



Havalandırılmalı Giydirme Cephe (Rainscreen) Sistemlerinde Yangın Yayılımının Deneysel Çalışmalar ve Gerçek Olaylar Üzerinden Karşılaştırılması

Comparison of Fire Spread in Ventilated Curtain Wall Systems Over Experimental Studies and Real Incidents

Meltem Çalışkan¹ , Ezgi Korkmaz² ,

öz

Yangın yapıyı ve kullanıcıları kısa sürede etkisi altına alıp can kayıpları, yaralanmalar ve büyük maddi kayıplar verebilen bir afettir. Özellikle yüksek katlı ve giydirme cephe yapılarında yangının cephe boyunca kısa sürede hızla yayılması yapı ve kullanıcılar açısından tehlike oluşturmaktadır. Son yıllarda, Grenfell Tower (2017) ve Lacrosse (2014) gibi büyük yangınlar başta olmak üzere cephe yangınlarının çoğunun havalandırılmalı giydirme cephelerde (Rainscreen) meydana gelmesi, binaların cephe tasarımında yangın güvenliği açısından eksiklikler olduğunu ortaya koymakta ve daha fazla çalışmanın gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu nedenle çalışmada, pasif yangın güvenlik önlemleri kapsamında havalandırılmalı giydirme cephelerde meydana gelmiş olan yangın olayları ve akademik çalışmalar kapsamında yapılan yangın yayılım deneyleri incelenip değerlendirilmiş, laboratuvarlarda çevresel etkenlerin birçoğunun bulunmadığı yalıtımlı ortamlarda gerçekleştirilen deneylerin sonuçları ile gerçek zamanlı yangınların yayılım dinamiğinin karşılaştırılması ve deneyler ile gerçek zamanlı olayların ne derece örtüştüğünün ortaya koyulması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, gerçek zamanlı yangınlar ve deneyler yangın raporları ve akademik çalışmalar aracılığı ile incelenmiş, elde edilen veriler ile havalandırılmalı giydirme cephelerde yangın yayılım dinamiği analiz edilmiştir. Yapılan incelemelerde 2010 ve 2021 yılları arasında incelenen 41 adet cephe yangınından 21 tanesinin havalandırılmalı giydirme cephelerde meydana geldiği, 11 tanesinin ise kayıtlı bir cephe bilgisi olmadığı görülmüştür. Bu durum tüm cephelerin % 51'ini temsil ederken, bilinen cephelerin % 70'i gibi büyük bir oranı temsil etmektedir. Bu doğrultuda çalışma, 2010 ve 2021 yılları arasında meydana gelen havalandırılmalı giydirme cephelerdeki yangın olayları ile sınırlandırılmıştır. Çalışma, yangın dinamiğinin havalandırılmalı giydirme cephelerde oluşturduğu etkiler hakkında deneysel verilerin araştırmacılara, tasarımcılara, üreticilere ve uygulayıcılara bilgi vermek ve tasarım sırasında alabilecekleri önlemleri vurgulamak açısından önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Havalandırılmalı giydirme cephe, Cephe yangını, Hava boşluğu, Cephe malzemesi, Yangın yayılımı

ABSTRACT

Fire is a disaster that can affect the building and the users in a short time and cause loss of life, injuries and lots of financial losses. Especially in high-rise building with curtain walls, the rapid spread of fire along the facade in a short time poses a danger to the building and users. In recent years, the fact that most of the facade fires, especially major fires such as Grenfell Tower (2017) and Lacrosse (2014), occurred on ventilated curtain walls (Rainscreen), reveals that there are deficiencies in the facade design of building in terms of fire safety and emphasizes the need for more studies. In the study, fire incident occurring in ventilated curtain walls and fire spread tests carried out in academic studies were examined and evaluated within the scope of passive fire safety measures. In this direction, it is proposed to reveal the extent to which the tests and real-time fire incident overlap by comparing the results of the tests performed in the laboratory (in the

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, meltem_alts@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5038-5477>

² **Corresponding Author:** Yıldız Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, korkmaze@yildiz.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5164-6205>



absence of many environmental factors) with the fire spread dynamics of real-time fires. Within the scope of the study, real-time fires and testes were examined through fire reports and academic studies, and laboratory testes fire spread dynamics in ventilated curtain walls were analysed with the data obtained. In the examination made, it was seen that 21 of the 41 facade fires examined between 2010 and 2021 occurred in ventilated curtain walls, and 11 of them did not have any registered facade information. While this represents % 51 of all facades, it represents as much as % 70 of all known facades. In this direction, the study has been limited to fire incidents in ventilated curtain walls between 2010 and 2021 for the solution of the problem. The study is important in terms of informing researchers, designers, manufacturers and practitioners about the effects of fire dynamics on ventilated curtain walls and emphasizing the precaution that can take during design.

Keywords: *Ventilated Curtain Wall, Facade Fire, Air Gap, Facade Materials, Fire Spread*

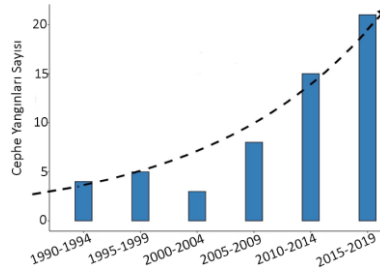
GİRİŞ:

Cephe, bir yapının fiziksel çevre ile ilişki kurduğu, binaları dış etkenlerden koruyan bir kabuk sistemidir. Yapısal ve işlevsel ihtiyaçları karşılama yanı sıra estetik beklentileri de yerine getiren bir muhafaza görevi görmektedir. Cephede kullanılacak malzemelerin seçilmesi ve cephenin biçimlenmesi; ısısal, işitsel ve görsel konfor açısından önem arz etmektedir [Sözen, 2001]. İnşaat sürecinin sanayileşmesi, binalarda kullanılan alışlagelmiş cephe sistemlerini değiştirerek mimari kriterlerin daha esnek bir şekilde gelişmesine olanak sağlamıştır. Sürdürülebilirlik kavramının ortaya çıkması ile de bina kapsamında enerji verimliliğine ilgi artmıştır [BRE Global Ltd., 2019]. Performans gereksinimlerinin değişimi, binalarda daha fazla enerji verimliliğinin gerekli olduğu bir senaryoya yol açmıştır. Bu gereklilik, cephelerin yalıtım ihtiyaçlarının iyileştirilmesini de beraberinde getirmektedir. Mevcut olan veya yeni inşa edilen binaların enerji tüketiminin iyileştirilmesi, cephede içeriye veya dışarıya yalıtım amaçlı malzeme eklemekten ve sistem detaylarında değişiklik yapmaktan geçmektedir. Bu da enerji verimliliğinden ve sürdürülebilirlik kavramlarından kaynaklı malzeme çeşitliliğini arttırmış ve cepheler katmanlaşmaya başlamıştır. 21. Yüzyıl'ın başından günümüze kadar enerji verimliliğine olan katkısı ile yaygın bir şekilde kullanılan havalandırılmalı giydirme cephe (Rainscreen) sistemi bu katmanlaşmaya örnek olarak gösterilebilir.

Havalandırılmalı giydirme cephe, içerdiği hava boşluğu sayesinde yağışmayı, nemi önleyen, cephenin ömrünü uzatan, termal ve akustik yalıtımı iyileştiren, enerji verimliliğini arttıran bir kaplama sistemidir. Havalandırılmalı giydirme cephe sistemi bir ana strüktür duvar, bir yalıtım tabakası ve bir destek yapısı kullanılarak binaya sabitlenen bir dış kaplama paneli ile oluşturulur [URL-1, 2022]. Bu bileşenler sayesinde; bina strüktürü, dış duvar ile kaplama paneli arasında hava boşluğu oluşturmakta ve böylece havalandırma sağlanmaktadır [URL-2]. Bu boşlukta oluşan doğal konveksiyon sistemi (baca etkisi), yapıda ısı yalıtımı sağlarken, yapıyı su ve neme karşı etkin bir şekilde korumuş olur [Tabadkani vd., 2015]. Aynı zamanda bu hava boşluğu, cepheye yalıtım malzemesi eklenmesine de olanak tanımaktadır. Fakat bu oluşan katmanlaşma ile baca etkisi durumu, cephe ve yangın yayılımı arasındaki ilişkiyi yeniden değerlendirmeyi gerektirmektedir.

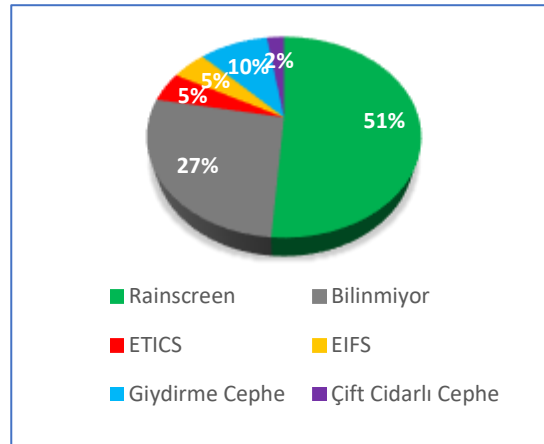
Yangın esnasında alev, cephe sisteminde korumasız boşluklu alanlardan binaya yayılım eğilimindedir. Bu durum, yangının havalandırılmalı giydirme cephede bulunan açıklıklar aracılığıyla katlar arasında düşey/yatay bir şekilde kolaylıkla ilerlemesine ve ikincil yangınların oluşmasına sebebiyet vermektedir.

Cephe yangınları, 30 yılda yedi kat artarak yılda ortalama 4,8 adet cephe yangını oranına ulaşmıştır [Bonner vd., 2020; URL-3, 2022]. Şekil 1'de Bonner ve Rein'in 2020'de yapmış olduğu bir çalışmada 1990 yılından itibaren her beş yılda bir tespit edilen cephe yangın sayıları verilmiştir.



Şekil 1. 1990'dan 2019'a kadar her beş yılda bir meydana gelen toplam cephe yangın grafiği (Bonner vd., 2019)

Bu grafikten görüldüğü üzere, cephe yangınları 2010 yılından itibaren hızlı bir ivme ile artış göstermiş ve bu artışın sebeplerinin araştırılması gerektiği belirtilmiştir. Bu nedenle çalışma kapsamında 2010-2021 yılları arasında meydana gelen cephe yangınları analiz edilmiş ve cephe sistemlerine göre sınıflandırılmıştır. Yapılan incelemelerde; 2010 ve 2021 yılları arasında meydana gelen 41 adet cephe yangınından 21 tanesinin havalandırılmalı giydirme cephelerde meydana geldiği, 11 tanesinde ise kayıtlı bir cephe bilgisi olmadığı görülmüştür. Bu yapılardaki yangın oranlarına bakıldığında ise havalandırılmalı giydirme cepheye sahip yapılarda çıkan yangınların incelenen tüm cephelerin % 51'ini, cephe sistemleri bilinen yapıların ise % 70'i gibi büyük bir oranı oluşturduğu görülmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. 2010-2021 yılları arasında meydana gelen cephe yangınlarında yapılan cephe tipi yüzdeleri oranlar [Çalışkan, M.]

2014 yılında meydana gelen Lacrosse yangını havalandırılmalı giydirmeye cephe sistemi üzerinden ilerlemiş ve 5,7 milyon dolar zarara yol açmıştır [URL-4, 2022]. 2017 yılında meydana gelen Grenfell Tower yangını ise 71 kişinin ölümüne neden olurken, 200 milyon pound maddi kayıp ile sonuçlanmıştır [URL-5, 2022]. Uygulamanın bilinçsizce yapılmasının, can ve mal kayıplarını da beraberinde getirdiği görülmektedir. Cephe yangınlarının büyük çoğunluğunun havalandırılmalı giydirmeye cephelerde meydana gelmesi ve tehlikeli sonuçlar doğurması, yangının cephe ile etkileşimini tasarlama yöntemlerindeki eksiklikleri ortaya çıkarmakta ve daha fazla çalışmanın gerekliliğini vurgulamaktadır.

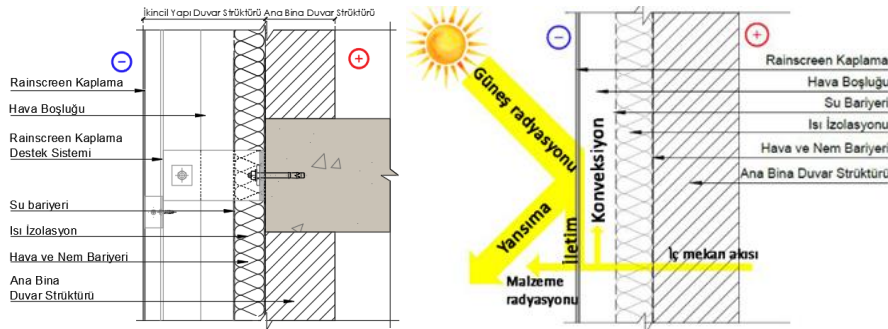
Havalandırılmalı giydirmeye cephe sistemlerinde kullanılan malzemelerin, hava boşluğunun ve sistem kurgusunun yangın yayılımına katkısını araştırmak ve daha iyi anlamak gelecekte oluşabilecek yangınları önlemek veya sınırlandırabilmek açısından önem taşımaktadır. Yangın oluşumu tamamen önlenememektedir fakat alınan aktif ve pasif yangın güvenlik önlemleri ile etki alanı önemli oranda daraltılabilmektedir [Korkmaz, 2016]. Bu bağlamda, havalandırılmalı giydirmeye cephe sistemi yangınlarını deneysel yöntemlerle araştıran ve inceleyen birçok akademik çalışma yapılmıştır.

Ancak literatürde bu deneyler ile meydana gelen yangınlardaki yangın dinamiğini karşılaştıran bir çalışma bulunmamaktadır. Bu amaçla, havalandırılmalı giydirme cephe sistemlerinin yangın sırasında nasıl bir davranış gösterdiğinin, hangi unsurların cephe boyunca yangının ilerlemesine ve yayılmasına etki ettiğinin anlaşılması için literatür taranarak akademik deneysel çalışmalar incelenmiştir. Elde edinilen bilgiler ışığında 2010-2021 yılları arasında meydana gelen yangınlardan yangın yayılımına etki eden farklı unsurları değerlendirebilmek amacıyla; yangın kesici bariyeri olan ve olmayan, yangın yayılım süresi ve yalıtım malzemesi farklı beş büyük yangın olayı çalışma kapsamında seçilmiş ve analiz edilmiştir.

Çalışmada, havalandırılmalı giydirme cephelerde meydana gelmiş olan yangın olayları ve akademik çalışmalar kapsamında yapılan yangın yayılım deneyleri pasif yangın güvenlik önlemleri doğrultusunda incelenip değerlendirilmiştir. Deneyler ile elde edilen sonuçlar gerçek zamanlı yangınların sonuçları ile karşılaştırılarak laboratuvar ortamında oluşturulan yapma çevredeki yangın davranışı ile birçok farklı çevresel etkene sahip (yapının bulunduğu alanın çevresindeki yapılar, yeşillik alanlar, bölgenin iklimi, yangın esnasındaki hava durumu, rüzgâr yönü, vb.) yapılarda çıkan yangınların ne derece örtüştüğünün ortaya koyulması amaçlanmıştır. Laboratuvar ortamında yapılan yangın deneyleri sonuçlarının pasif yangın güvenlik önlemlerinin alınmasında veri olarak kullanıldığı göz önüne alındığında, gerçek zamanlı yangınlarda çevresel etkenlerden dolayı oluşabilecek farklılıkların gelecek çalışmalara yansıtılmasının, havalandırılmalı giydirme cephelerde ve diğer sistemlerde olasılıkların değerlendirilerek doğru önlemlerin alınmasına yardımcı olacağı düşünülmektedir. Bu bağlamda, havalandırılmalı giydirme cephelerde çıkabilecek yangınların olası sonuçlarını ve yaşanabilecek can ve mal kayıplarını önlemek amacıyla; yangın dinamiğinin anlaşılması, araştırma, tasarlama, üretme ve uygulama aşamalarında doğru kararların alınması önem taşımaktadır.

