

YER ALTI ARAÇ OTOPARKLARINDA JET FAN TİPİ VE FARKLI HAVA DEĞİŞİM SAYILARINA GÖRE YANGIN SENARYOSUNUN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE İNCELENMESİ

Mustafa Sinan BAKIR *^{ID}
Kemal Furkan SÖKMEN **^{ID}

Alınma: 26.04.2022; düzeltme: 27.08.2022; kabul: 29.08.2022

Öz: Bu çalışmada kapalı bir otoparkın BS 7346-7, 2013 standardına göre 4 MW yangın yükü altında yangın analiz sonuçları incelenmiştir. On ve 15 hava değişiminin, radyal ve aksel jet fan kullanımının yangın üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Analizler PyroSim yazılımında yapılmıştır. Analizlerde eleman sayısından bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Türbülans modeli olarak büyük girdap simülasyonu (BGS) modelini kullanılmıştır. On hava değişimli analizlerde radyal jet fanlı sonuçları; hava hızı 0,9154 m/s, ortalama sıcaklık 40,13°C, CO gaz seviyesi 100 ppm. Aksel fanda; hava hızı 0,9176 m/s, ortalama sıcaklık 38,02°C, CO gazı seviyesi, 61,5 ppm, görüş mesafesi sonuçları elde edilmiştir. Görüş mesafesi her iki fan için 3 m ve elde edilmiştir. On beş hava değişimli analizde radyal fan sonuçları hava hızı 1,324 m/s, ortalama sıcaklık 29,98°C elde edilirken aksel jet fanda hava hızı 1,318 m/s, ortalama sıcaklık, 28,15°C olarak elde edilmiştir. Görüş mesafesi ve CO miktarı her iki fan için 30 m ve 1 ppm olarak tespit edilmiştir. Çalışmada 10 hava değişim oranının CO oranı ve görüş mesafesi açısından yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Fan farklılığının ise çok etkili olmadığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yeraltı otopark, Jet Fan, Yangın Analizi, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), Yangın Dinamiği Simülatörü (YDS), Hava Değişim Sayısı

Investigation of Fire Scenario According to Jet Fan Type and Different Air Exchange Number in Underground Vehicle Parking Areas with Computational Fluid Dynamics

Abstract: In this study, fire analysis results of a closed car park under 4 MW fire load according to BS 7346-7, 2013 standard were examined. The effects of 10 and 15 air changes, the use of radial and axial fans on the fire were investigated. Analysis were made in PyroSim software. Mesh independence was studied. Large Eddy Simulation model was used as turbulence model. In the analyzes with 10 air changes, the results of the radial fan; velocity was 0.9154 m/s, ave. temperature was 40.13°C, CO gas level is 100 ppm. For axial fan, velocity was 0.9176 m/s, ave. temperature is 38.02°C, CO gas level 61.5 ppm, visibility results were obtained. Visibility distance of 3 m for both fans was obtained. In the analysis with 15 air changes, the results of the radial fan; velocity were 1,324 m/s, ave. temperature was 29.98°C. For axial jet fan velocity was 1,318 m/s and ave. temperature was 28.15°C. Visibility distance and CO amount were determined as 30 m and 1 ppm for both fans. In the study, it was determined that 10 air changes was insufficient for CO rate and visibility. It has been determined that the axial fan is more effective.

Keywords: Underground parking lot, Jet Fan, Fire Analysis, Computational Fluid Dynamic (HAD), Fire Dynamics Simulator (YDS), Air Change Number

* Bursa Valiliği, Enerji Yönetim Birimi, 16220, Osmangazi/Bursa

** Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16330, Yıldırım/Bursa

İletişim Yazarı: Kemal Furkan SÖKMEN (furkan.sokmen@btu.edu.tr)

1. GİRİŞ

Şehirlerde yükselen araç sayısı ile beraber birçok yer altı otoparkları sayısı artmıştır. Bu durum otoparkların güvenliğini geçmişe göre daha önemli hale getirmiştir. Kapalı otoparkların yangın sistemlerinin değişmesine ve farklılaşmasına sebep olmuştur. Bu sistemler ilk olarak insan sağlığına zararlı olan gazların (CO, CO₂, Benzen vb.) tahliyesini hedeflerken ikinci olarak yangın durumunda insanların kaçışına, sıcak duman gazlarının tahliye edilmesi, itfaiye personelinin yangına müdahalesini kolaylaştırmayı hedeflemektedir (Bakır, 2019). 09.07.2015 tarihli ve 29411 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan “Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmeliğe göre 2000 m²’den büyük ve kapalı otoparklarda zorunlu olarak yapılması gereken mekanik havalandırma ve duman boşaltım sistemlerinin tasarımları kanallı ve jet fanlı sistemler olarak 2 farklı şekilde belirtilmiştir (T.C.Resmi gazete,2015)

Kanallı havalandırma sistemlerinin kurulum, maliyet, enerji gibi konularda dezavantajlı olması daha yenilikçi ve ergonomik olan itki havalandırma sistemlerinin özellikle son dönemlerde oldukça yaygınlaşmasına yol açmıştır. Jet Fanlar vasıtası ile kapalı otoparklarda tesis edilen itki havalandırma sistemleri ülkemizde ise son 11-12 yılda oldukça yaygın bir şekilde talep görmektedir (Bakır, 2019).

