından itibaren simülasyon programlarından ve model prototiplerinden yararlanılmaktadır. Simülasyonlar sonucunda afetler anında binanın göstereceği performansın görülmesinin yanı sıra, yapının kritik noktaları ve dikkat edilmesi gereken yerleri de belirlenebilmektedir.

Bu simülasyonlar ve prototipler sayesinde afetler yaşanmadan önce birtakım önlemler alınabilmekte ve felaketlerin önüne geçilmektedir.

Yangın yayılımında en önemli bileşenlerden biri olan cepheler, literatürde pek çok çalışmaya konu olmuş ve performansları çeşitli yöntemler aracılığı ile değerlendirmeye alınmıştır. Cephe sistemlerinin yangın ile bağlantılı analizlerinde çoğunlukla, cephe sistem ve malzemesi, bileşen detayları gibi teknik özelliklerinin incelenmiş olduğu görülmektedir. Bu çalışma ile, malzeme ve bileşenlerin detayda gösterecekleri bireysel performans değil, mekânsal tasarım ile farklı cephe tiplerinin bir arada göstereceği performansın bir değerlendirmesi ve senaryolar bağlamında karşılaştırması yapılmıştır.

Bu makalede üzerinde çalışılan tüm senaryolara ait sonuçlar, tasarım yaklaşımı açısından temelde iki yönden değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Bunlardan ilki, tüm sonuçlara göre, herhangi bir katta çıkan yangının, açık pencere aracılığı ile cepheye ne oranda yayıldığı tespit edilmesidir. Böylece, söz konusu cephe tiplerinin yangının diğer katlara cephe aracılığı ile erişimine neden olma ihtimalleri görülebilmektedir. Bu açıdan bakıldığında, B1 senaryosunun, tüm senaryolar içinde, cephe yayılımına en fazla izin veren cephe tipi olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, B1 senaryosu yangınında duman, hem mekân hacminin küçük olması nedeniyle daha fazla ve hızlı şekilde cepheye ulaşmaktadır, hem de cephe boyunca havalandırılan tip nedeniyle cepheden tüm katlara ve mekanlara erişim mümkün olmaktadır.

İkinci tip değerlendirme ise, canlıların zarar görmeden mekândan tahliyesine izin verecek sürenin ve sıcaklığın sağlanıp sağlanmadığının anlaşılması üzerinedir. Bu açıdan bakıldığında, en sorunlu cephe, yine B senaryosunda kutu tipi cephe sistemi uygulanmış olan B4 senaryosudur. Hem dumanın hapsedilmesi hem de sıcaklığın çok yüksek derecelere ulaşması, canlıların tahliyesini zorlaştıracak koşulların oluşmasına neden olmaktadır. Bu senaryoda, kutu tipi cephenin havalandırma menfezlerine sahip olması, hesaplamaların tamamlanabilmesine imkân vermiş olsa da yine de sıcaklık ve duman yoğunluğu açısından olumsuz koşul oluşturmayı sürdürmektedir.

Bu çalışma kapsamında simülasyona dayalı senaryo modelleri oluşturulurken kullanılan malzemelerin özellikleri, birleşim detayları, rüzgâr hızı ve yönü gibi çevresel faktörler göz ardı edilmiştir. İleride yapılacak olan çalışmalarda malzeme özelliklerinin detaylı olarak simülasyon programına işlenmesi ile elde edilecek verilerin bu açıdan değerlendirilebilmesine de imkân sağlayacaktır. Orta kat yüksekliğine sahip yapılar baz alınarak yapılan bu çalışma düşük katlı ve yüksek katlı yapılar üzerinde incelemenin dahil edilmesiyle birlikte yangın anında ortaya çıkan alev, duman, sıcaklık ve gazlar üzerinde yüksekliğin etkisinin ortaya konulabileceği düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu araştırma, Eylem Ezgi Aşlar 'ın, Çankaya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Ana Bilim Dalı'nda, Doç. Dr. Gülsu Ulukavak Harputlugil danışmanlığında yürüttüğü Çift Katmanlı Cephelerin Yangın Güvenliği Açısından İncelenmesi başlıklı yüksek lisans tezine dayanmaktadır.

Kaynaklar (References)

1. Başdemir H., Demirel F., İşeri İ., Developing a model for analyse fire safety in buildings according to national fire precaution regulation, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 27 (4), 695-706, 2012.
2. Altındaş S., Fire safety in health care facilities in Turkey and a proposal for fire safety policy, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (2), 913-924, 2021.