1. Havalandırılmalı Giydirme Cephelerde Yangın Yayılımı

Havalandırılmalı giydirme cephe sistemi, yapıyı dış hava koşullarına karşı korumaya yönelik bir tasarım yaklaşımı benimsemekte, sürdürülebilir ve enerji etkin bir bina tasarımı sunmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Havalandırılmalı giydirme cephe sistemi kesiti ve güneş radyasyon şeması [URL-6 ,2022'den uyarlanmıştır]

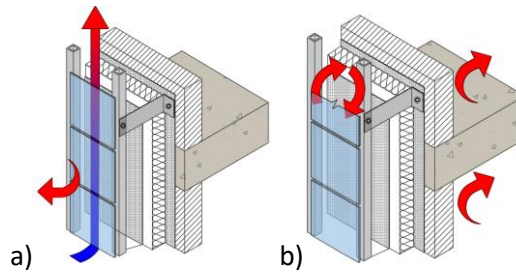
Bu tasarım yaklaşımı iki kademededen oluşmaktadır [Garden, 1963]. İlk kademedede; cephe kaplaması ısı kalkını görevi görerek güneş kaynaklı radyasyonunun önemli bir kısmını yansıtmakta ve böylece yaz aylarında havalandırılmalı giydirme cephe kaplamaları güneşin neden olduğu radyasyon etkisini önemli ölçüde azaltmaktadır (Şekil 3). Cephe kaplaması olarak metal kompozitler, yüksek basınçlı laminantlar, ahşap ürünler, metal levhalar, seramik karolar ve çimento levha dahil olmak üzere çeşitli malzemeler kullanılmaktadır [White vd., 2013].

İkinci kademedede ise, cephe kaplamasından itibaren hava/nem bariyeri, su bariyeri, ısı izolasyonu ve ana bina duvarı tasarlanmaktadır (Şekil 3) [Metal Construction Association, 2014].

Ana bina duvarı binanın birincil yapısı olup, havalandırmalı giydirme cephe sistemi cepheden gelen yükleri temele aktarmaktadır ve hava/nem bariyerine zemin oluşturmaktadır. Hava/nem bariyeri, ana bina strüktürüne nem ve suyun girmesini önleyen ve ana duvarın tüm yüzüne monte edilen katmandır [Wood, 2018]. Bu katmanda kendinden yapışkanlı membranlar, polimerik ve asfalt esaslı malzemeler içeren sıvı uygulanan membranlar, yalıtım sağlayan spreyci şekilde uygulanan polimerik köpükler, kontrplak, EPS, fenolik köpük plastik levhalar kullanılmaktadır [White vd., 2013]. Isı izolasyon katmanı, hava ve nem bariyerinin önüne monte edilmekte ve tüm ana bina duvarı boyunca devam ettirilmesi gerekmektedir. Bu şekilde ani sıcaklık değişimleri ve yoğuşma riskinin önüne geçilmiş olur [Kesik, 2016]. Yaygın olarak bu katmanda mineral bazlı izolasyon, fenol köpüğü, poliizosiyanürat (PIR), genleşmiş polistiren (EPS) veya poliüretan (PU) paneller kullanılır [White vd., 2013].

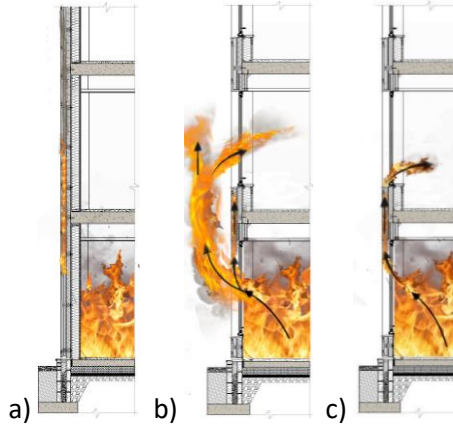
Su bariyeri ise kaplamanın arkasında bulunan ve su itici olan bir malzemedir. Kaplamadan geçen suyu yerçekimi kuvvetiyle kaplamadaki açıklıklardan cephenin dışına tahliye edecek şekilde tasarlanmaktadır. Su bariyeri olarak membran malzeme kullanılmaktadır [Kesik, 2016]. Havalandırmalı giydirme cephe, bu iki aşamalı sistemi birbirinden ayıran bir hava boşluğuna sahiptir. Hava boşluğu havalandırmalı giydirme cephe kaplaması ve su bariyeri arasındadır. Bu katman havalandırmalı giydirme cephe sisteminin etkin bir şekilde işleyebilmesi için gereken en temel bölümdür. Amerika Birleşik Devleti'nde hava boşluğunda oluşacak hava hareketine izin vermek için minimum 25 mm hava boşluğu zorunludur [Grauer, 2019]. Bu katman nemin drenajına izin verir ve akustik yalıtım sağlar. Hava boşluğunda oluşan hava hareketiyle ısı yalıtımını sağlar ve nemin buharlaşmasıyla boşluğun kurutulmasında önemli rol oynar. Boşluktaki hava hareketi binanın enerji performansını iyileştirir ve iç mekân konfor koşullarının sağlanmasına katkıda bulunur.

Dış kaplama paneli, gelen güneş radyasyonu ile ısıtılır. Böylelikle hava boşluğundaki hava ısınır. Isınan hava, termal kaldırma kuvveti (doğal konveksiyon) ile hava boşluğundan yukarı doğru çıkar. Cephenin alt ve üst tarafında bulunan havalandırma açıklıkları havanın boşluğa girmesine ve çıkmasına olanak tanır. Bu konveksiyon işlemi, yaz aylarında sıcak havanın yükselmesini sağlayarak boşluk içindeki havayı daha soğuk bir havayla yeniler (Şekil 4a). Kış aylarında boşluğun içindeki hava yukarı çıkacak kadar ısınmaz, bu da yalıtım katmanının bina içindeki ısıyı tutmasına yardımcı olur (Şekil 4b).



Şekil 4. a) Baca etkisinin yaz aylarındaki etkisi b) Baca etkisinin kış aylarındaki etkisi [Recatala, 2017'den uyarlanmıştır]

Hava boşluğunda oluşan bu sirkülasyona baca etkisi denmektedir [Recatala, 2017]. Bu etki nedeniyle havalandırmalı giydirme cephe sistemine sahip bir binanın cephesinde yangın başlaması durumunda, hava boşluğu alevlerin üst katlara kadar hızlı bir şekilde ilerlemesine neden olmaktadır (Şekil 5) Yapısal duvar ile kaplama panelleri arasındaki dar boşluk, yanmanın kimyasal reaksiyonunu sürdürmekte, halihazırda mevcut bir atmosferik oksijen kaynağı ile daha hızlı bir hava akış hızına ve yangının daha hızlı ilerlemesine katkıda bulunmaktadır [Gozalo vd., 2018]. Böyle bir durumda, sıcak gazlar ve alevler cephenin içindeki hava boşluğuna girerek iç malzeme katmanlarını tutuşturmakta ve alevin yayılmasına yol açabilecek bir ısı akışına neden olmaktadır [Peng & Huang, 2013].



Şekil 5. Havalandırılmalı giydirme cephede yangın yayılım senaryoları a) boşluksuz cephe üzerinde yangın yayılımı b) boşluklu cephe üzerinde yangın yayılımı c) spandrel bölge üzerinde yangın yayılımı [Çalışkan, M.]

2. Havalandırılmalı Giydirme Cephe Yangın Deneyleri

Havalandırılmalı giydirme cephenin sahip olduğu hava boşluğu nedeniyle yangın esnasında oluşan baca etkisi yanma olayını ve alevlerin yayılımını hızlandırmakta ve kısa sürede binayı etkisi altına almaktadır. Bu nedenle araştırmacılar havalandırılmalı giydirme cephelerde enerji etkinliği düşürülmeden baca etkisinin ortadan kaldırılması ve yangın yayılımının sınırlandırılması amacıyla farklı sistem detaylarına sahip deney numuneleri oluşturarak çeşitli çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Bu çalışmalardan biri Ondrus ve Pettersson tarafından 1968'de İsveç Lund Teknoloji Enstitüsü Bina Yangın Güvenlik bölümünde yapılmıştır. Araştırmacılar 13 farklı malzeme ve detay konfigürasyonuna sahip havalandırılmalı giydirme cephe numunelerinde deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deney sonucunda, yapısal detaylandırmanın ve malzeme kombinasyonlarının sistemin yangınlık performansı üzerinde malzemenin tutuşabilirliğinden daha fazla etkiye sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır [Ondrus & Pettersson, 1968]. Çalışmada hava boşluğunun etkisinin önemli olduğu tespit edildikten sonra hava boşluğu genişliğinin yangın üzerindeki etkisi ile ilgili araştırmalara devam edilmiştir.

1984'te W. Taylor tarafından cephe sistemindeki hava boşluğunun etkisini saptamak amacıyla bir çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmada, farklı alev yayma derecelerine sahip köpük yalıtım malzemelerinin havalandırılmalı giydirme cephelerde kullanımının yangın yayılımı üzerindeki etkisini ölçmek ve hava boşluğu ile ilişkisini saptamak için çeşitli deneyler yapılmıştır. Deney düzeneklerinde kullanılan boşlukların genişlikleri 12,5, 15, 25 ve 40 mm olarak belirlenmiş ve bu şekilde beş adet deney düzeneği oluşturulmuştur (Tablo 1).

Tablo 1. W. Taylor deney analiz tablosu [Taylor vd., 1984]

Deney Düzeneği	Kaplama Malzemesi	Yalıtım	Hava Boşluğu Genişliği	İç Duvar Malzemesi	Yangın Bariyeri
1	Alçı levha	Poliüretan	12,5 mm	Kalsiyum silikat kaplama cam elyaf yalıtımlı panel	YOK
2		Poliüretan	15 mm		
3		Poliüretan	25 mm		
4		Polistiren	25 mm		
5		Poliüretan	40 mm		

Hava boşluğu 12,5 ve 15 mm olan deney numunelerinde yangın alev kaynağından 1-2 m yukarıya ulaşmış, 25 mm boşluk genişliğine sahip poliüretan yalıtım ile yapılan deneyde alevlerin 2 m yükseldiği ve yalıtımın kısmi olarak eridiği görülmüştür. 25 mm boşluk genişliğine sahip polistiren yalıtım ile yapılan deneyde ise tüm yalıtım erimiş ve boşluk genişliği büyümüştür.

40 mm boşluk genişliğine sahip ve poliüretan yalıtım kullanılan deneyde, 25 mm boşluk genişliğine sahip deneylere göre alevlerin boşlukta daha hızlı yayılıp tüm boşluğu sardığı gözlemlenmiştir.

Dar boşluklarda hava akışının kısıtlanması durumunda oksijen yenilenememiş ve dolayısıyla içerideki yalıtımın yanması için yeterli oksijen miktarına ulaşılamamıştır. Fakat hava boşluğu arttıkça bu durum tersine dönmüştür. Farklı genişlikte hava boşluğuna sahip numuneler ile yapılan bu deney, boşluktaki oksijen miktarının yangının yayılmasında önemli olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu araştırma sonucunda kritik hava boşluğu genişliğinin 25 mm olduğu belirtilmiştir [Taylor vd., 1984].

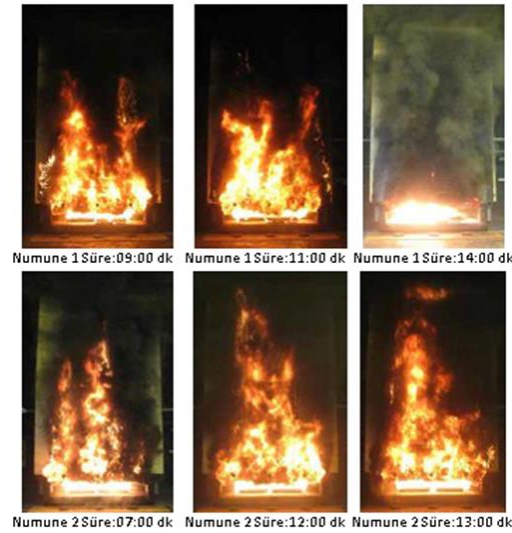
1984 yılında Alpert ve Ward yaptıkları çalışmada, yangının düşey yayılma hızının zamanla katlanarak arttığını ve ısının sabit olduğu her zaman aralığından sonra alev yüksekliğinin iki katına çıktığını fark etmiştir. Ayrıca, yangının iki katına çıkma süresini kısaltan karşıt duvarın varlığı nedeniyle yangının yukarı doğru yayılımının önemli ölçüde arttığı, açık yangınlara kıyasla sınırlı alanın ve hava sirkülasyonunun alevin yükselmesine neden olduğu sonucuna varılmıştır [Alpert & Ward, 1984].

Robert McNamee 2016 yılında yapmış olduğu çalışmada hava boşluğu olan ve olmayan cephelerde yanıcı cephe kaplamalarının alev yayılımına etkisindeki farkı ölçmüştür. Araştırma kapsamında oluşturduğu iki adet deney düzeneği ile alevin yüzeyde ve boşlukta nasıl yayıldığını araştırmıştır. Deneyde yangın yayılımı sıcaklık ölçümleri üzerinden değerlendirilmiştir. Yanma odasının üzerinde 750 mm, yanma odasının bir kat üzerinden 2100 mm'den ve yanma odasının iki kat üzerinden 4800 mm'den yapılan sıcaklık ölçümleri Tablo 2'de verilmiştir [McNamee vd., 2016].