Chow (1998) çalışmasında 27 araçlık kapalı otoparkta kanallı tip havalandırma ile yangın simülasyonu yapmıştır. Beş MW’lık bir yangın yükü için ilk olarak saatte 6 hava değişimi çalışılmıştır. Duman kontrolü için çeşitli tasarımlar ve yağmurlama başlıklarının ısı hassasiyeti değerlendirilmiştir. Çalışmada saat başına hava değişim oranları artırıldıkça hava kalitesi arttığı tespit edilmiştir (Chow, 1998). Yine bazı çalışmalarda otoparklarda yangın gelişimini gözlemlemek adına bir dizi deney yapılmıştır. Her bir deney farklı otoparklarda, farklı konumlarda ve farklı yükseklikleri içeren yangın senaryolarıyla yapılmış ve her deneyde ısı salınım oranı (ISO) incelenmiştir (Joyeux, 1997; Keski-Rahkonen ve Mangs, 1994a; Keski-Rahkonen ve Mangs, 1994b; Kruppa ve Zhao, 2004; Shipp ve Spearpoint, 1995).

Yangın güvenliği açısından Avrupa’da iki büyük araştırma projesi yürütülmüştür (Merci ve diğ, 2011; Shipp, 2010). Modern araç tasarımında plastik parça kullanımının artması, elektrikli araçların ürün yelpazesine girmesi özellikle LPG gibi alternatif yakıtlarla çalışan otomobillerin otoparklara girmesi yangın riski arttırmış ve farklı bir boyuta getirmiştir. Jet fanları araç parkının tavanı üzerine asarak kanal sistemine olan ihtiyacı ortadan kaldırmıştır (Lu ve diğ, 2011). Jet fanlar dumanı veya egzozdan çıkan pis havayı boşaltmak için gerekli momentumu oluşturup otoparkların çevresindeki şaflara yerleştirilirler. Otoparkın genel geometrisi oldukça karmaşıktır. Bu nedenle fanlarının konumu, yönü ve hızları gibi etkenlerin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekir. Aveiro ve Viegas, (2010) havalandırma tasarımının değerlendirilmesinde tamamlayıcı ve yardımcı bir araç olan HAD metodu kullanarak jet fanlarının örnek bir kapalı otoparkta yangın senaryosunda değerlendirmek için ücretsiz bir kod (YDS-Yangın Dinamiği Simülatörü) kullanılarak elde edilen sonuçları deneylerle karşılaştırmıştır (Aveiro ve Viegas, 2010).

Merci ve arkadaşları, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) metodundan faydalanarak zorlamalı mekanik yatay havalandırma ile tam ölçekli otopark yangın simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada duman ve ısı kontrolü (DIK) sonuçları incelenmiştir, DIK sisteminin yangın koşullarında duman hareketi üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Duman tahliye oranının iyileştirilmesinin, iç hava dolaşımı bölgesinde duman sıkışmışsa dumanı uzaklaştırmaya yardımcı olmadığını bulmuşlardır (Merci ve diğ, 2013). Lu ve diğerleri, kapalı otopark duman tahliye sistemini, jet fan sayısı, jet fan hızı, duman boşaltma akış hızı ve yangın konumu gibi parametreleri değiştirerek araştırma yapmıştır. Ayrıca, yüksek jet fan hızlarının dumanın devridaimine neden olabileceğini belirtmiştir. Çalışmada sonuçlar, itki havalandırma sisteminin duman kontrol kapasitesinin jet fan sayısı ve atış debisi ile ilişkili olduğunu göstermektedir (Lu ve diğ, 2011). İstanbul’da bulunan sekiz katlı büyük bir iş merkezinin havalandırma ve yangın analizi, ticari HAD programı yardımıyla araştırılmıştır. Çalışmada kapalı otoparkın sıcaklık, hava akışı oranı, duman yoğunluğu ve görünürlük değerleri incelenmiştir (Senveli ve diğ, 2015).