3. Wade, C.A., Clampett, J.C, Fire performance of exterior claddings. Fire Code Reform Centre. Sydney, Australia. Project Report FCRC PR 00-03, 2000.
4. Uygunoğlu, T., Güneş, İ., Çalış, M. ve Özgüven, S., EPS ve XPS malzemeleriyle yapılan mantolamaların yangın sırasındaki davranışlarının araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 18 (1), 2015.
5. Lamont, S., Ingolfsson, A., High rise buildings with combustible exterior wall assemblies: Fire risk assessment tool, NFPA, USA, 257224-00, 2018.
6. Kılıç, A., Cephe Kaplamaları ve Cephe Yangın Güvenliği. Yangın ve Güvenlik. Sayı: 152, 2012.
7. Huang, X., Zhaopeng, N., Lei, P. and Ping, Z., Experimental study of fire barriers preventing vertical fire spread in ETISs. 1st International Seminar for Fire Safety of Facades, Paris, 2013.
8. Güleşen, E., Yılmaz, M., Yangın Emniyeti ve Cephe Tasarımı. 9. Ulusal Çatı & Cephe Konferansı, İstanbul, 2018.
9. Ding, W., Hasemi, Y., Yamada, T., Smoke control using a double-skin facade. Fire Safety Science-Proceedings of the Eighth International Symposium, Japan, 2005.
10. Chow, C. L., A Qualitative Investigation On Double-Skin Façade Fires. 1st International Seminar for Fire Safety of Facades, Paris, 2013.
11. Babilolyaei, Y. Çift Cidarlı Cephelerde Farklı Havalandırma Koşullarında Duman Hareketlerinin Sayısal Yöntemle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
12. Wang, R., He, S., Yue, H., Numerical Study of Smoke Spread upon Shaft-box Type Double Skin Façade. 8th International Conference on Fire Science and Fire Protection Engineering, China, 2017.
13. Yaman, M. Cephe Yangın Güvenlik Önlemleri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
14. Karakoyun, Ç. E. Kapalı Hacim Yangınlarında Güneş Kırıcı Elemanların Düşey Yangın Yayılımına Etkisinin Sayısal Modelleme Yöntemi ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
15. Giraldo, M., Lacasta, A., Avellaneda, J., ve Burgos, C. Computer Simulation Study on Fire Behaviour In The Ventilated Cavity of Ventilated Façade Systems. MATEC Web of Conferences 9, 2013.
16. Yakovchuk, R., Kuzyk, A., Skorobagatko, T., Yemelyanenko, S., Borys, O., Dobrostan, O. Computer Simulation of Fire Test Parameters Façade Heat Insulating System for Fire Spread in Fire Dynamics Simulator (FDS). Series of Geology and Technical Sciences. 4, 35-44, 2020.
17. Dréan, V., Girardin, B., Guillaume, E., & Fateh, T., Numerical simulation of the fire behaviour of facade equipped with aluminium composite material-based claddings-Model validation at large scale. *Fire and Materials*, 43 (8), 981-1002, 2019.
18. Civelek, E. Cephe Geometrisinin Yangın Güvenliği Üzerindeki Etkisinin Performansa Dayalı Analiz Yöntemleri ile Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
19. Miao, L; 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. XI, Yanhong, et al. Temperature variation inside a corridor-like enclosure under limited ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 126, 104539, 2022.
21. Abdoh D.A., Kodur V.K.R., 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.
22. SU, Ling-chu, et al. Smart performance-based design for building fire safety: Prediction of smoke motion via AI. *Journal of Building Engineering*, 43, 102529, 2021.
23. Siddiqui, Asim A., et al. Building Information Modelling for performance-based Fire Safety Engineering analysis—A strategy for data sharing., *Journal of Building Engineering* 42, 102794, 2021.
24. Baalisampang, Til, et al. Optimisation of smoke extraction system in fire scenarios using CFD modelling., *Process Safety and Environmental Protection* 149, 508-517, 2021.
25. Çetin S., Beyhan F., A model based on performance analysis on the relationship of fire development -smoke spread, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (2) 825-842, 2022.
26. Alakavuk, E., Sıcak İklim Bölgelerinde Çift Kabuk Cam Cephe Sistemlerinin Tasarımı İçin Kullanılabilecek Bir Yaklaşım, Doktora Tezi, İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
27. Vaglio, J. Aerophysics of Double Skin Facades Simulation Based Determination of Pressure Coefficients for Multi Story Double Skin Facades, Doktora Tezi, Southern California University, 2015.
28. ÜNAL, M. Çift Kabuk Cephelerin Sistematik Analizi ve Uygulama Örneklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
29. ElGhazi, Y. S. Building Skins in the Age of Information Technology, Master Thesis, Cairo University, 2009.
30. PYROSIM, <https://www.thunderheadeng.com/pyrosim/>, (son erişim: 03.08.2022)
31. FDS, Fire Dynamics Simulator, <https://www.nist.gov/services-resources/software/fds-and-smokeview> son erişim: 03.08.2022.
32. NIST, <https://www.nist.gov/el/fire-research-division-73300>.
33. McGrattan, K. (ed.), Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide: Validation, 2006, <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication1018.pdf>
34. ISO 834 – Fire Resistance Tests – Elements of Building Construction, International Standards Organisation, <https://www.iso.org/standard/2576.html> (son erişim: 03.08.2022)
35. Bwalya, A., Loughheed, G., Kashef, A. et al. Survey Results of Combustible Contents and Floor Areas in Canadian Multi-Family Dwellings. *Fire Technol* 47, 1121–1140, 2011.
36. Liu J., Chow W.K., Determination of fire load and heat release rate for high-rise residential buildings., *Procedia Engineering* 84, 491-497, 2014.