Tablo 2. Deney düzenekleri malzeme ve yanma odasının 750 mm, 2100 mm ve 4800 mm üzerinden ölçülen maksimum sıcaklık değerleri tablosu [McNamee vd., 2016]

Deney Düzeneği	Kaplama Malzemesi	Hava Boşluğu Genişliği	Yalıtım	Yangın Bariyeri	Ölçülen Maksimum Sıcaklık Değerleri					
					Yanma Odasının 750 mm üzeri	Ulaşılan Zaman (dk)	Yanma Odasının 2100mm Üzeri	Ulaşılan Zaman (dk)	Yanma Odasının 4800 mm Üzeri	Ulaşılan Zaman (dk)
1	Kontrplak	YOK	YOK	YOK	Fark yok	8dk	650°C	8 dk	200-250°C	8 dk
2	Kontrplak	20 mm	Mineral Yün	YOK	Fark yok	8 dk	750°C	13 dk	600°C	15 dk

Sıcaklık ölçümlerinde yanma odasının 750 mm üzerinden yapılan ölçümlerde iki cephe arasında fark görülmemiştir. Yanma odasının bir kat üstünde 2100 mm'den yapılan ölçümlerde boşluksuz cephe için sıcaklık maksimum 650°C'ye 8 dakika sonra çıkmış ve sonrasında azalmıştır fakat boşluklu cephede sıcaklık artmaya devam etmiştir ve 13 dakika sonra maksimum sıcaklık 750°C'ye ulaşmıştır. Deney düzeneklerinin ısı yayma hızı incelendiğinde ise, deney başlangıcından 10 dakika sonra, değerler tekrar artmaya ve boşluksuz cephe ile havalandırma boşluğu olan cephe arasındaki fark açılmaya başlamıştır. Boşluklu cephenin ısı yayma hızı en fazla değerine deney başladıktan 15 dakika sonra ulaşmıştır. Yanıcı cephe kaplaması sıcaklığı arttırmış ancak yanıcı kaplamanın arkasında bulunan havalandırma boşluğunun cephedeki ısıyı daha fazla arttırdığı fark edilmiştir. Deney sırasındaki gözlemsel ölçümlerde alevin, ilk kattaki pencerenin alt kenarına boşluksuz olan cephede dokuz dakikada ulaştığı, boşluklu cephede ise yedi dakikada ulaştığı görülmüştür [McNamee vd., 2016] (Şekil 6).



Şekil 6. Deney sırasında çekilen fotoğraflar (Numune 1: hava boşluksuz cephe, Numune 2: hava boşluklu cephe) [McNamee vd., 2016]

Bu çalışma ile cephede hava boşluğu varsa yanıcı kaplamanın her iki tarafının da yanabileceği ve baca etkisi olabileceği sonucu elde edilmiştir. Bu durum, boşluğun yangın davranışı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermiş ve yapılan iki deneydeki bu farka yüzey kaplama malzemesi olan kontrplağın katkısının olmadığı belirtilmiştir [McNamee vd., 2016].

Livkiss ve diğerleri 2018’de yanıcı olmayan iki levha ve bu levhaların arasında bulunan hava boşluğunun genişlik ölçüsünün farklılaştırılması üzerinden bir çalışma yapmıştır (Tablo 3).

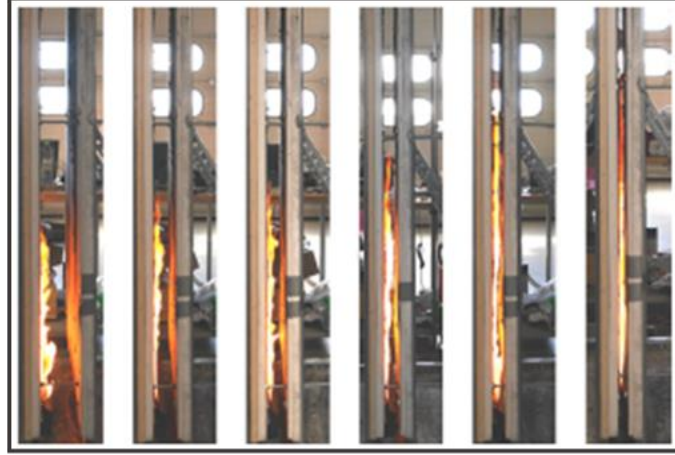
Çalışma, boşluk genişliğinin başka bir etmen (yalıtım, yanıcı kaplama) olmadan alev yüksekliğine etkisini ölçmek amacıyla gerçekleştirilmiştir [Livkiss vd., 2018].

Tablo 3. Deney düzeneği malzeme tablosu [Livkiss vd., 2018]

Deney Düzeneği	Kaplama Malzemesi	Deney Düzeneklerine Verilen Alev Gücü	Hava Boşluğu Genişliği	Yalıtım	Yangın Bariyeri
1	Yanmaz Plaka	16,5	100mm, 60mm, 50mm, 40mm, 30mm, 20mm, tek duvar	YOK	YOK
2		24,8			
3		32,3			
4		40,4			

Çalışmada değişkenler deney düzeneğine uygulanan farklı şiddetteki alev gücü ve farklı boşluk genişliklerinden oluşmaktadır. Hava boşlukları, 100 mm, 60 mm, 50 mm, 40 mm, 30 mm, 20 mm ve tek duvar olarak farklı konfigürasyonlarda denenmiştir. Bu deney genişliklerinin her bir kombinasyonu için dört farklı brülör gücü kullanılmıştır. Hava boşluğu genişliği 40 mm ve daha geniş olan, brülörün birim alan başına ısı yayma oranının (Q') düşük olduğu bir senaryoda alevler tüm hava boşluğu genişliğini dolduramamıştır. Tüm hava boşluğu genişliğinde ortalama Q' değeri en az olan deney düzeneği 1’de deney düzeneği 2, 3 ve 4’e göre daha düşük alev yüksekliği tespit edilmiştir. Bu çalışmalar, düşey hava boşluğu genişliğinin, yanma sırasındaki alev özelliklerinde ve boşluk içindeki yüzeylerin maruz kaldığı ısıyı belirlemede kritik rol oynadığını göstermiştir. Duvara gelen ısı akısı ölçümleri hava boşluğu genişliği azaldıkça tüm duvar yüksekliği boyunca yapılan ölçümlerde daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi ise hava boşluğu genişliği azaldıkça duman ve alevin yatay yayılımının azalarak düşey yayılıma daha çok yönelmesi olarak açıklanmıştır. Aynı zamanda bu koşulda alevler tüm hava boşluğu genişliğini doldurmuştur. Hava boşluğu genişliği azaldığında, deney düzeneğinin tüm yüksekliği boyunca gelen ısı akılarının arttığı gözlemlenmiştir.

Fakat, boşluklu bir cephenin kaplama yüzeyinin boşluksuz bir cepheye göre yangın esnasında daha şiddetli bir ısıya maruz kalacağı ön görülmüştür. Hava boşluklu cephe sisteminin, hava boşluksuz cephe sistemine göre yangın hızının 2,2 kat fazla olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7) [Livkiss vd., 2018].



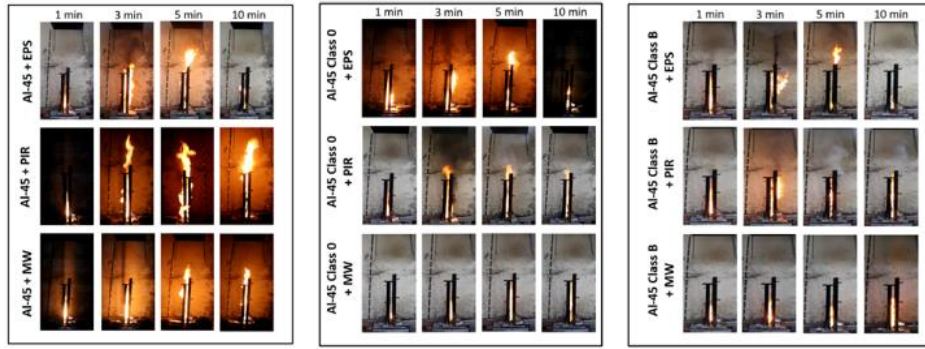
Şekil 7. Deney serisi II'nin havalandırılabilir giydirme cephe sisteminde aynı dakikada sırasıyla 100mm, 60mm, 50mm, 40mm, 30mm, 20mm hava boşluklarında yangın dinamiği [Livkiss vd., 2018]

Sharma ve Mishra'da 2021 yılında, Livkiss gibi farklı hava boşluk genişliğine sahip çeşitli cephe kombinasyonları ile bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada Livkiss'in çalışmasına ek olarak farklı yanıcılık seviyelerine sahip alüminyum cephe kaplamaları ve farklı yalıtım malzemelerinin hava boşluklu ve hava boşluksuz kombinasyonları oluşturulmuş ve aradaki fark karşılaştırılmıştır (Tablo 4) [Sharma & Mishra, 2021].

Tablo 4 Deney düzeneği malzeme ve montaj tablosu [Sharma & Mishra, 2021]

Deney Düzeneği	Kaplama Malzemeleri	Çekirdek Yalıtımı	Yalıtım	Hava Boşluğu Genişliği	Yangın Bariyeri
1	AL-43	PE	EPS	13,25,50,75,100 mm	YOK
2	AL-43	PE	PIR	13,25,50,75,100 mm	
3	AL-43	PE	MW	13,25,50,75,100 mm	
4	AL-45	PE	EPS	50 mm	
5	AL-45	PE	PIR		
6	AL-45	PE	MW		
7	AL-45 Class 0	FR	EPS		
8	AL-45 Class 0	FR	PIR		
9	AL-45 Class 0	FR	MW		
10	AL-45-Class B	FR	EPS		
11	AL-45-Class B	FR	PIR		
12	AL-45-Class B	FR	MW		
13	AL-45	PE	-		
14	EPS	-	-		
14	PIR	-	-		
16	MW	-	-		

Bu kombinasyonlarda hava boşluğu genişliği 13 mm ile 100 mm arasında değiştirilmiş ve hava boşluğunda yangın bariyeri kullanılmamıştır. Deneyde, çekirdek kalınlığı aynı tutularak, alüminyum kalınlığı farklı olan iki çeşit alüminyum kompozit kaplama (AL-43, AL-45) malzemesi kullanılmıştır. AL-45'in alüminyum kalınlığı 0.5 mm iken AL-43'ün alüminyum kalınlığı 0.25 mm dir. Kompozit kaplama malzemelerinde FR ve PE olmak üzere iki farklı çekirdek malzemesi kullanılmıştır. Bu deneyler iki aşamadan oluşmuştur. İlk aşamadaki deney düzeneğinde AL kalınlığının etkisini anlamak amacıyla AL-45 ve AL-43 dış cephe kaplamasının farklı montaj kombinasyonları ile deney yapılmış ve hava boşluğu 50 mm ile sabit tutulmuştur (Şekil 8) [Sharma & Mishra, 2021].



Şekil 8. a) Al-45'in EPS, PIR ve Mineral Yün (MW) ile farklı zaman aralıklarındaki alev yayılımı, b) Al-45 Class 0'ın EPS, PIR ve Mineral Yün (MW) ile farklı zaman aralıklarındaki alev yayılımı, c) Al-45 Class B'nin EPS, PIR ve Mineral Yün (MW) ile farklı zaman aralıklarındaki alev yayılımı [Sharma & Mishra, 2021]

Bu aşamada aynı zamanda üç farklı yalıtım malzemesinin (EPS, PIR ve MW) kullanıldığı AL-45 kaplamaya sahip deney düzenekleri boşluklu ve boşluksuz olarak da test edilmiştir (Tablo 5).

Tablo 5. Hava boşluklu ve boşluksuz deney düzeneklerinde sıcaklık, ortalama alev yüksekliği, kütle yanma hızı ve ısı yayma oranı [Sharma & Mishra, 2021'den düzenlenmiştir]

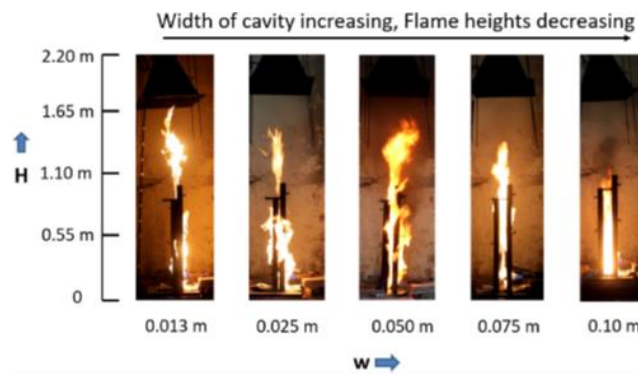
Deney Düzenegi	Kaplama Malzemesi	Hava Boşluğu	Ortalama Sıcaklık Değerleri (°C)	Ortalama Alev Yüksekliği (m)	Ortalama Kütle Yanma Hızları (kg/s)	Isı yayma oranı
4	Al-45-EPS	50 mm	555 °C	1,65	0,001 ile 0,002 arası	58 kW
5	Al-45-PIR	50 mm	840°C	2,3	0,002 ile 0,003 arasında	110 kW
6	Al-45-MW	50 mm	560°C	1,47	0,0005 ile 0,001 arasında	25 kW
13	Al-45 (sadece kaplama)	YOK	142°C	0,44	0,000 ile 0,001 arasında	6,3 kW
14	EPS (sadece yalıtım)	YOK	127°C	1,53	0,0005 ile 0,001 arasında	38 kW
15	PIR (sadece yalıtım)	YOK	65°C	0,24	0,000 ile 0,0005 arasında	4 kW
16	MW (sadece yalıtım)	YOK	0°C	0	0	0 kW

Hava boşluğuna sahip cephede boşluksuz cepheye göre kütle yanma hızı (kg/s), ısı yayma oranı (kW), ortalama sıcaklık (°C) ve ortalama alev yükseklik değerlerinin 3-6 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda en yüksek sıcaklık artışı ise yangın dayanımı olmayan malzemelerde gözlemlenmiştir. Al-45 + EPS kombinasyonunun Al-45 +PIR'a göre, kütle yanma hızı, sıcaklık ve alev yükseklikleri 1,5–2 kat daha az ölçülmüştür. Bunun nedeninin, EPS'nin 3–5 dakika içinde hızla yanarak Al-45 kaplamasının yanmasına olanak tanımaması olduğu belirtilmiştir. Ancak PIR, yavaş yavaş yanmaya devam etmiş ve daha geniş bir sıcaklık aralığında tam termal ayrışmaya uğramıştır. Bu da Al-45'in tamamen yanması için yeterli zamanı vermiştir. Bu aşamada hava boşluğunun sadece alevlerin yayılma hızını değil kaplama malzemesinin yanma hızını da etkilediği görülmüştür. AL- 45+ EPS ortalama alev hızı 4,44 mm/s, AL-45+PIR ortalama alev hızı 5,12 mm/s, AL-45+ MW ortalama alev hızı 2,29 mm/s ölçülmüştür (Tablo 6) [Sharma & Mishra, 2021].