Kapalı otopark HAD analizlerinde en önemli konulardan biri analizde kullanılacak türbülans modelidir. Khatoon ve Shah, k-epsilon ve Spalart-Allmaras türbülans modellerini kullanarak kapalı otoparkın hız sınırlarını yılın ayları boyunca göstermiştir. Ayrıca, HAD yöntemini kullanarak günün saatlerine göre CO seviyelerini göstermiştir (Khatoon ve Shah, 2016). Umamaheswararao, Riyad, Suudi Arabistan'da bulunan hastane otopark katında iki farklı jet fan yerleşim senaryosu çalışmış olup karbonmonoksit (CO) seviyelerini karşılaştırmıştır. Jet fan sayısının 8'den 11'e çıktığında karbonmonoksit seviyelerinin düştüğünü gözlemlemiştir (Umamaheswararao, 2017). A. Bacak (2017), yaptığı çalışmada Yangın Dinamiği Simülatörü 6.1.2'yi kullanarak 115 m uzunluğunda, 57 m genişliğinde ve 3,5 m yüksekliğinde bir kapalı otoparkta üç farklı yangın konumunda BS-7346-7:2013 standardına göre hız, sıcaklık, görüş mesafesi ve CO sonuçları için HAD analizleri yapmıştır. Üç farklı araç konumuna göre birer tane analiz yapmış olup; otoparkın ortasında ve duvarın yanında bulunan yanan araç ile gerçekleştirilen birinci analizde hız 5 m/s, görüş mesafesi 10 m, sıcaklık 35°C ve CO gazı seviyesi 10 ppm görülmüştür. Taze hava besleme bacasının yakınında bulunan yanan araç ile gerçekleştirilen ikinci analizde hız 4,5 m/s, görüş mesafesi 10 m, sıcaklık 69°C ve CO gazı seviyesi 20 ppm görülmüştür. Sadece otoparkın ortasında yanan araç ile gerçekleştirilen üçüncü analizde hız 5 m/s, görüş mesafesi 10 m, sıcaklık 33°C ve CO gazı seviyesi 9,5 ppm görülmüştür. Bu kapalı otopark modelinde; birim sayısal ağ boyutu 0,25 m kullanarak HAD analizinde toplamda 1.461,880 dörtgen hücreler ile çalışmıştır (Bacak, 2017; Bakır, 2019). Başka bir çalışmada sistem tasarımında jet fanlar arasındaki mesafe ve konum kısıtları HAD metodu ile araştırılmıştır (Viegas, 2009). Yine Viegas (2006)'da HAD metodu ile hava değişim hızının jet fan akış düzenine etkisi de incelenmiştir Bütün bu çalışmaları destekleyici kapalı otoparklarda duman kontrolü ve havalandırması inceleyen birçok çalışma yayınlanmıştır (De Smedt ve Morgan, 2004; Saraiva ve Viegas, 2001, 2002; Viegas, 2006). 28. Sultansu ve Onat, günlük havalandırma için CO konsantrasyonu ve hava hızı parametreleri farklı araç doluluk oranlarında incelemiştir. Sonuçlarında, araçların yoğun konumlandığı bölgelerde hava hızının azaldığı ve CO gazının daha uzun sürede egzoz edildiği gözlemlemiştir. Yangın analizlerinde, aynı parametreler farklı jet fan asma yüksekliklerine göre analiz etmişlerdir. Yangın havalandırması sonuçlarına göre, jet fanların asıldığı yükseklik arttırıldığında, hava hızı profillerinin dağılımının değiştiği ve CO gazının daha uzun sürede egzoz edildiği gözlemlemiştir. (Sultansu, S. ve Onat, A. 2020). Çakır ve Ün, Isparta Şehir Hastanesi'nin 5 farklı zon ile ayrılmış olan kapalı otoparkının ANSYS 18.2 yazılımı ile 4 MW'lık yangın yükü ile HAD analizi yapmıştır. (Çakır ve Ün, 2020).

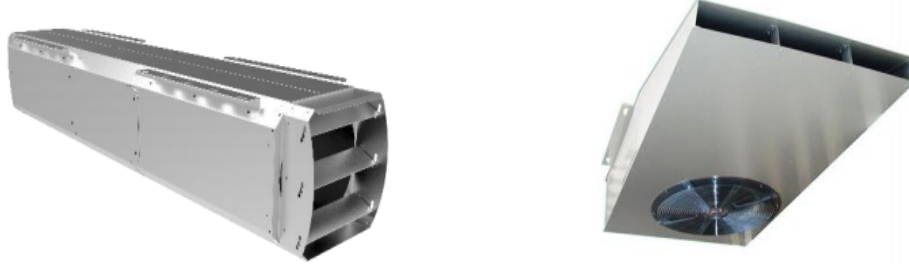
Dünya'da ve Türkiye'de araç sayısının artışı, kapalı otopark sayılarının artmasına yüksek sayıda aracın otoparklarda uzun ya da kısa süreli kalmasına sebebiyet vermektedir. İçten yanmalı motorlu, fabrika çıkışlı LPG'li ve son teknolojiyle beraber elektrikli araçların kapalı otoparklarda bulunması sıcaklık ve teknik arıza kökenli yangınlar için risk oluşturmaktadır. Otoparklarda çıkan yangınların sebep olabileceği kayıplar, çevreye ve insanlara vereceği zarar açık alanda çıkacak yangınlara göre daha tehlikelidir. Bu sebeple kapalı otoparklarda uygulanacak yangın söndürme ve yangından korunma önlemleri oldukça önemlidir.

Literatürde ve uygulamalarda yangın simülasyonları ve projeleri BS-7346-7:2013 standardının, Ulusal Yangın Mevzuatına göre 10 hava değişimi üzerinden yapılmakta ve uygulanmaktadır. Bu çalışma Standart ve mevzuatlarda belirtilen 10 hava değişiminin yetersizliğini ortaya koyarken fan çeşitliliğini de dikkate alarak yangın üzerindeki etkilerini araştırmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

AMCA 99-0066 standardına göre fan, hava veya gazları taşımak için tahrik edilen bir çark tarafından enerji verilen bir makine olarak tanımlanır. Fanlar genel olarak, havanın çark üzerinden akış doğrultusuna bağlı olarak, eksenel ve radyal tip olarak sınıflandırılır (Şekil.1 a). Eksenel tip fanlarda basınç farkı oluşturularak meydana gelen havanın hareketi eksenel yöndedir. Radyal tip

fanlarda basınç farkı oluşturularak meydana gelen havanın hareketi merkezkaç kuvveti doğrultusundadır. Radyal fan, emme yönü ve basınç yönü dik olan fanıdır ve havayı pozitif veya negatif olarak basınçlandırır (Şekil 1.b) (Bakır, 2019).



Şekil 1:
Jet fan tipleri

a. Eksenel Jet Fan

b. Radyal Jet Fan

Eksenel jet fan gibi, radyal jet fan da araba yangını sırasında yüksek hızda kullanılır ve duman tahliyesi için kullanılır (CVS Air Bilimsel Teknik Bülten, Sayı 1, 2016). Fan Kanunları herhangi bir çalışma koşulunda fan performansını belirleyebilen bir seri denklemdir. Öte yandan, fan kanunlarını kullanmak için başlangıç noktası olarak çalışmanın herhangi bir koşulunun bilinmesi gerekir. Bu koşullar altında Fanlar: Özellikleri ve Analiz, Alarko-Carrier Teknik Bülten, Sayı 24, 2007 belirtilen fan kanunları kullanılabilir (Bakır, 2019).