Tablo 6. Hava boşluklu deney düzeneklerinde ortalama alev hızı, alev yüksekliği ve alevin boşluktan görülme süresi [Sharma & Mishra, 2021'den düzenlenmiştir]

Deney Düzenegi	Kaplama Malzemeleri	Çekirdek Yalıtımı	Yalıtım Malzemesi	Hava Boşluğu	Ortalama Alev Hızı	Alev Yükseklikleri	Ortalama Sıcaklık (1dk boyunca)	Alevin Boşluktan Görülme Süreleri
4	AL-45	PE	EPS	50 mm	4,44 mm/s	1,65m	555°C	2 dakikadan az
5	AL-45	PE	PIR	50 mm	5,12 mm/s	2,3m	840°C	2 dakikadan az
6	AL-45	PE	MW	50 mm	2,29 mm/s	1,47m	560°C	5. dakika
7	AL-45Class0	FR	EPS	50 mm	3,75 mm/s	1,49m	490°C	4. dakika
8	AL-45Class0	FR	PIR	50 mm	3,75 mm/s	1,41m	596°C	3. dakika
9	AL-45Class0	FR	MW	50 mm	2,22 mm/s	1,05m	457°C	Alev görülmedi
10	AL-Class B	FR	EPS	50 mm	3,75 mm/s	1,59m	473°C	3-4 dakika içinde
11	AL-Class B	FR	PIR	50 mm	2,50 mm/s	1,31m	611°C	Alev görülmedi
12	AL- Class B	FR	MW	50 mm	~ 0 mm/s	0,59m	417°C	Alev görülmedi

Deneyde kullanılan sürekli yalıtımlar için termal analizlere bakıldığında PIR için ayrışma sıcaklığı 280°C ile 590°C arasında, EPS için 258°C ile 390°C arasında olduğu tespit edilmiştir. MW ise yanmadan cephe üzerinde kalmıştır. PIR ve EPS yalıtıma sahip AL-45 Class O kaplamasıyla oluşturulan deney düzeneklerinin bir dakika boyunca hava boşluğunda bulunan ortalama sıcaklıkları ölçüldüğünde PIR yalıtıma sahip olan deney düzeneğinin sıcaklık değeri fazla çıkmıştır. Fakat bu iki deney düzeneğinin ortalama alev yayma hızları eşit çıkmıştır. AL-45 Class O kaplama malzemesi ve MW yalıtımı ile yapılan deney düzeneğinde ortalama alev hızı 2,22mm/s bulunmuştur. Bu değer MW ile aynı kaplamaya sahip olan PIR ve EPS yalıtımlı deney numunelerinin ortalama alev hızlarına göre neredeyse yarı yarıya farklı olduğu görülmüştür. Al-45 Class B, yangının yayılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmasa da EPS ve PIR ile montaj kombinasyonunda, yangıcı yalıtımın varlığı nedeniyle, daha yüksek alev yayılımı gerçekleşmiştir. Böylece, yalnızca tek tek ürünler yerine tüm sistemin test edilmesi gerekliliği vurgulanmıştır. Görsel olarak yapılan incelemelerde tüm deney kombinasyonları için deney düzeneğinin alev yayılma hızı 200- 300 mm'ye kadar aynı olmuştur. Hava boşluğu yüksekliğinin yarısından (400-500mm) sonra önemli farklar gözlemlenmiştir. İkinci aşamadaki deneyler, Al-43 kaplama ile yapılmış olup, boşluk genişliği 13 mm ile 100 mm arasında değiştirilmiştir (Şekil 9) [Sharma & Mishra, 2021].



Şekil 9. Al-43'ün farklı boşluk genişliğine sahip numunelerinde alev yüksekliklerinin karşılaştırılması [Sharma & Mishra, 2021]

Baca etkisi olan deneylerde, boşluk içerisinde ısı radyasyonu ile birleşen basınç farkı, aynı ürün kombinasyonu için baca etkisi olmayan deneylere göre 3-6 kat daha yüksek yanma hızı, alev yüksekliği ve sıcaklık ortaya çıkarmıştır. Bu çalışma, havalandırılmalı giydirme cephe sisteminde düşey yangın yayılımının artmasında baca etkisinin önemini göstermiştir. Ayrıca deneyde baca etkisiyle birlikte, ürünlerin damlama özelliklerinin yanma ve yayılma hızını daha da arttırarak ikincil yangınlara neden olduğu gözlemlenmiştir [Sharma & Mishra, 2021].

13 mm boşluğa sahip AL-43 serisinde deney sırasında alev yükseklikleri artmış ve yoğun damlama ile yoğun yanma gözlemlenmiştir. 25mm ve 50 mm hava boşluğuna sahip deney düzeneklerinde ise yapısal bozulmanın bir sonucu olarak levhalar düşmüştür. 75 mm ve 100 mm hava boşluğuna sahip numunelerde ise yapısal bozulma meydana gelmemiş ve alev yüksekliği diğer deneylere göre 1,2-1,8 kat arasında daha az ölçülmüştür. Bunun sebebi önemli miktarda havanın boşluğa girerek sıcaklığı düşürmesi ve böylece yanmayı azaltmasıdır [Sharma & Mishra, 2021].

Yapılan deneyler sonucunda cephe sisteminde hava boşluğu genişliğinin kritik noktasının yangın kapsamında 13-50mm olduğu belirlenmiştir.

Hava boşluğu genişliği arttıkça alev yüksekliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumla orantılı olarak ısı yayma oranı ve kütle yanma hızı da düşmüştür [Sharma & Mishra, 2021].

Guillaume ve diğerleri, 2018 yılında yapmış oldukları çalışmada malzeme ve hava boşluğunun ilişkisini ele almışlardır [Guillaume vd., 2018]. Deneyde yangın bariyeri kullanılmıştır. Hava boşluğu kaplama panelinden yalıtıma kadar 50 mm, yangın bariyerinden sonra ise 24 mm'dir ve boşluk genişlikleri her deney düzeneği için sabit tutulmuştur. Deneyde, kaplama panelinde (ACM) kullanılan çekirdek malzemesi ve yalıtım malzemesi değişkenlik göstermiştir. ACM panelleri, ACM-FR, ACM-PE, ACM-A2 olmak üzere üç farklı şekilde kullanılmıştır. Cephenin yalıtımında ise mineral yün, poliizosiyanurat (PIR) ve fenolik köpük (K15) kullanılmıştır. Çalışmada dokuz farklı kombinasyon denenmiştir (Tablo 7) [Guillaume vd., 2018].

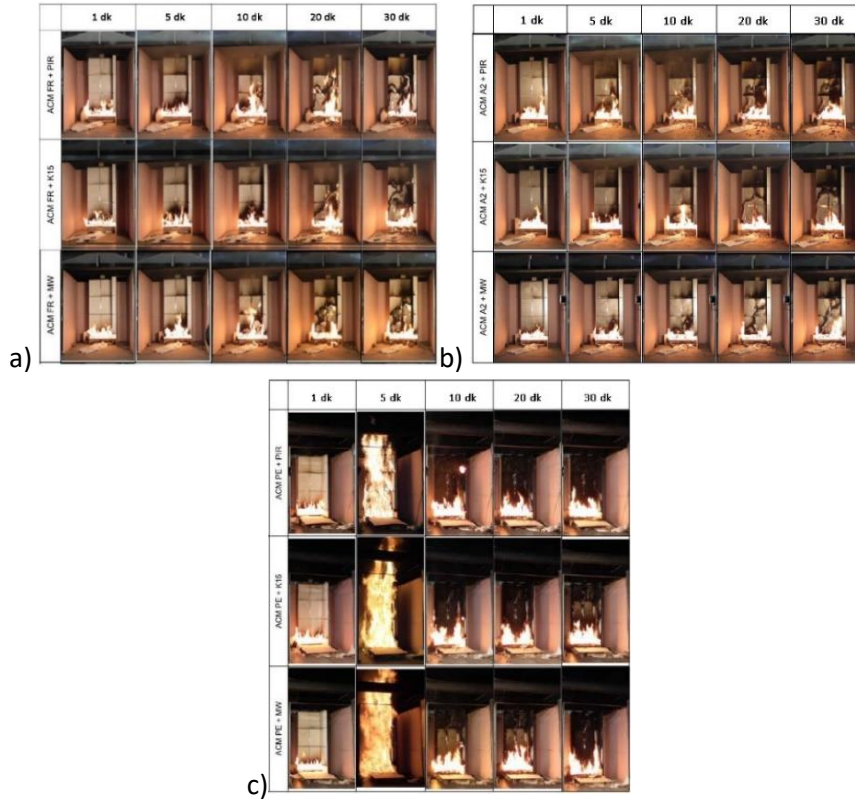
Tablo 7. Deney düzenekleri malzeme ve montaj tablosu [Guillaume vd., 2018].

Deney Düzeneği	Kaplama Malzemesi	Hava Boşluğu Genişliği	Yalıtım	Yangın Bariyeri	Yangın Bariyerinden Sonraki Hava Boşluğu
1	ACM-FR	50 mm	PIR	VAR	24 mm
2			K15		
3			MW		
4	ACM-A2		PIR		
5			K15		
6			MW		
7	ACM-PE		PIR		
8			K15		
9			MW		

Dokuz farklı deney düzeneği içinde PE çekirdekli alüminyum kaplama (ACM-PE) ile yapılan numunelerde diğer kaplama malzemelerine göre daha yüksek ısı yayma oranı tespit edilmiştir. Tüm deney düzenekleri içerisinde en yüksek ısı yayma oranı ve duman üretimi ACM-PE+K15 cephe kombinasyonunda ölçülmüştür. Bu durum, ACM-PE ile yapılan deneylerin her biri için benzer olmuş ve ısı yayma oranı diğer tüm deneylerden 16 kat daha yüksek çıkmıştır. Yanıcı yalıtım olmayan MW ile yapılan ACM-FR ve ACM-A2 deney düzenekleri beklendiği gibi en iyi sonuçları vermiştir. ACM-FR+MW deney düzeneklerinde 298 kW maksimum ısı yayılımı gözlenmişken ACM-A2+ MW'de ise bu değer 194 kW ölçülmüştür. Bu iki kaplama malzemesine sahip deney düzeneklerinde ölçülen maksimum ısı salınımı değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır. ACM-A2 + K15 ve ACM-FR + MW deney düzenekleri de yakın sonuçlar vermiştir. Sonuç olarak, ısı salınımı için en büyük katkı, ACM-PE kullanıldığında gerçekleşmiştir. ACM-PE numunelerinin görsel verileri incelendiğinde numunenin 10 dakika içinde neredeyse tamamen yandığı görülmüştür (Şekil 10-c). Bu deney düzeneği kombinasyonları hava boşluğunun bütünlüğünü garanti edememiştir. Alüminyum tamamıyla erimiş ve oksijenin deney düzeneklerine direkt girmesine neden olmuştur. Kaplamanın tamamıyla erimesinden dolayı yangın bariyeri büyük ölçüde etkisiz kalmıştır. ACM-A2+ K15 deney düzeneklerinde, dört dakikada alevler 500 mm'ye ulaşmış ve kaplamadan gözükmeye başlamıştır. ACM-FR +MW ve ACM-A2+ MW deney düzeneklerinde ise 7 dakika sonra alevler 500 mm'den gözükmeye başlamıştır. ACM-FR+ PIR, ACM-A2+PIR deney numunelerinde ise alevler 500 mm'de sırasıyla 7 ve 5 dakika sonra görülmüştür. ACM-PE'ye sahip cephe yapılarında alev 5 dakika gibi kısa bir sürede kaplama üzerinde en üst noktaya ulaşmış ve panel yangın esnasında yanarak erimiştir (Tablo 8). Bu sebeple hava boşluğunda kullanılan yangın bariyerleri görevini yerine getirememiş ve büyük ölçüde etkisiz hale gelmiştir. Çalışma sonucunda cephe kaplama malzemesinin yangın yayılımı açısından önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir [Guillaume vd., 2018].

Tablo 8. Alev yükselme tablosu [Guillaume vd., 2018'den düzenlenmiştir].

Deney Düzenekleri	Kaplama Malzemesi	Hava Boşluğu Genişliği	Yalıtım	Alevin Kaplamada Gözükmesi		Arka Kanatta Ulaşılan Max Yükseklik	Yan kanatta ulaşılan max. Yükseklik
				Yükseklik	Süre		
1	ACM-FR	50 mm	PIR	500 mm	7 dk	-	-
2			K15	500 mm	13 dk	-	-
3				1000 mm	18 dk	-	-
4	ACM-A2		MW	500 mm	7 dk	1500 mm	-
5			PIR	500 mm	5 dk	-	-
				1000 mm	8 dk	-	-
6			K15	500 mm	4 dk	-	-
				1000 mm	15 dk	-	-
7			ACM-PE	MW	500 mm	7 dk	-
	1500 mm	11 dk			-	-	
8	PIR	5 dakikada tüm yüzey tutuştu.					
9	K15						
	MW						

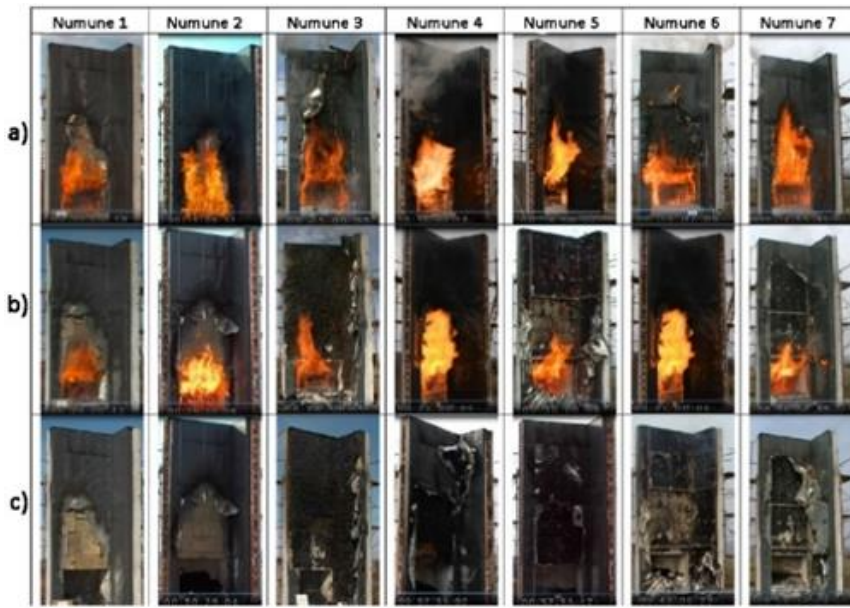
**Şekil 10.** a) ACM-FR kaplamalı deney düzeneği alev yayılımı, b) ACM-A2 kaplamalı deney düzeneği alev yayılımı, c) ACM-PE kaplamalı deney düzeneği alev yayılımı [Guillaume vd., 2018].

Cephelerdeki hava boşluğunun yangına etkisini vurgulayan bu çalışmalar sonucunda yangın ve hava boşluğu ilişkisini analiz etmek, yangının nasıl sınırlanacağı konusu önemli hale gelmiştir. Bu sebeple Colic ve Pecur, havalandırmalı giydirme cephelerde bulunan hava boşluklarında yatay ve dikey yangın bariyeri kullanılmasıdaki önemi göstermeyi amaçlayan bir deney serisi gerçekleştirmiştir [Colic & Pecur, 2020]. Bu deneyde, cephe kaplama malzemesi olarak tüm numunelerde yanmaz alüminyum kompozit panel (ACM-A2) kullanılmıştır. Yangın bariyerlerinin adetleri ve farklı yalıtım malzemeleri deneyin değişkenlerini oluşturmuştur. Yangın bariyeri olmayan cephede yangının diğer cephelere göre çok daha hızlı ve daha fazla yayıldığı görülmüş, yangın bariyeri olan cephenin ve olmayan cephenin aynı sıcaklık değerine ulaşmaları arasında iki kat zaman farkı olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 9).

Yangın bariyerlerinin sayısının artırılmasıyla da maksimum sıcaklık değerinin düştüğü belirtilmiştir (Şekil 11). Bu durumdan yanıcılık sınıfı yüksek olan yalıtım malzemelerinin cephe sisteminde yangın hızını arttırdığı sonucu çıkarılmıştır [Colic & Pecur, 2020]

Tablo 9. Deney düzenekleri malzeme ve montaj tablosu [Colic & Pecur, 2020'den düzenlenmiştir].

Deney Düzenek No	Kaplama	Yalıtım	Hava Boşluğu Genişliği	Yatay Boşluk Bariyerleri	Dikey Boşluk Bariyerleri	Maksimum Sıcaklık Değerleri/ Sıcaklık Değerlerine Ulaşılan Zaman							
						Kaplama önünden ölçülen max sıcaklık (2500 mm)	Ulaşılan Zaman (dk:sn)	Kaplama önünden ölçülen max sıcaklık (5000 mm)	Ulaşılan Zaman (dk:sn)	Hava boşluğundan ölçülen max sıcaklık (5000 mm)	Ulaşılan Zaman (dk:sn)	Yalıtımdan ölçülen max sıcaklık (5000 mm)	Ulaşılan Zaman (dk:sn)
1	ACM-A2	Taş yünü	60 mm	YOK	YOK	827°C	12:30	325°C	13:20	526°C	15:11	270°C	30:41
2		Taş yünü		2	1	861°C	24:23	364°C	19:43	308°C	26:53	133°C	10:40
3		PIR		YOK	YOK	1010°C	20:21	844°C	17:01	953°C	29:21	1016°C	31:31
4		PIR		2	1	895°C	24:01	914°C	33:21	908°C	33:41	946°C	31:01
5		PIR		4	3	879°C	20:10	429°C	22:03	659°C	44:02	304°C	48:42
6		Fenolik Köpük		2	1	930°C	19:51	917°C	18:20	883°C	18:20	979°C	21:31
7		Fenolik Köpük		4	4	935°C	19:41	577°C	22:21	473°C	25:51	261°C	12:50



Şekil 11. a)15. dakika b) 30. dakika ve c) deneyden sonra numuneler [Colic & Pecur, 2020].

Deney düzeneği 4 için yatay bariyer sayısı yetersiz kalmış, 27. dakikada alevler düzeneğin üzerinden gözükmeye başlamıştır. Yanıcı yalıtım kullanılması durumunda, yangının yayılmasını önlemede iki yatay bariyer yetersiz kalmış, yalnızca dört yatay bariyer kullanıldığında numune testi geçmiştir. Ancak dört bariyerli numuneler için birinci ile ikinci ve ikinci ile üçüncü arasındaki mesafe yaklaşık 250 cm ve üçüncü ile dördüncü arasındaki mesafe yaklaşık 100 cm şeklinde konumlandırılmıştır. Teknik ve pratik nedenlerle, bu sayıdaki ve bu konumdaki yangın bariyeri sorunlu olarak kabul edilmiştir. Yatay bariyerlerin konumlarının farklı olduğu deney düzenekleri kıyaslandığında yanma odasına daha uzak yatay yangın bariyerine sahip olan deney düzeneğinin daha geç yanmaya başladığı tespit edilmiştir. Ayrıca düşey yangın bariyeri bulunan tüm deney sonuçlarına bakıldığında, bariyerin yangının yayılımının önlenmesinde olumlu etkiye sahip olduğu görülmüş ve düşey yangın bariyerinin yatay yangın bariyerine bağlı olarak çalıştığı belirtilmiştir. Çalışmada sonuç olarak, yatay yangın bariyerlerin konumlarının ve miktarlarının önemi vurgulanmıştır [Colic & Pecur, 2020].

2021 yılında Jones ve diğerlerinin yapmış olduğu deneyde dört adet deney düzeneği ile cephe yanıcılık deneyi yapılmıştır. Numunelerin üç tanesinin kaplama malzemesi mineral dolgulu alüminyum kompozit malzeme (ACM-A2) olup yalıtım malzemeleri; poliizosiyanürat köpük (PIR), fenolik köpük (PF) ve taş yünüdür (MW).

Dördüncü numune polietilen dolgulu ACM (ACM-PE) kaplama malzemesine sahip PIR yalıtımlı bir sistemdir. Yangın bariyerlerinin konumları deneylerde sabit tutulmuştur (Tablo 10).

Tablo 10. Yalıtım ve kaplama panellerinin kombinasyonları [Jones vd., 2021]

Deney Düzenegi	Kaplama Malzemeleri	Çekirdek Yalıtımı	Hava Boşluğu Genişliği	Yalıtım	Yangın Bariyeri	Yangın Bariyerinden Sonraki Hava Boşluğu Genişliği
1	ACM-A2	Mineral çekirdek	50 mm	Taş yünü	VAR	25 mm
2		Mineral çekirdek		Fenolik Köpük		
3		Mineral çekirdek		Poliizosiyanürat Köpük		
4	ACM-PE	Polietilen çekirdek		Poliizosiyanürat Köpük		

ACM-PE+PIR cephesinde şiddetli yanma meydana gelmiş ve güvenlik nedeniyle 13,5 dakika sonra numune söndürülmüştür. Bu deneyde sıcaklığın 1000°C'nin üstüne çıktığı tespit edilmiştir. ACM-PE+PIR deney düzeneginin kaplaması yangının ilk 8 dakikasinda tamamıyla tahrip olmuştur. ACM-A2 kaplaması ve yalıtkanlığı fazla olan PIR, fenolik köpük (PF) yalıtım levhaları ile oluşturulan deney düzenekleri, üç aşamalı yanma davranışı göstermiştir. Bu köpük yalıtımlar için 5 dakikadan daha kısa sürede sıcaklık 50 °C'ye ulaşmıştır. Bu yükselişin ardından, PF/A2 cephe kombinasyonu için 6 dakikada, PIR/A2 için ise 7,5 dakikada sıcaklık hızla ~ 250 °C'ye yükselmiştir. ACM-A2+PF'nin sıcaklığı 18. dakikada düşüş göstermiştir. Bunun sebebinin ise yalıtım levhasının fiziksel hareketi olduğu düşünülmüştür. Tüm ACM-A2 kaplama paneli ile yapılan deney kombinasyonlarında deney esnasında ACM-A2 panelleri yapısal bütünlüğünü kaybetmiş ve test duvarından ayrılmıştır. Bu durum PIR ve PF'nin yaklaşık % 40'ının yanmasına sebebiyet vermiştir (Şekil 12-b-c). Aynı zamanda yangının yayılmasına katkıda bulunmuştur. ACM-A2+PF kullanılan deney düzeneginde, 17 dakika sonra sıcaklıkta keskin bir artış görülmüştür. Bu sıcaklıktaki keskin artış yangının boşluğa girmesine neden olmuştur. ACM-A2+PIR için, 22. dakikada kaplama panelinin test duvarından düşmeye başlamasıyla sıcaklıkta keskin bir artış tespit edilmiştir (Şekil 12-c). ACM-A2+MW için keskin bir sıcaklık artışı gözlemlenmemiştir. ACM-A2+MW, 30 dakikada 500 °C'ye yükselmiş, beklenildiği gibi kademeli bir sıcaklık artışı olmuş ve yalıtım yerinde kalmıştır (Şekil 12-a). ACM-A2+MW ve ACM-A2+PIR deneylerinin yangın büyüme oranı ve sıcaklık artışının, ACM-A2+PF ve ACM-PE+PIR'a göre daha yavaş olduğu ve benzer yangın büyüme oranları gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak ACM-PE+PIR deney düzeneginde yangın büyümesi 5. dakikadan önce belirginleşmiştir. Yalıtım levhalarının hareketi ise, ACM-A2+PF için 17. dakikada, ACM-A2+PIR için ise 23. dakikada başlamıştır. Bu durum sadece kaplamanın değil, tüm cephe ürünlerinin yanıcı olmaması gerektiğini göstermiştir [Jones vd., 2021].



Şekil 12. Deneylerden sonra cephe durumları a) ACM-A2+MW, b) ACM-A2+PF, c) ACM-A2+PIR [Jones vd., 2021].

Çalışma sonucunda Guillaume'nin çalışma sonucu ile aynı sonuca varılmıştır. Cephe kaplamasının bütünlüğünün korunmasının önemli olduğu ve tüm sistemin yangın davranışının bir bütün olarak değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir [Jones vd., 2021].



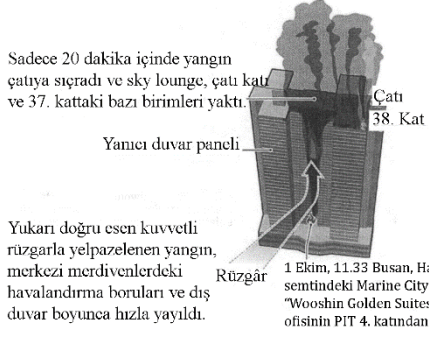





3. 2010-2021 Yılları Arasında Meydana Gelen Beş Farklı Cephe Yangını Analizi

Havalandırılmalı giydirmeye cephe sistemlerinin yangın sırasında nasıl bir davranış gösterdiği, hangi unsurların cephe boyunca yangının ilerlemesine ve yayılmasına etki ettiğinin anlaşılması için literatür ve yangın raporları taranarak çalışmalar incelenmiştir. Edinilen bilgiler ışığında 2010-2021 yılları arasında meydana gelen cephe yangınlarında yangın yayılım hızına etken unsurları değerlendirmek amacıyla cephede yangın kesici bariyer olan ve olmayan, yangın yayılım süresi ve yalıtım malzemesi farklı beş büyük yangın olayı çalışma kapsamında seçilmiştir. Bu bağlamda analizi kuvvetlendirmek amacıyla değerlendirme tabloları hazırlanmıştır (Tablo 11, 12, 13, 14, 15).

Yangın olayı esnasında çekilen videolardan ve/veya akademik çalışmalardan alınan bilgilere göre seçilen binaların yangın yayılım süreleri;

- Wooshin Golden Suit: 4. kattan 38. kata ulaşması yaklaşık 20 dakika (Tablo 11),
- Polat Tower: 1. Kattan 34. Kata (140 m) ulaşması yaklaşık 3,5 dakika (Tablo 12),
- Mermoz Tower: 2. kat balkonundan 18. katı geçip çatıya ulaşması yaklaşık 6 -7 dakika (Tablo 13),
- Lacrosse Building: 6. kattan 11. kata çıkması 10 dakika (Tablo 14),
- Grenfell Tower: 4. kattan çatıya ulaşması (23. kat ve üzeri) yaklaşık 21 dakika (Tablo 15), olarak belirlenmiştir.


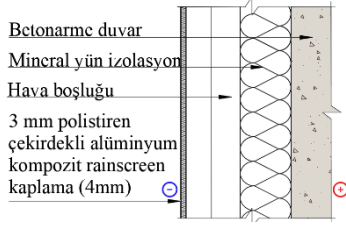

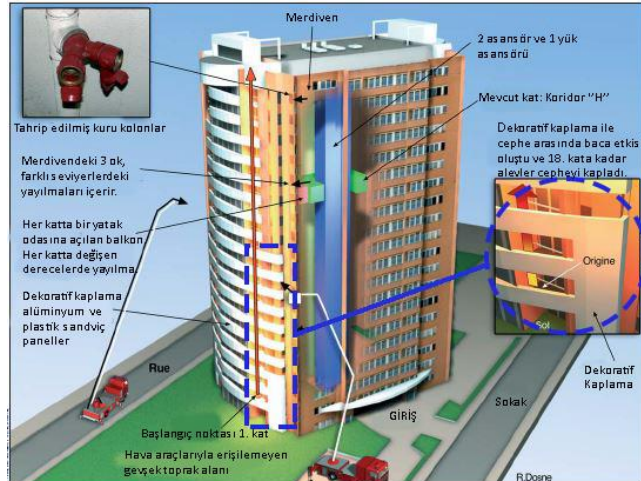

Tablo 11. Wooshin Golden Suits yangını

Genel		Bina adı: Wooshin Golden Suites / Busan, Güney Kore
		Cephe sistemi: Havalandırmalı Giydirme Cephe Cephe kaplaması: Polietilen çekirdekli alüminyum kompozit Cephe yalıtımı: Cam yünü Yangın bariyeri: Yok
Cephe Özellikleri:		 <p style="text-align: right;">Cephe sistem kesiti [Kim, vd., 2011]</p>
Yangın yayılım nedeni		<ul style="list-style-type: none"> • Kaplama malzemesinin yanıcı olması. • Cephenin U şeklinin baca etkisi yaratması. • Denizden esen rüzgârın etkin olması. • Cephede yangın bariyeri kullanılmaması. • Cephedeki hava boşluğunda baca etkisi yaratması.
Yangın yayılım analizi		<p>Yangın 4. katta başlamıştır. Cephe kaplamasının yüzey sıcaklığı yükselmiştir. Çekirdek malzemesinin termal bozunmasıyla ortaya çıkan yanıcı gaz alev almış ve panelin erimeye başlamasıyla cephe yanmaya başlamıştır. Yüksek sıcaklıktaki gaz cephede bulunan korumasız hava boşluğu boyunca yükselerek, alüminyumun erimesini ve polietilen çekirdek malzemesinin yanmasını daha da hızlandırmıştır (Şekil 14). Cephe sisteminde yer alan hava boşluğunun korunmasız olmasının, yangının cephe boyunca yukarı doğru hızlı bir şekilde ve geniş bir alana yayılmasına neden olduğu düşünülmektedir (Şekil 15). Yapı 38 katlıdır (140 m). Yangının, binanın 4. katından 38.'i katına ulaşması 20 dakika sürmüştür (Şekil 13) [White vd., 2013; BRE Global Ltd., 2019; Kim vd., 2011].</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Sadece 20 dakika içinde yangın çatıya sıçradı ve sky lounge, çatı katı ve 37. kattaki bazı birimleri yaktı.</p> <p>Yanıcı duvar paneli</p> <p>Yukarı doğru esen kuvvetli rüzgârla yelpazelenen yangın, merkezi merdivenlerdeki havalandırma boruları ve dış duvar boyunca hızla yayıldı.</p> <p>Rüzgâr</p> <p>1 Ekim, 11.33 Busan, Haundae semtindeki Marine City'deki "Wooshin Golden Suites" konut ofisinin PIT 4. katından yangın çıktı.</p> </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div> <p>Şekil 13. Wooshin Golden yangın dinamiği [Kim vd., 2011] Şekil 14. Wooshin Golden Suits yangını [URL-7, 2022]</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">     </div> <p style="text-align: center;">Şekil 15 Wooshin Golden Suits yangın söndürüldükten sonra çekilen fotoğraflar [URL-8, 2022]</p>


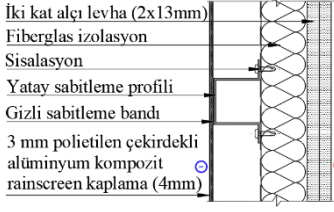
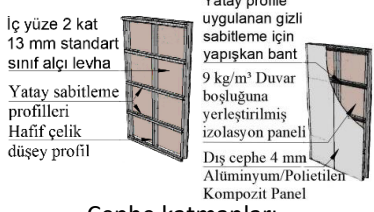
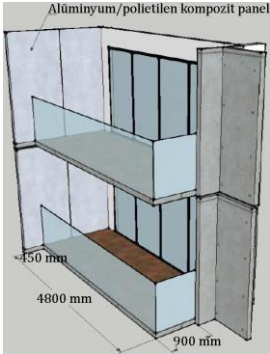