2.1. Otopark Hacim Hesabı ve Debilerinin Belirlenmesi

Kapalı otoparklarda hacim (V) hesabı yapmak için net alan (A) ve kat yüksekliği (H) gibi nicel verileri kullanarak aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$V = A \times H \quad (1)$$

Günlük (CO) havalandırma debisi (Q_1) için bir saatteki hava değişim kat sayısı 6 d/h olup;

$$Q_1 = V \times 6 \quad (2)$$

Yangın anındaki havalandırma debisi (Q_2) için bir saatteki en az hava değişim katsayısı 10 d/h olup;

$$Q_2 = V \times 10 \quad (3)$$

Hava değişim katsayıları BS 7346-7 standardından alınmıştır.

2.2. Bacalardaki Fanların Seçimi ve Hesabı

Duman atış fanı (DAF) debisi;

$$DAF = Q_2 \times 0,5 \quad (4)$$

Duman atış debisi BS 7346-7 gereğince %50 yedeklenmektedir.
Taze hava besleme fanı (THBF) debisi;

$$THBF = Q_2 \times 0,5 \quad (5)$$

THBF debisi, DAF debisinin %50-%70'i aralığında alınır.

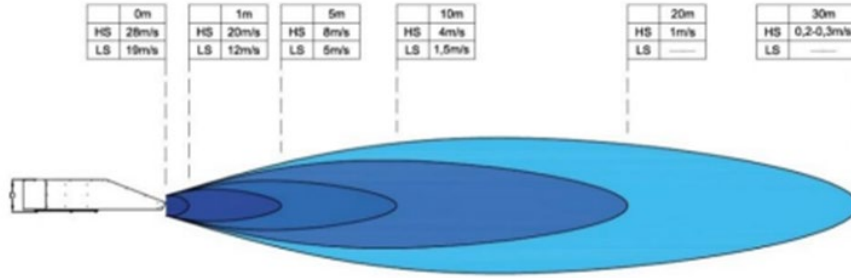
Duman atış fanları ve jet fanlar Tablo.1’de verilen TS/EN 12101-3 standardına uygun bir yangın dayanım sınıfından seçilir.

Tablo 1. TS/EN 12101-3 standardına göre yangın dayanım sınıfları

Sınıf	Sıcaklık (°C)	Minimum Dayanım Süresi (dk)
F200	200	120
F300	300	60
F400	400	120
F600	600	60
F842	842	30

2.3. Jet Fanların Seçimi ve Yerleşimi

Otopark yüksekliği ve uzunluğu dikkate alınarak optimum itme gücüne sahip jet fan seçilir. Jet fanların itme gücüne bağlı olarak havayı süpürme mesafeleri ürün kataloglarında mevcuttur. Süpürme mesafelerine göre fanlar; paralel ve seri olarak mimari kat planına uygun şekilde yerleştirilir. Radyal jet fanlar yükseklik avantajı sağladığından tek yönlü çalışmalarda tercih edilir. Şekil 2’de örnek bir radyal jet fanın süpürme mesafesi gösterilmiştir.



Şekil 2:
Örnek bir radyal jet fanın süpürme mesafesi

İtme kuvveti hesabı Eşitlik.6’ya göre yapılmaktadır.

$$F = V_f \times Q \times \rho \quad (6)$$

F= İtme Kuvveti (N)
V_f = Fan hızı (m/s)
Q_f= Fan Debi (m³/s)
ρ = Hava yoğunluğu (kg/m³)

2.4. Bacaların Boyutlandırılması ve Hesabı

Hava Hızına göre; kesit alandan geçecek maksimum hava hızı 8 m/s olacak şekilde baca boyutları hesaplanır. Hesaplama; Eşitlik.7’ye göre yapılacak alan tespit edilir.

$$Q_b = A \times V \quad (7)$$

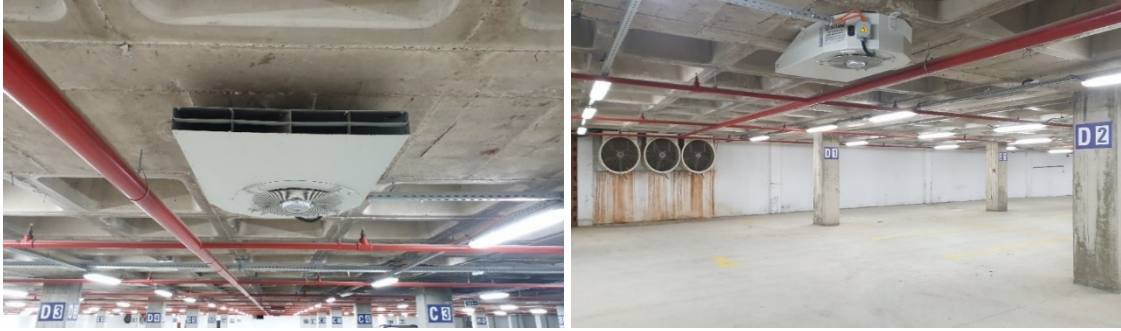
Q_b= Baca kesitinden geçen debi (m³/s)
A= Baca kesit alanı (m²)
V= Hava hızı (m/s)

2.5. Baca Damperi Boyutlandırılması ve Hesabı

Duman atış bacasında her fana hitap edecek, katlar arası bölgeleme yapmaya yarayan motorlu baca duman damperleri, yine hava hızı 8 m/s olacak şekilde seçilir ve Eşitlik.6 temel alınarak hesaplanan alana uygun damper boyutları firma kataloglarından seçilir.