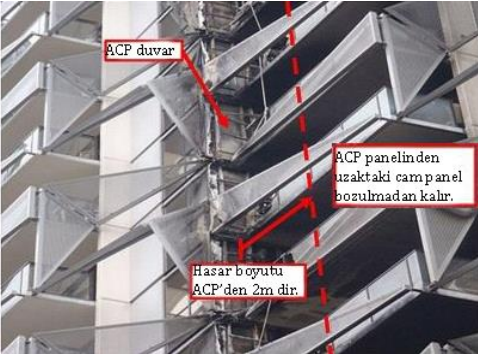

Tablo 12. Polat Tower yangını

Genel		Bina adı:	Polat Tower / Türkiye, İstanbul
		Cephe Özellikleri:	Cephe sistemi:
Cephe kaplaması:	Polistiren çekirdekli alüminyum kompozit		
Cephe yalıtımı:	Taşyünü (A1 Sınıfı)		
Yangın bariyeri:	Yok		
			
Yangın yayılım nedeni		<ul style="list-style-type: none"> Kaplama malzemesinin yanıcı olması. Isı izolasyon malzemesinin bütünlüğünün bozulması. Cephedeki hava boşluğunun baca etkisi yaratması. 	
Yangın yayılım analizi	<p>Cephe kaplama malzemesi alucobond kompozittir [BRE Global Ltd., 2019]. 0,5 mm kalınlığında iki alüminyum levha arasına sıkıştırılmış 3 mm kalınlığında polistren çekirdekten oluşan metal kompozit kaplama kullanılmıştır. Cephe sisteminde yangın bariyeri bulunmamaktadır. Yangın, meydana gelen teknik bir arıza sonucu kablo izoleleri ve plastik aksamların tutuşmasıyla başlamıştır. Bu durum, dış cephe izolasyon malzemesiyle beton yüzey arasında hararet yükü oluşturmuştur. Bu hararet yükü, binanın doğu cephesinin kuzey köşesinden ısı izolasyon malzemesinin bütünlüğünün bozulduğu alanda mevcut alucobond cephe kaplama malzemesinin iç yüzey alüminyumu ile ara yüzeydeki polistren kaplamayı tutuşturmuş ve dış alanda alevli yanmaya dönüşmüştür. Hava sirkülasyonu etkisiyle dış cephenin tüm yüzeyi kısa sürede yanmıştır [URL-9, 2022]. Alevler 66 cm/s hızla üç buçuk dakikada cephede 34 kat (140 m) boyunca yayılmıştır (Şekil 17, Şekil 18) [Soğukoğlu&İnce, 2013]. Cephede yangın bariyerlerinin kullanılmaması baca etkisi sebebi ile yangın hızını arttırmıştır. Yangın esnasında cepheden düşen parçalar çevrede tehlike oluşturmuştur (Şekil 16).</p>	 <p>Şekil 16. Polat Tower yangın esnasında ve yangın durdurulduktan sonraki fotoğrafları [Goodenough, 2012]</p> <p>Şekil 17. Polat Tower yangın ilerleyiş diyagramı [URL-10, 2022]</p>	
		Şekil 18. Polat Tower yangın yayılım CDF modellemesi [URL-11, 2022]	


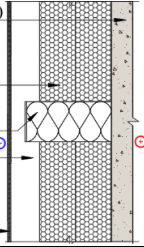
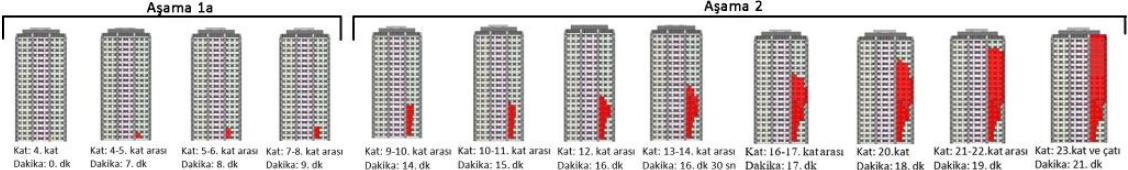
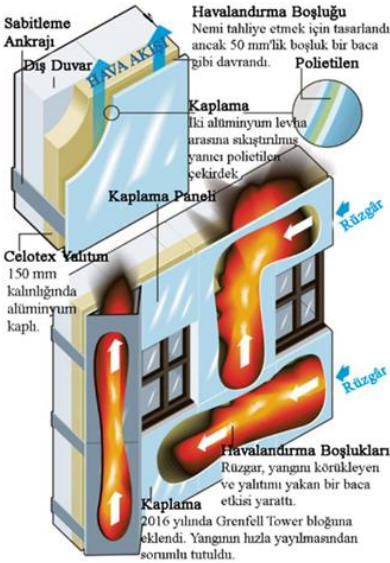
Tablo 13. Mermoz Tower yangını

Genel		Bina adı:	Mermoz Tower / Roubaix, Fransa
		Cephe Özellikleri:	Cephe sistemi:
Cephe kaplaması:	Polietilen çekirdekli alüminyum kompozit		
Cephe yalıtımı:	Mineral yün		
Yangın bariyeri:	Yok		
Cephe Kesiti			Balkon Cephe Kesiti
Yangın yayılım nedeni	<ul style="list-style-type: none"> • Kaplama malzemesinin yanıcı olması. • Cephedeki hava boşluğunun baca etkisi yaratması. • Hava boşluğunda yangın bariyeri bulunmaması. 		
Yangın yayılım analizi	<p>Cephenin birinci katında kaplama malzemesi olarak formo-fenolik dekoratif levha, diğer 17 katın tümünde, 0,5 mm kalınlığında iki alüminyum levha arasında sıkıştırılmış 3 mm kalınlığında polietilen çekirdekten oluşan metal kompozit kaplama kullanılmıştır. Binadaki balkonların önünde 10 mm kalınlığında plastik çekirdekten oluşan alüminyum kaplama malzemesi kullanılmıştır. Yapı 18 katlıdır (48,26m). İkinci kat balkonunda çıkan yangın, cephe üzerinde alevin düşey yönde ilerlemesiyle binanın üst katlarına yayılmıştır (Şekil 19). İkinci kattaki yangın 5 dakikadan kısa bir süre sonra kaplamayı tutuştururup, kattan kata sıçrayarak birkaç dakika içinde binanın çatısına ulaşmıştır. Balkon levhaları 10 dakika boyunca yangına yakıt şeklinde katkıda bulunurken, cephede yangın bariyeri bulunmamasından dolayı hava boşlukları baca etkisi oluşturmuş ve alevlerin daha hızlı bir şekilde yayılmasına neden olmuştur [White vd., 2013; Dosne, 2021]</p>		
			
	<p>Şekil 19. Mermoz Tower yangından sonraki cephenin durumu [White vd., 2013; Dosne, 2021]</p>		
			
	<p>Şekil 20. Mermoz Tower yangın yayılım şeması [Dosne, 2021]</p>		<p>Şekil 21. Mermoz Tower yangın esnasında cephe fotoğrafı [Chapman, 2018]</p>

Tablo 14. Lacrosse Building yangını

Genel		Bina adı:	Lacrosse Building / Melbourne, Avustralya
		Cephe sistemi:	Havalandırılmalı Giydirme Cephe
		Cephe kaplaması:	Polietilen çekirdekli alüminyum kompozit
		Cephe yalıtımı:	Fiberglass izolasyon
		Yangın bariyeri:	Yok
		Cephe Özellikleri:	  <p>İki kat alçı levha (2x13mm) Fiberglas izolasyon Sisalasyon Yatay sabitleme profili Gizli sabitleme bandı 3 mm polietilen çekirdekli alüminyum kompozit rainscreen kaplama (4mm)</p> <p>İç yüzü 2 kat 13 mm standart sınıf alçı levha Yatay sabitleme profilleri Hafif çelik düşey profil</p> <p>Yatay profile uygulanan gizli sabitleme için yapışkan bant 9 kg/m³ Duvar boşluğuna yerleştirilmiş izolasyon paneli Dış cephe 4 mm Alüminyum/Polietilen Kompozit Panel</p> <p>Cephe katmanları [Badrock&Bryant, 2016]</p>
Yangın yayılım nedeni	<ul style="list-style-type: none"> • Kaplama malzemesinin yanıcı olması. • Cephedeki hava boşluğunun baca etkisi yaratması. • Hava boşluğunda yangın bariyeri bulunmaması. • Yalıtım malzemesinin yanıcı olması. 		
Yangın yayılım analizi	<p>Cephe katmanları içten dışı sırasıyla; çelik ankraj, alçı levha, fiberglas izolasyon, sisalasyon, çelik çitalar, sac üzerine alüminyum kompozit panel şeklinde tasarlanmıştır. Cephe kaplaması olarak Alucobest kullanılmıştır (Şekil 22). Yapı 20 katlıdır (72 m). 8. katta başlayan yangın kısa sürede cephe kaplamasını tutuşturmuş ve cephe sisteminde bulunan yanıcı malzemenin de etkisiyle hızla binanın üst katlarına yayılmıştır. Yangın, 8. kattan aşağıya doğru iki katı da etkileyerek çatı dahil yukarıya doğru tüm katlara ulaşmıştır (Şekil 22). Yangının tüm katlardaki cepheye birleşik odalara da nüfuz ederek 6. kattan 21. kata ve çatıya ulaşması 10 dakika sürmüştür (Şekil 23). Balkonların dış yüzeyinde kullanılan Alucobest alüminyum kaplamanın, köpük kaplamanın ve cephede bulunan hava boşluğunun yangın yüküne ve yangın yayılım hızına olumsuz yönde katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Yangının hızlı bir şekilde düşey yönde yayılmasının dış kaplama ile doğrudan ilişkili olduğu raporlarda da belirtilmiştir [Badrock&Bryant, 2016; Genco, 2015; Badrock, 2016; URL-12, 2022].</p>    <p>Şekil 22. Lacrosse Building balkon bölgesi ve yangın hasarı tespiti [Badrock&Bryant, 2016; Faudzi&Dodd, 2021].</p> <p>Yangının MFB tarafından yapılan simülasyonundan yangının katlara ulaşımına göre sprinkler sisteminin devreye girdiği dakikalar gözlemlenmiş ve yangının 10. kattan çatıya kadar 9 dakikada yayıldığı görülmüştür. Yangın 17. kata geldikten sonra 6. kattaki sprinkler sistemi aktif hale gelmiştir.</p>  <p>Saat: 02:29 Saat: 02:33 Saat: 02:35 Saat: 02:37 Saat: 02:38</p> <p>Şekil 23. Lacrosse Building yangın simülasyonu [URL-12, 2022].</p>		

Tablo 15. Grenfell Tower yangını

Genel		Bina adı:	Grenfell Tower / Londra, İngiltere
		Cephe Özellikleri:	Cephe sistemi:
Cephe kaplaması:	Polietilen çekirdekli alüminyum kompozit		
Cephe yalıtımı:	Folyo kaplı PIR Köpük		
Yangın bariyeri:	Var		
			<p>Prekast beton duvar (250 mm)</p> <p>Folyo kaplı sert PIR izolasyon köpüğü (150 mm Celotex RS5000)</p> <p>Taşyünü yangın durdurucu izolasyon (Şişen bantlı)</p> <p>Hava boşluğu (50 mm)</p> <p>Polietilen çekirdekli alüminyum kompozit kaplama (3mm Reynobond)</p> 
Yangın yayılım nedeni		<ul style="list-style-type: none"> • Kaplama malzemesinin yanıcı olması. • Cephedeki hava boşluğunun baca etkisi yaratması. • Hava boşluğunda yangın bariyerinin yanlış konumlandırılması ve bazı yerlerde bulunmaması. • Yalıtım malzemesinin yanıcı özellikte olması. 	
Yangın yayılım analizi		<p>Cephede kullanılan alüminyum kompozit malzeme (ACM), hava boşluklarında yangın bariyerlerinin yanlış konumlandırılması ve yanıcı poliizosiyanürat (PIR) köpük izolasyonu yangının hızını arttırmıştır [Lane, 2017]. Yangın, aşama 1a, 1b ve 2 olmak üzere 3 aşamada gerçekleşmiştir (Şekil 24).</p>  <p>Şekil 24. Aşama 1a dakika 0 ile dakika 9 arasında, aşama 2 ise dakika 14 ile dakika 21 arasında gerçekleşmiştir [Guillaume vd., 2019; Koohkan vd., 2019]</p> <p>Aşama 1b ise 9. ve 14. dakikalar arasında yer almakta ancak herhangi bir fotoğraf veya video kaydı olmaması sebebiyle grafiksel olarak yer almamaktadır. Ancak ilk aşama olan 1a'nın 9.dakikada çekilmiş son görüntüleri ile aşama 2'nin 14. dakikada çekilmiş ilk görüntülerinden yola çıkarak aşama 1b'de yangın yayılım hızının cephede azaldığı tespit edilmiştir. Bu aralıkta yangının binanın içine sirayet ettiği düşünülmektedir.</p> <p>Dördüncü katta cephe tutuştuktan sonra, zaman içinde düşey yayılma doğrusal hale gelmiştir. Yangın altıncı kata ulaşana kadar düşey yangın yayılma hızı yaklaşık 3,5 m/dk olarak hesaplanmıştır. Ardından yangının yayılması aşama 2'de yavaşlamıştır. Bir süre sonra yangının yayılması güçlü bir şekilde hızlanmıştır. Yangın binanın tepesine ulaştığında maksimum düşey yangın yayılma hızı 8 m/dk olarak hesaplanmıştır. Yatay yayılımın tepe seviyesinde en yüksek olduğu kanıtlanmıştır (0,293 ± 0,005 m/dk). Yatay yangın yayılma hızı ile yükseklik arasında doğrusal bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir [Guillaume vd., 2019]. Yangın olayının zamansal olarak yatay yayılımına bakıldığında [Guillaume vd., 2019; Koohkan vd., 2019]; Alevler binanın tepe noktasına ulaştığında yatay olarak saat ve saat yönünün tersi olacak şekilde her iki yönde yayılmaya başlamıştır. Yangın başladıktan yaklaşık 21 dakika sonra tepe noktasına ulaşmıştır. Yatay alev yayılma hızı her iki yön içinde ortalama 0,3 m/dk olarak tahmin edilmektedir [Koohkan vd., 2019].</p>  <p>Şekil 25. Yangın yayılımı diyagramı [URL-13, 2022]</p>	

Çalışma kapsamında incelenen yangın olaylarında; binaların havalandırılmalı cephe sistemleri, yangın yayılım dinamiği irdelenip, düşey yangın yayılım alanları ve yayılım süreleri tespit edilmiştir. Seçilen bu binalarda tasarım ve uygulama ile ilgili problemler saptanmıştır. Meydana gelen bu yangınlardan elde edilen verilerin, Bölüm 2’de incelenen deneylerin sonuçları ile karşılaştırılması teorik ve pratik arasındaki ilişkiyi anlamak adına önem taşımaktadır.

4- Bulgular ve Tartışma

Akademik çalışmalar kapsamında yapılmış olan deneylerden elde sonuçların gerçek zamanlı yangınlarla karşılaştırıldığında ne derecede örtüştüğünü tespit etmek amaçlanmıştır. Deneylerde ve meydana gelen olaylarda verilmemiş olan yangın yayılım hızı yaklaşık değerleri;

$$\text{Yangın Yayılım Hızı} \left(\frac{m}{dk} \right) = \frac{\text{Kat Sayısı} \times \text{Kat Yüksekliği (m)}}{\text{Yangın Yayılım Süresi (dk)}}$$

formülü³ ile m/dk cinsinden bulunmuştur. Bulunan değerler tablo 16’da (*) işareti ile belirtilmiştir. Yayılım hızı verilmiş olan veriler için ise tablo bütünlüğü açısından m/dk cinsine getirilmiştir. Meydana gelmiş olaylarda yangın yayılım hızı bilinmeyen yapılar için bu hesapta kullanılacak yaklaşık kat yüksekliği, yapının toplam kat yüksekliğinin kat sayısına bölünmesi ile bulunmuştur. Bu hesaba göre kat yükseklikleri Wooshin Golden Suites için 3,7 m, Mermoz Tower için 2,7 m, Lacrosse Building için ise 3,6 m alınmıştır. Bu doğrultuda, Tablo 16’da karşılaştırma değerleri gösterilmiştir.