2.6. Fan yerleşimi ve Hesaplamalar

Çalışmaya konu olan kapalı otopark; örnek bir kurum binasının bodrum katındadır. Otopark içinde Şekil 3.a'da gösterilen 9 adet bir havalandırma şirketinin AIR CI-50-4/8T-F-300 model radyal jet fan bulunmaktadır. Şekil 3.b'de ise jet fanlı havalandırma sisteminin kirli ve sıcak havayı dışarıya atmak üzere duman atış bacasına yerleştirilmiş olan en önemli bileşenlerinden aynı havalandırma şirketinin AIR AKD 100U/4.T1 model eksenel duman boşaltma fanları görülmektedir. (Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik, 2015).



Şekil 3:

Örnek bir kurum binasında kullanılan fanlar

- a.** Kapalı otoparkta kullanılan radyal jet fanı **b.** Eksenel duman atış fanları

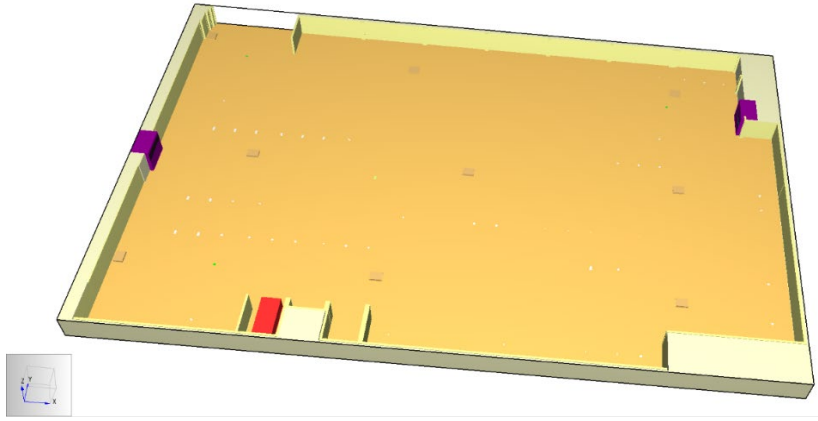
Yapılan mimari inceleme sonucunda 132 araçlık kapasiteye sahip kapalı otoparkın alanı 3332,354 m² ve yüksekliği 3,1 m olup, hacmi 10330,2974 m³ olarak belirlenmiştir. BS 7346-7:2013 standardında yer alan 9.1.4 maddesine göre günlük ve yangın havalandırma debileri için elde edilen sayısal veriler Tablo. 2'de gösterilmiştir (The BSI Standards 7346-7, 2013).

Tablo 2. Hava değişim sayılarına göre debi hesapları ve Eksenel Fanların Seçimi

Eksenel Fanlar	Günlük Havalandırma Debisi (m ³ /h)	Yangın Havalandırma Debisi(m ³ /h)		Seçilen Fan Kapasiteleri (m ³ /h)	
	(6 HD)	(10 HD)	(15 HD)	(10 HD)	(15 HD)
DAF	61982	103303	154954	108000	162000
THBF	30991	51651	77477	54000	81000

Bacalardaki fanların seçimi ve hesabı yukarıda elde edilen veriler ışığında 10 hava değişimi olması durumunda 103303 m³/h toplam debiye göre Tablo 2'de verilen taze hava besleme ve duman tahliye bacalarında bulunan eksenel fanların debileri belirlenmiştir.

Çalışmamızda örnek bir kurum binasının bodrum katında yer alan kapalı otoparkının yangın analizi yapılmıştır. Kapalı otoparkın 3 boyutlu modeli Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 5'te Radyal ve eksenel jet fanların yerleşimleri, yangın merkezi ve kaçış yerleri gösterilmiştir.



Şekil 4:
Örnek bir kurum binası kapalı otoparkının 3 boyutlu modeli



Şekil 5:
Örnek bir kurum binasının kapalı otoparkında bulunan radyal/eksenel jet fanların yerleşimi

Hava değişim sayıları ve debi verileri Eşitlik 6 kullanılarak havalandırma bacalarının boyutları hesaplanmıştır ve Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Havalandırma bacalarının boyutları

Bacalar	10 H.D. durumunda bacanın boyutu (m ²)	15 H.D. durumunda bacanın boyutu (m ²)
Duman Atış Bacası	3,75	5,625
Taze Hava Besleme Bacası	1,875	2,8125

2.7. Sayısal Analiz

Temelde, otopark akış analizlerinin amacı jet fan yerleşiminin doğru olup olmadığının tespiti, fan yeterliliklerinin tespiti, otopark içerisinde ölü hacmin olup olmadığının tespiti (Hızın 0 m/s olduğu bölgeler), otopark rampalarında ve kaçış yollarındaki hız değerlerinin standartta belirtilen (5 m/s) değerini geçip geçmediğinin tespiti (The BSI Standards 7346-7, 2013), sıcaklığın standartlarda belirtilen değerlerin altında olup olmadığının tespiti (Klote ve Milke, 2002), görüş mesafesi değerinin (10 m) standartta belirtilen değerleri karşılayıp karşılamadığının tespiti (NFPA Standards 130, 2014), CO seviyelerinin (8 saatlik bir süre içinde 30 ppm ve rampa ve çıkışlarda 15 dakikalık bir süre için 90 ppm) standardı karşılayıp karşılamadığının tespitinin (The BSI Standards 7346-7, 2013) yapılmasıdır.

Bu çalışmada analizlerde PyroSim HAD yazılımının akademik lisansı kullanılmıştır. Analizlerde büyük girdap simülasyonu (LES) türbülans modeli kullanılmıştır. LES ilk olarak 1963 yılında Joseph Smagorinsky tarafından atmosferik hava akımlarını simüle etmek için önerilen bir modeldir. (Smagorinsky, 1963). LES türbülans modelinin başlıca kullanıcısı, National Institute of Standards and Technology (NIST) tarafından geliştirilen Yangın Dinamiği Simülatörü (YDS) yazılımıdır. Bu yazılım arka planda çözdüğü eşitlikler Çengel ve Cimbala, (2020) kitabında detaylı olarak verilmiştir.

Sonlu hacimler yöntemiyle çözümlenen otopark yangın senaryosunda sonuçları belirlenmesindeki en etken faktör ağ yapısı elemanlarıdır. Bu çalışmada YDS 6.7.1'i kullanarak 45 m x 32 m x 3,7 m boyutlarında bir kapalı otoparkta bir yangın konumunda BS-7346-7:2013 standardına göre hız, sıcaklık, görüş mesafesi ve CO sonuçları için HAD analizleri yapmıştır. İlgili kapalı otopark modelinde; birim sayısal ağ boyutu 0,5 m ve 0,25 m olarak iki farklı eleman büyüklüğünde çözülmüş fakat Bacak, A. (2017) ve Kmecová ve diğ. (2019) çalışmalarında da kullanılan ve daha sağlıklı sonuçlar veren 0,25 m eleman büyüklüğü kullanarak HAD analizinde toplamda 702.108 eleman ile analizler yapılmıştır.

2.7.1 Sınır koşulları

Analizler 20 °C ortam sıcaklığında 1 atm açık hava basıncında yapılmıştır. Yangın referans grafiği yangın modeli olarak programa girilmiştir. Aracın plastik kısmının yanmasını temsil etmesi için yanan aracı temsilen C₃H₆ Propilen seçilmiştir. Yanma ürünü olarak yuzdelik olarak % 4 CO, %11 is oranı ve %1 hidrojen açığa çıkacak şekilde reaksiyon tanımlanmıştır. Bunlara ek olarak fan debileri, fan konumlarını ilgili yazılıma tanımlanmıştır.

2.8. Yangın Modeli

Yangın modellemesinde, yangının yeri ve karakteristik özelliklerinin tanımlanması gereklidir. Herhangi bir modelleme çalışmasında tasarım yangını karakteristikleri genellikle aşağıdaki değişkenlerle tanımlanır:

- i. Yangın Konumu
- ii. Yangın Isı Yükü
- iii. Radyant Fraksiyon
- iv. Is ve yanma ürünü gazların (CO,CO₂ vb.) üretim oranları

Bir binek taşıt veya hafif ticari araç içinde gelişen yangın, beklenildiği gibi motor ya da yolcu bölmesinde başlar. Yağmurlama sistemlerinin devreye girmesiyle yanan araç ve çevresini soğutacağı için genel olarak yangının bir araçtan diğerine sıçraması beklenmez.

Tablo 4'te yağmurlama söndürme sistemi bulunan veya bulunmayan kapalı otoparklar için sürekli rejimde yangın yükleri verildi.

Tablo 4. Sürekli rejimde tasarım yangın yükleri (The BSI Standards 7346-7, 2013)

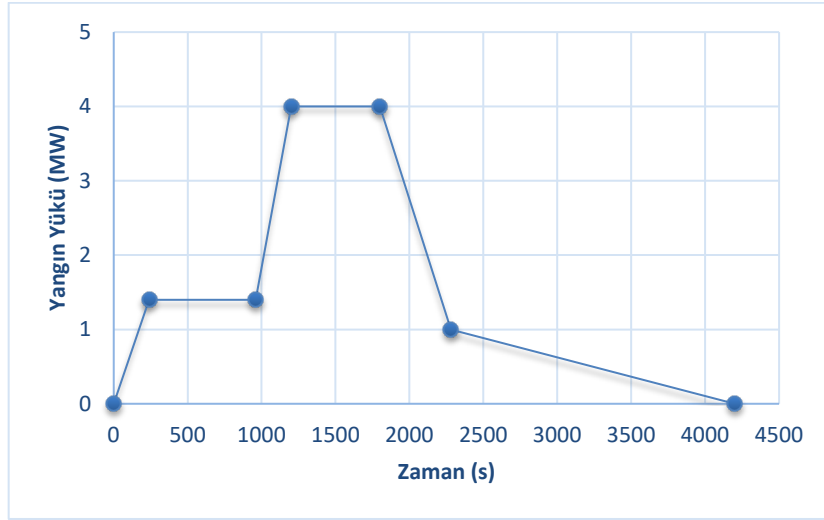
Değişkenler	Yağmurlamasız Kapalı Otopark	Yağmurlamalı Kapalı Otopark	Yağmurlamalı İki Araç Kapasiteli Asansörlü Otopark
Boyut	5 m x 5 m	2 m x 5 m	2 m x 5 m
Çevre	20 m	14 m	14 m
Yangın Yüğü	8 MW	4 MW	6 MW

Bu çalışmaya konu olan örnek bir kurum binasının kapalı otoparkı için seçilen tasarım yangın yükü 4 MW'tır. Şekil 6'da görüleceği üzere yağmurlama sistemi bulunmaktadır.