Tablo 16. 2010-2021 yılları arasında meydana gelen beş cephe yangını ve incelenen deney sonuçları karşılaştırma tablosu

Değerlendirme kriterleri	Cephe Kaplaması			Cephe Yalıtımı		Hava Boşluğu	Yangın Bariyeri	Düşey yangın yayılım alanı	Yangın yayılım süresi	Yangın Yayılım Hızı	Max sıcaklık	Max sıcaklığa ulaşma süreleri		
	Malzeme	Kaplama Kalınlığı	Çekirdek Kalınlığı	Malzeme	Kalınlık									
Meydana Gelen Yangın Olayları Analizi	Wooshin Golden Suites	ACM-PE	0,5 mm	3 mm	Cam yünü	30 mm	50 mm	Yok	4-38 kat	20 dk	6,29 m/dk*	-	-	
	Polat tower	ACM-EPS	0,5 mm	3 mm	MW	-	-	Yok	1-34 kat (140m)	3,5 dk	39,6 m/dk	-	-	
	Mermoz Tower	ACM-PE	0,5 mm	3 mm	MW	-	-	Yok	2-18 kat ve çatı	6-7 dk	6,2 m/dk*	-	-	
	Lacrosse Building	ACM-PE (balkon)	0,5 mm	9 mm	Yok	-	-	Yok	6-21. kat ve çatı	6-7 dk	7,7 m/dk*	-	-	
		ACM-PE	0,5 mm	3 mm	Fiberglass	-	-	Yok	6-21. kat ve çatı	10 dk	5,4 m/dk*	-	-	
Grenfell Tower	ACM-PE	0,5 mm	3 mm	Folyo kaplı PIR	150 mm	50 mm	Var	4-23. kat ve çatı	21 dk	6. kata kadar 3,5 m/dk Çatıda 8 m/dk	-	-		
Karşılaştırılacak Deneyler ve Düzeneçler	Sharma ve Mishra	6	AL-45-PE	0,5mm	3 mm	MW	25 mm	50 mm	Yok	1,47 m	5 dk	0,14 m/dk	308°C	8-10 dk
		5	AL-45-PE	0,5mm	3 mm	PIR	25 mm	50 mm	Yok	2,3 m	<2 dk	0,31 m/dk	840°C	5 dk
	Guillaume ve ark.	7	ACM-PE	0,5mm	3 mm	PIR	50 mm	50 mm	Var	2,4 m	5 dk	0,48 m/dk*	-	-
		8	ACM-PE	0,5mm	3 mm	K15	50 mm	50 mm	Var	2,4 m	5 dk	0,48 m/dk*	-	-
		9	ACM-PE	0,5mm	3 mm	MW	100mm	50 mm	Var	2,4 m	5 dk	0,48 m/dk*	-	-
	Jones ve ark.	4	ACM-PE	0,5mm	3 mm	PIR	100mm	50 mm	Var	5 m	13,5 dk	0,38 m/dk*	1000°C	13,5 dk
1		ACM-A2	0,5mm	3 mm	MW	180mm	50 mm	Var	5 m	30 dk	0,17 m/dk*	500°C	30 dk	

Cephe kaplama malzemesi, yalıtım malzemesi ve hava boşluğu koşulları aynı olan deneyler ile meydana gelen yangın olayları kıyaslandığında yangın yayılım süreleri, yangın yayılım alanı ve yangın yayılım hızında farklılık gözlemlenmektedir. Meydana gelen yangın olaylarının incelenen deneylere göre daha hızlı ilerlediği tespit edilmiştir.

³ Formül, yangın davranışlarını belirleyen bazı etkenler ve kantitatif yaklaşımlar makalesinde belirtilen R: dx/dt (Yangının sabit yayılma hızı: m/dk) formülünden türetilmiştir [Öymen, T., 1985].

Wooshin Golden Suits yangınına ait veriler Guillaume ve diğerlerinin 9. ve Sharma ve Mishra'nın 6. deney düzeneği ile kıyaslanmıştır. 9. deney düzeneği yangın yayılım hızı 0,48m/dk, 6. deney düzeneğinde ise 0,14 m/dk olduğu görülmektedir.

Wooshin Golden Suits'in yangın yayılım hızı ise 6,29 m/dk bulunmuştur. Bu bilgiler doğrultusunda, Wooshin Golden Suits'in yangın yayılımının daha hızlı olduğu görülmüştür. Yangının Wooshin Golden Suits'de daha hızlı yayılmasının nedenleri olarak cephe geometrisinin U şeklinde olması ve rüzgâr etkisi gösterilebilmektedir. Deney 9'da ise yangın bariyeri olması ve sabit brülör gücü nedeniyle yangın Wooshin Golden Suits'de daha hızlı ilerlemiştir. Deney 6 incelendiğinde ise yangın bariyeri kullanılmamasına karşın yangın hızının meydana gelen yangın olayına kıyasla daha yavaş olduğu görülmektedir.

Polat Tower ve Mermoza Tower yangınları Guillaume ve diğerlerinin 9., Sharma ve Mishra'ın 6. deney düzenekleri ile kıyaslanmıştır. 9. deney düzeneği yangın yayılım hızı 0,48m/dk, 6. deney düzeneğinde ise 0,14 m/dk olduğu görülmektedir. Polat Tower yangın yayılım hızı 39,6 m/dk, Mermoz Tower'ın ise 6,2 m/dk olarak bulunmuştur. Bu bilgiler doğrultusunda deney düzeneklerindeki yangının çok daha yavaş ilerlediği görülmüştür. Yangın, 9. deney düzeneğinde yangın bariyerinin olması sebebiyle Mermoz Tower ve Polat Tower'a göre daha yavaş yayılmıştır. 6. deney düzeneğinde yangın bariyeri bulunmamakta olup yangın hızı Mermoz Tower ve Polat Tower yangınlarına kıyasla yine de daha yavaştır. Polat Tower yangının cephe kaplama malzemesi EPS çekirdeğe sahip olmasına rağmen daha yanıcı olan PE çekirdeğe sahip deney düzeneklerine göre daha hızlı ilerlediği tespit edilmiştir. Mermoz Tower yangınında ise balkonda bulunan yanıcı eşyaların, balkonun dekoratif kaplaması olan 10 mm ACM-PE'nin kalınlığının, balkonların yalıtım malzemesine sahip olmamasının ve hava koşullarının yangın hızını arttırıcı etken olabileceği düşünülmüştür.

Lacrosse Building yangını Guillaume ve diğerlerinin 9. deney düzeneği, Sharma ve Mishra'nın 6. deney düzeneği ve Jones ve diğerlerinin 1. deney düzeneği ile kıyaslanmıştır. 9. deney düzeneği yangın yayılım hızı 0,48m/dk, 6. deney düzeneğinde 0,14 m/dk, 1. deney düzeneğinde ise 0,17 m/dk olarak bulunmuştur. Lacrosse Building'in yangın yayılım hızı ise balkonlarda 7,7 m/dk, cephede 5,4 m/dk olduğu görülmüştür. Bu bilgiler doğrultusunda deney düzeneklerindeki yangının daha yavaş ilerlediği görülmüştür. Burada ise balkon tasarımının yaratmış olduğu boşluk, cephede yangın bariyerinin olmaması ve çevresel etkenlerin varlığının yangın hızını etkilediği düşünülmüştür.

Grenfell Tower yangını Jones ve diğerlerinin 4., Sharma ve Mishra'nın 5. ve Guillaume ve diğerlerinin 7. deney düzeneği ile kıyaslanmıştır. 4. deney düzeneği yangın yayılım hızı 0,38 m/dk, 5. deney düzeneğinde 0,31 m/dk, 7. deney düzeneğinde ise 0,48 m/dk olarak bulunmuştur. Grenfell Tower yangın yayılım hızı ise altıncı kata kadar 3,5 m/dk, çatıda ise 8m/dk olduğu ölçülmüştür. Bu veriler doğrultusunda yangın yayılımı Grenfell Tower'da deneylere göre daha hızlı olduğu görülmüştür. 7. ve 4. deney düzeneklerinde yangın bariyeri olmasına karşın yangın yayılım hızındaki farklılığın, Grenfell Tower'da yangın bariyerlerinin yanlış konumlandırılmasından dolayı hava boşluğunda oluşan açıklıklardan kaynaklandığı görülmüştür. 5. deney düzeneğinde ise yangın bariyeri olmamasına rağmen deneydeki yangın hızı Grenfell Tower yangınına göre daha yavaş ilerlemiştir. Bu durumun ise hava koşullarından kaynaklı olabileceği düşünülmüştür.

SONUÇ:

Yapıda yangın oluşumu tamamen engellenememektedir fakat bu konuda gerekli önlemler alındığında yangın ciddi ölçüde azaltılabilmekte ve olaya müdahale kolaylaşmaktadır. Bu önlemlerin alınabilmesi için geçmiş yangınların ve deneysel çalışmaların incelenerek yangın oluşum nedenlerinin detaylı bir şekilde ortaya konması, deneysel olarak yapılan akademik çalışmalarda elde edilen sonuçların meydana gelen yangınlarla örtüştürülerek sonuçların çevresel etkiler altındaki yapılarda ne tür

değişkenler gösterdiğinin ortaya çıkarılması önem taşımaktadır. 2010-2021 yılları arasında meydana gelen cephe yangınları incelendiğinde havalandırmalı giydirme cephe sistemine sahip binaların büyük oranda yer tuttuğu görülmüştür.

Havalandırmalı giydirme cephe sisteminin yangın esnasında oluşturabileceği risklerin belirlenmesi, tasarım ve üretim aşamalarında, cephelerde pasif yangın güvenlik önlemlerinin alınmasında büyük rol oynamaktadır. Bu nedenle çalışmada, havalandırmalı giydirme cephelerde pasif yangın güvenlik önlemleri kapsamında yapılan deneysel çalışmalar araştırılmış, elde edilen bilgiler doğrultusunda 2010-2021 yılları arasında havalandırmalı giydirme cepheye sahip binalarda meydana gelen beş farklı yangın olayı incelenmiş ve yorumlanmıştır.

Çalışmada incelenen deneysel çalışmalar ve meydana gelen yangın olaylarına göre, özellikle yüksek binalarda yangının hızlı bir şekilde yayılmasına ve büyümesine, cephe sistemindeki kaplama malzemesi, yalıtım malzemesinin cinsi ve kalınlığı, hava boşluğu genişliği, yangın bariyerinin düşünülmemesi, montaj detayları, çevresel etkenler (rüzgâr, vb.), yapının formu bir bütün olarak etki etmektedir.

İncelenen deneyler ve meydana gelen yangın olayları karşılaştırıldığında, yangın yayılım dinamiği ve hızındaki farklılığı etkileyen unsurların başında deney düzeneklerinin geometrik yapısı, malzemelerin montaj şekilleri, malzeme çeşitliliği, yangın bariyerleri arasındaki mesafe, düzeneğin bulunduğu hava koşulları ve brülör özelliklerinin geldiği görülmektedir. İncelenen deneyler ile meydana gelen yangınlardaki cephe katmanlarının farklı olduğu gözlemlenmiştir. Meydana gelen yangınlardaki cephelerde; kaplama malzemesi, ısı yalıtım malzemesi, yangın bariyeri dışında birçok katman vardır. Bu katmanlar (membran, ankraj vb) minör olarak görülseler de ısı iletimi ve ikincil yangın çıkarmada aktif rol oynayabilirler. Diğer bir etken ise deney düzeneğinin yan taraflarının kapatılmasıdır. Bu durum gelen hava akışını kısıtlamak için önemli bir etken olup yangının ana unsurlarından biri olan oksijen miktarının cepheye girişini kontrol etmektedir. Oksijenin cepheye bir başka giriş şekli ise cephe kaplamasında bulunan derz boşluklarıdır. Bu boşlukların kısıtlanmış veya kısıtlanmamış olması cepheye giren oksijen miktarını kontrol etmektedir. Deneylerin yapıldığı mekânın ve hava koşullarının yangının yayılımı konusunda etkisi büyüktür. Gerçek zamanlı yangınlarda olay esnasındaki rüzgâr şiddeti ve yönelimi alevlerin yönünü ve hızını değiştirebilmektedir. Cephe geometrisi de yangın yönelimini etkilemekte ve arttırabilmektedir. Hava boşluğunun doğru konumlardan bölümlendirilmesi yangının ilerleyişini yavaşlatabilir veya tamamıyla durdurabilmektedir. Aynı zamanda, bazı test standartlarında deney düzeneklerinin gerçek cephe ölçeğindeki kat yükseklikleriyle yapılmaması meydana gelen yangınlara karşılaştırıldığında yayılım hızında görülen farkları açıklamaktadır.

Çalışma malzeme kombinasyonlarının oluşturduğu sonuçlar hakkında deneysel çalışmalar ve meydana gelen yangınlar arasında tasarımcılara yol gösterici ortak veriler barındırsa da deney sonuçlarının yangının ilerleme hızı ve yayılımı ile ilgili olarak meydana gelen yangınlar ile örtüşmediği açıktır. Bu nedenle, yangın deneylerinin kapsamı ve parametreleri genişletilerek yapıya özgü riskli görülen detayların bütüncül bir şekilde tüm malzemeler ile test edilmesi, deneyler esnasında rüzgâr ve farklı hava koşulları gibi çevresel etkenlerin simülasyonlarının yapılması çıkan sonuçlara göre daha sağlıklı yangın güvenlik önlemlerinin alınmasını sağlayacaktır. Bu doğrultuda tasarımcılara, üreticilere ve uygulayıcılara yol gösterici olması açısından daha kapsamlı test standartlarının ve imkanlarının geliştirilmesi önem taşımaktadır.

Etik Standart ile Uyumluluk

Çıkar Çatışması: Yazarlar herhangi bir çıkar çatışmasının olmadığını beyan eder.