Şekil 6:
Kapalı otoparkın yağmurlama sistemi

Otopark yangınlarının zamana bağlı analizi, yangının zamana bağlı gelişimini tanımlayan uygun bir yangın eğrisinin seçimini gerektirir. Şekil 7'de verilen referans yangın eğrileri, "EUR 18867 EN, Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in closed car parks – Kapalı otoparklarda doğal yangınlara maruz çelik yapılar için tasarım kuralları geliştirilmesi" isimli yaygın kabul görmüş ve modern araçları temsil eden deney raporunu temel almaktadır. Şekil 7, simülasyonda kapalı otoparkta 0. ve 4200. sn'ler arasında yangının yükünün değişimini göstermektedir. Şekil 7'ye göre yangın maksimum yüküne (4 MW) 1200 ve 1800. sn'lerde ulaşmaktadır. Grafiğin 0. Ve 1200. sn'lerdeki basamaklı şekilde yükseliş sebebi yangın başlangıcının yavaş yavaş oluşumu ve maksimum noktaya ulaşmasıdır. Şekil 7'de 1800. sn'den sonra gerçekleşen düşüş ise yanma ürünlerinin azalması şeklinde açıklanmaktadır.



Şekil 7:

Tek araç için yangın referans eğrisi (EUR 18867 EN, Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in closed car parks)

Analizlerde kullanılan fan boyutları ve debileri Tablo 5’da verilmiştir görüleceği üzer

Tablo 5. Fan boyutları ve debileri

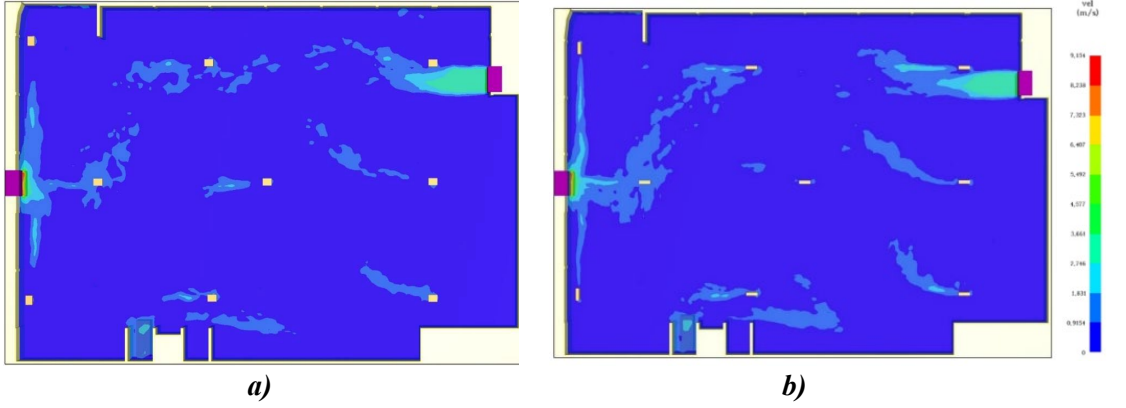
Jet Fanlar	Boyutları (mm)	Debi (m ³ /s)
Eksenel Jet Fan	1275,5 x 956 x 282,5	1,9
Radyal Jet Fan	1700 x 450 x 355	2

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1. Hava Hızı

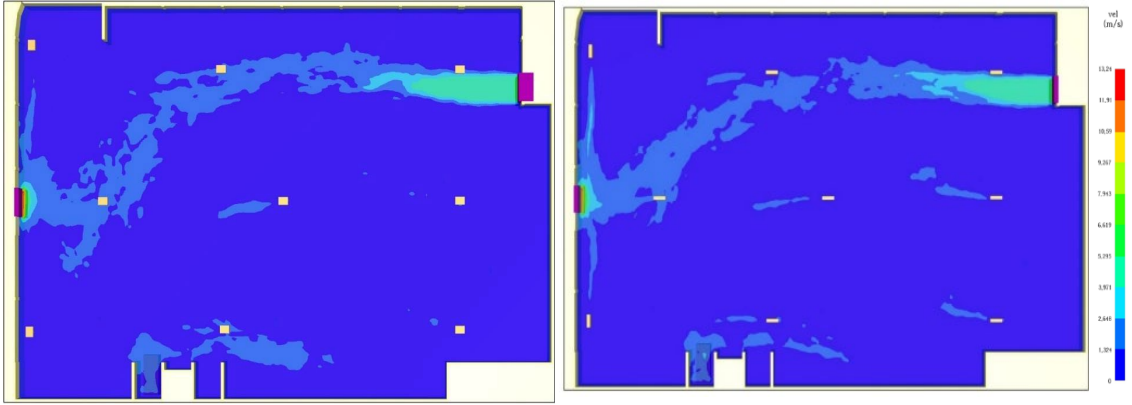
Otopark havalandırma sistemlerinde, dikkat edilecek önemli bir husus, doğal hava hareketiyle giren havanın hızı 2 m/s’yi, yangın anında rampalarda ve kaçış yollarındaki hava hızı 5 m/s’yi geçmemelidir. Yine, otopark içerisindeki hareketsiz hacimlerin (hava hızının sıfır olması durumu) bulunmaması önemlidir. Sonuçlar yangının Şekil 7’de maksimum seviyesi olan 1200. sn’den alınmıştır.