Etik Kurul İzni: *Bu çalışma için etik kurul iznine gerek yoktur.*

Finansal Destek: *Yoktur.*

KAYNAKÇA:

- Alpert, R.L. & Ward, E.J. (1984) Evaluation of unsprinklered fire hazards. *Fire Safety Journal*, 7 (2), 127–143.
- Badrock, G. & Bryant, R. (2014). Post incident analysis report, (Report No. 1403134A) MFB. https://www.ife.org.uk/write/MediaUploads/Incident%20directory/Lacrosse%20Docklands%20-%202014/Melbourne_high_rise_fire_25_Nov_2014_post_incident_report_Redacted.pdf.
- Badrock, G. (2016) Post incident analysis report: Lacrosse Docklands, 25 november 2014. *EDP Sciences, Avustralya*, 46, 06002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164606002>.
- Bonner, M., Wegrzynski, W., Papis, B. K., & Rein, G. (2020). KRESNIK: A top-down, statistical approach to understand the fire performance of building facades using standard test data. *Building and Environment*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106540>.
- BRE Global Ltd. (2019). Ministry of housing, communities and local government final research report, fire performance of cladding materials research-appendix a literature review, building research establishment, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/877514/MHCLG_CCZZ17A36_Final_Research_Report_Appendix_A_P111324-1019__D12V1_.pdf.
- Chapman, A. (2018, Ocak 14). Grenfell Tower: the government’s responsibility for the fire. *The River of Life*. <http://theriveroflife.com/2018/01/14/grenfell-tower-the-governments-responsibility-for-the-fire/>.
- Chen, T., Yuen, A., Yeoh, G., Yang, W. & Chan, Q. (2019). Fire risk assessment of combustible exterior cladding using a collective numerical database. *Fire*, 2 (11), 1-14. <https://doi.org/10.3390/fire2010011>.
- Čolić, A., & Pečur, I. B. (2020). Influence of horizontal and vertical barriers on fire development for ventilated façades. *Fire Technology*, 56(4), 1725–1754. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-00950-w>.
- Dosne, R. (2021). Un air de tour infernale à Roubaix, *Retour D’experience*, 486, 35-38.
- Faudzi, B. M. & Dodd, S. (2021). Qualitative assessment of fire hazard posed by laminated glass balcony balustrades on fire spread. *Fire Technology*, 57(4), 1951-1967. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01085-8>.
- Garden, G.K. (1963). Rain penetration and its control, *Canadian Building Digest* 40. Division of Building Research, National Research Council Canada. <https://doi.org/10.4224/40000854>.
- Genco, G., (2015, Nisan). Lacrosse Building Fire, City of Melbourne.
- Gonzalo, C., Paurine, A. & McCann, F. (2018, Nisan 12-13). Improving the fire resistance of ventilated cladding systems via air cavity replacement, *CIBSE Technical Symposium [Conference*

presentation abstract]. London, UK. <https://www.cibse.org/knowledge-research/knowledge-portal/improving-fire-resistance-of-ventilated-cladding-panels>.

Goodenough, T. (2012, Temmuz 17). Towering inferno of İstanbul: Forty-two storey skyscraper is engulfed by blaze. Dailymail. <https://www.dailymail.co.uk/news/article-2174853/Polat-Tower-Firefighters-huge-blaze-engulfed-150m-Istanbul-skyscraper.html>.

Grauer, M. (2019). Ventilated rainscreen cladding system subframe contribution to annual source energy use mid-size Office building. *Energy&Buildings*, 187, 269-280. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.010>.

Guillaume, E., Fateh, T., Schillinger, R., Chiva, R.& Ukleja, S. (2018). Study of fire behaviour of facade mock-ups equipped with aluminium composite material-based claddings, using intermediate-scale test method. *Fire Mater*, 42(5), 561–577. <https://doi.org/10.1002/fam.2635>.

Guillaume, E., Drean, V., Girardin, B., Benameur, F.& Fateh, T. (2019). Reconstruction of Grenfell Tower fire. Part 1: lessons from observations and determination of work hypotheses. *Fire and Materials*, 44(1),3-14. <https://doi.org/10.1002/fam.2766>.

Kesik, T.J. (2016). Moisture management strategies, Whole building design guide, <https://www.wbdg.org/resources/moisture-management-strategies>.

Kim, Y., Mizuno, M. & Ohmiya, Y. (2011). Fire examination of superhigh-rise apartment building “Wooshin Golden Suites” in Busan, Korea. *Fire Science and Technology*, 30 (Special Issue), 81-90. <https://doi.org/10.3210/fst.30.81>.

Koohkan, M., Guillaume, E., Drean, V., Girardin, B., Benameur, F.& Fateh, T. (2019). Reconstruction of Grenfell Tower fire. Part 3- numerical simulation of the Grenfell Tower disaster: Contribution to the understanding of the fire propagation and behaviour during the vertical fire spread. *Fire and Materials*, 44(1), 35-57. <https://doi.org/10.1002/fam.2763>.

Korkmaz, E. (2016). Mimarlık eğitiminde yangın güvenli tasarımı yeri. *Megaron*, 11(2), 217-229.

Lane, B., (2017, Haziran 14). Phase 1 Report- Section 10 Routes for vertical and horizontal fire spread throughout the building envelope. <https://assets.grenfelltowerinquiry.org.uk/>.

Livkiss, K, Svensson, S., Husted, B. & van Hees, P. (2018). Flame heights and heat transfer infacade system ventilation cavities. *Fire Technology*, 54, 689–713. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0706-2>.

Metal Construction Association. (2014). Understanding Rain Screen Wall Systems [White Paper].

McNamee, R., Boström, L., Skarin, C. & Duny, M. (2016). Fire test of ventilated and unventilated wooden façades. *SP Report*, 16, 1-79.

Ondrus, J. & Pettersson, O. (1986). Fire hazard of facades with externally applied additional thermal insulation full scale experiments. Lund Institute of Thechnology, Report LUTVDG/ TVBB-3025, 1-56.

Öymen, T. (1985). Yangın davranışlarını belirleyen bazı etkenler ve kantitatif yaklaşımlar. İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 35(2), 82-88.

- Peng, L., Ni, Z. & Huang, X. (2013). Review on the fire safety of exterior wall claddings in high-rise buildings in China. *Procedia Engineering*, 62, 663–670. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.112>.
- Jones, N., Peck, G., McKenna, S.T., Glockling, J.L., Harbottle, J., Stec, A.A. & Hull, T.R. (2021). Burning behaviour of rainscreen facade. *Journal of Hazard Materials*, 403 (123894), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123894>.
- Recatala, A.M. (2017). Proposal for a new test methodology for assessing the performance of rear-ventilated façades against wind-driven rain (WDR) and driving rain wind pressures (DRWP), [Pulication No. 55783671] [Doktora tezi, Universidad Politecnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.48530>.
- Sharma, A. & Mishra, K.B. (2021). Experimental investigations on the influence of ‘chimney-effect’ on fire response of rainscreen façades in high-rise buildings. *Journal of Building Engineering*, 44 (103257), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103257>.
- Soğukoğlu, M. & İnce, A. (2013). Yüksek binalarda yangın güvenliği açısından dış cephe yalıtım ve kaplama malzemeleri [Conference presentation abstract] Yangın Güvenlik Sempozyumu ve Sergisi, TÜYAK.
- Sözen, Ş. M. (2001). Yapı kabuğunda ısı ve ses yönünde denetim-konfor ilişkisi. *Tesisat Mühendisliği*, (61), 74-79.
- Tabadkani, S.A., Sadrolodabae, P. & Khanjanzadeh, M. (2015). Innovative bioclimatic european school complex. [Yüksek Lisans Tezi, Politecnico di Milano Üniversitesi].
- Taylor, W. & Choi, K. K. (1984). Combustibility of insulation in cavity walls. *Fire Sciences*, 2 (3), 179-188. <https://doi.org/10.1177/073490418400200303>.
- URL-1. Cupapizarras Facade Company, What is rainscreen cladding system and what are the advantages? <https://www.cupapizarras.com/int/news/what-is-rainscreen-cladding-advantages>. (Erişim Tarihi: 03 Şubat 2022).
- URL-2. <https://www.greenspec.co.uk/building-design/rainscreen-cladding/>. (Erişim tarihi:15 Şubat 2022).
- URL-3. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_high-rise_facade_fires. (Erişim Tarihi: 10 Haziran 2022).
- URL-4. <https://www.abc.net.au/news/2019-02-28/lacrosse-apartment-owners-win-5.7-million-cladding-fire-damages/10850>. (Erişim tarihi: 20 Haziran 2022).
- URL-5. <https://www.bbc.com/news/uk-48211833> (Erişim tarihi 7 Nisan 2022).
- URL-6 <https://stonesizepanels.com/ventilated-facade> (Erişim tarihi: 02 Ağustos 2022).
- URL-7. <https://gcoe.tus-fire.com/eng/ffsa/cat50.html> (Erişim Tarihi: 22 Temmuz 2022).
- URL-8 <https://news.imaail.com/page/view/2010100209243417851?ismobile=true> (Erişim Tarihi: 10 Eylül 2022).
- URL-9. https://www.tesisat.com.tr/yayin/216/polat-tower-residencein-yangin-sistemi-ile-entegre-bina-otomasyonu-sistemi_6149.html#.YxMvRnZByUn. (Erişim Tarihi 12 Mart 2022).

URL-10 <https://www.posta.com.tr/gundem/polat-tower-yangininin-sebebi-belli-oldu-133274>. (Erişim Tarihi: 15 Nisan 2022).

URL-11 Polat Tower yangını CDF modellemesi. <https://www.youtube.com/watch?v=RpaI8Fu4Ojk>. (Erişim tarihi: 12 Haziran 2022).

URL-12. https://www.abc.net.au/news/2019-02-28/lacrosse-apartment-owners-win-5.7-million-claddingdamages/10857060?utm_campaign=abc_news_web&utm_content=link&utm_medium=content_shared&utm_source=abc_news_web. (Erişim tarihi: 10 Mayıs 2022).

URL-13. <https://www.thesun.co.uk/news/3864036/hundreds-of-high-rises-across-britain-have-grenfell-tower-style-cladding-leaving-thousands-of-families-living-in-fear/> (Erişim Tarihi: 2 Haziran 2022).

URL-14. <https://www.belfasttelegraph.co.uk/news/uk/grenfell-tower-inquiry-report-delay-branded-disgraceful-38122113.html> (Erişim Tarihi: 3 Haziran 2022).

White, N., Delichatsios, M., Ahrens, M. & Kimball, A. (2013, Kasım 29). Fire hazards of exterior wall assemblies containing combustible components [Conference presentation abstract] MATEC Web of Conferences vol. 9, Fransa, Paris. <https://www.matec-conferences.org/>.

Wood, S.D. (2018, Mart 22-27). CBST, Vented cladding assemblies prevent reverse vapor drive and allow vapor-permeable water-resistive and air barrier (WRB/AB) membranes to enhance Wall assembly drying [Conference presentation abstract]. 33rd RCI International convention and trade Show, Washington-Amerika Birleşik Devletleri. <https://vaproshield.com/images/pdf/2018-cts-wood.pdf>.

EXTENDED SUMMARY

Research Problem:

The purpose of the study is reveal the extent to which the tests and real-time fire incident match by comparing the results of the laboratory tests (in the absence of many environmental factors) with the fire spread dynamics of real-time fires.

Research Questions:

In the study, answer to 2 basic questions were sought. Firstly, how is the progress of fire dynamics in the ventilated curtain wall (Rainscreen) system? Secondly, do the real time fires data and the academic test results match?

Literature Review:

Facade fires have increased sevenfold in 30 years, reaching an average of 4.8 facade fires per year [6,7]. This rate has increased rapidly since 2010. In the examinations made, it was observed that 21 of the 41 facade fires that occurred between 2010 and 2021 occurred in ventilated curtain walls, and 11 of them did not have any registered facade information. When we look at the fire rates in these buildings, it is seen that the fires in the buildings with ventilated curtain walls constitute %51 of all facades in Table 2.1, and % 70of the buildings with known facade systems (Figure 1.2). The fact that most of the facade fires occur in ventilated curtain walls and have dangerous consequences reveals the deficiencies in the methods of designing the interaction of the fire with the facade and emphasizes the necessity of further studies.

These are many studies in the literature examining facade fires in high-rise buildings. In 1968 Ondrus and Pettersson tested 13 different materials and details configurations [xx]. The effect of structural detailing and material combinations on the flammability performance of the system was investigated. In 1984, W. Taylor conducted various experiments to find the effect of using foam insulation materials with different flame spread degrees on ventilated curtain walls on fire spread and to determine its relationship with the air gap [29]. In 1984, Alpert et al. investigated the vertical spread fire [21]. In the study conducted by Robert McNamee in 2016, he finds the difference in the effect of flammable facade claddings with and without air gap on flame spread [22]. In 2018, Livkiss et al. conducted a study on two non-combustible sheet and the differentiation of the width of the air gap between these sheet [23].

Guillaume et al., on the other hand, discussed the related between material and air gap in their study in 2018 [25]. In 2020, Colic and Pecur conducted a series of experiments purposed at demonstrating the importance of using horizontal and vertical fire barriers in air spaces in ventilated curtain walls. In Sharma and Mishra in 2021, combinations of aluminum facade cladding and insulation materials with different flammability levels with or without air gaps were created and the difference was compared, and the chimney effect was investigated [26]. In the experiment conducted by Jones et al. in 2021, four experiments were carried out with non-flammable ACM-A2 and ACM-PE in a way to keep the position of the fire barriers constant, and the effect of the cladding and insulation material and the air gap was investigated [27]. However, there is no study in the literature comparing fire spread tests conducted within the scope of academic studies and fire dynamics in fire that occur.

Methodology:

In order to understand how ventilated curtain wall systems, behave during a fire, and which elements affect the progression and spread of the fire along the facade, the literature was searched, and academic experimental studies were examined. In the light of information obtained, in order to evaluate the factors affecting the fire spread in the fires that occurred between 2010-2021; five major fire that occur with and without fire barrier, fire spread time and insulation material were selected and analyzed within the scope of study. In this context, the results of the tests in the laboratory environment and the spread dynamics of real-time fire were compared and the extent to which they matched was revealed.

Results and Conclusions:

According to the experimental studies examined in the study and the fire events that occurred, the rapid spread and growth of fire, especially in high-rise buildings, the cladding material in the facade system, the type and thickness of the insulation material, the width of the air gap, the failure to consider the fire barrier, the mounting details, the environmental factors (wind, etc.), the form of the building affects as a whole. It is seen that the geometric structure of the experimental setups, the assembly types of the materials, the variety of materials, the distance between the fire barriers, the weather conditions in which the device is located, and the characteristics of the burner are among the factors affecting the difference in fire spread dynamics and speed. It has been observed that the facade layers in the fires that occur with the examined tests are different. On the facades of the fires; there are many layers other than cladding material, thermal insulation material, fire barrier. Although these layers (membrane, anchor etc.) are seen as minor, they can play an active role in thermal conduction and secondary fire. Another factor is the closure of the sides of the tests setup. This is an important factor for restricting the incoming air flow and controls the amount of oxygen, which is one of the main elements of the fire, to enter the facade. Another way of entry of oxygen to the facade is the joint gaps in the facade cladding. The fact that these spaces are restricted or unconstrained controls the amount of oxygen entering the front. The place where the experiments are carried out and the weather conditions have a great effect on the spread of the fire. In real-time fires, the wind intensity and orientation during the incident can change the direction and speed of the flames. Facade geometry can also affect and increase fire orientation. Compartmentation of the air space from the correct positions can slow down or completely stop the progress of the fire. At the same time, in some test standards, the fact that the experimental setups are not made with the real facade scale storey heights explains the differences in the propagation speed compared to the fires that occur.

The study contains common data guiding designers between experimental studies and fires about the results of material combinations, but it is clear that the test results do not match with the fires that occur in relation to the rate of fire speed and spread. For this reason, by expanding the scope and parameters of fire tests, testing the building-specific risky details with all materials in a holistic way, and simulating environmental factors such as wind and different weather conditions during the experiments, will ensure that healthier fire safety measures are taken according to the results. Therefore, it is important to develop more comprehensive testing standards and facilities to guide designers, manufacturers and practitioners.