On hava değişimli radyal jet fanlı analiz sonuçları incelendiğinde otoparkın içinde durgun havanın bulunmadığı doğal hava giriş bölgesi (rampa) hız değeri 0,9154 m/s iken kaçış yollarında için hava hızı maksimum 0,9154 m/s olarak tespit edilmiştir (Şekil.8 a). Aynı değerler eksenel jet fan kullanımında 0,9172 m/s olarak elde edilmiştir.



Şekil 8:
On hava değişimli hız sonuçları
a) Radyal jet fanlı b) Eksenel jet fanlı

Saatlik hava değişimi 15'e çıkarıldığında radyal jet fan için doğal hava giriş bölgesi (rampa) hız değeri 1,324 m/s iken kaçış yollarında yine hava hızı maksimum ortalama 1,324 m/s olarak tespit edilmiştir. Aynı değerler eksenel jet fan kullanımında 1,318 m/s olarak elde edilmiştir (Şekil 9).



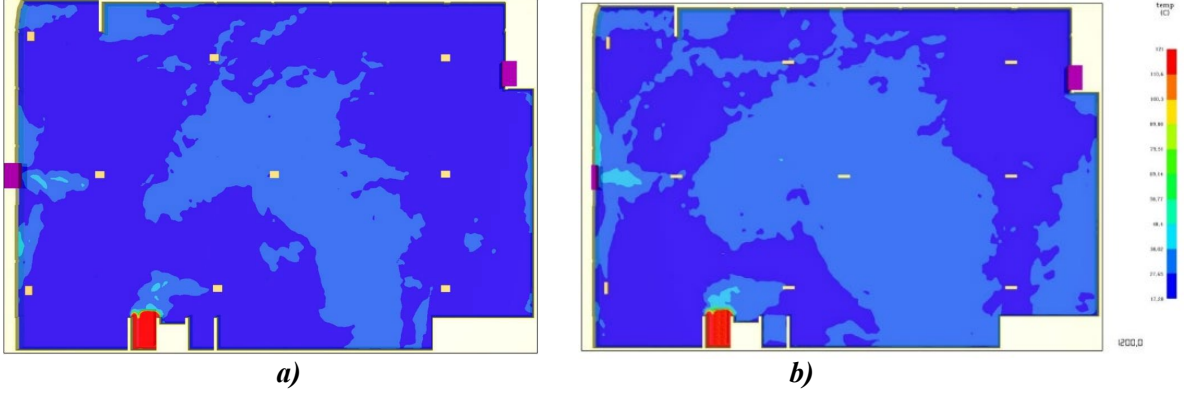
Şekil 9:
15 hava değişimli hız sonuçları
a) Radyal jet fanlı b) Eksenel jet fanlı.

3.2. Sıcaklık Dağılımı

Otopark sıcaklığı açısından, 7ASHRAE Duman Yönetimi Prensibi, yangın bölgesi hariç sıcaklığın 60°C'yi geçmemesi ve yangın alanının çevresindeki yüksek sıcaklık değeri sınırının 121°C'nin altında olması gerektiğini ifade eder.

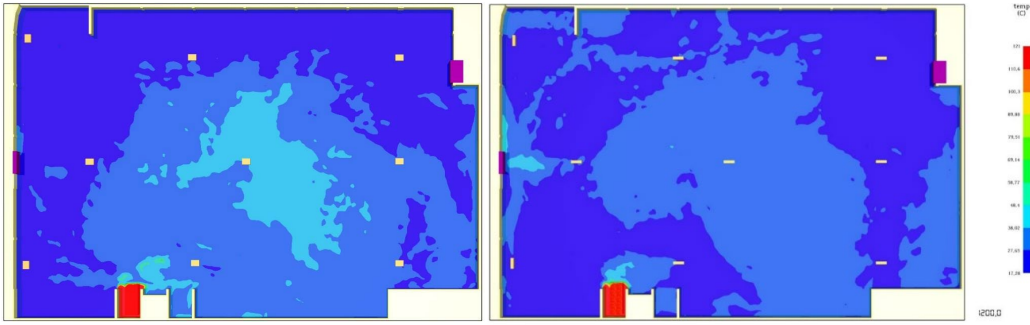
Sonuçlar alınırken göstergede araç yanma sıcaklığından dolayı en yüksek sıcaklık değeri 1129°C olacaktır. Ancak standartta incelememiz gereken sıcaklık aralığı en yüksek 121°C verildiğinden, gösterge tekrar ayarlanmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Radyal jet fan için kaçış noktaları olarak kullanılabilir rampa girişindeki kaçış noktasında en yüksek sıcaklık 40,13°C ve yanan aracın çevresinde sıcaklık 50,24°C seviyelerindedir. Otoparkın genelinde görülen en yüksek sıcaklık değeri ortalama 40,13°C olarak tespit edilmiştir (Şekil 10.a). Eksenel jet fan için 1200. saniyede kaçış noktaları olarak kullanılabilir rampa girişindeki kaçış noktasında sıcaklık 38,02°C ve yanan aracın çevresinde sıcaklık 48,4°C seviyelerindedir. Otoparkın genelinde en yüksek sıcaklık

değeri 38,02°C'dir. (Şekil 10.b). Yangın esnasında 170 °C'den çok daha yüksek sıcaklıklar elde edileceği kesindir fakat otoparkın genelinde görselleştirme yapılacağı için sıcaklık göstergesi kaçış bölgesinde sıcaklıklara karşılık gelen renkleri görmek için düzenlenmiştir.



Şekil 10:
10 hava değişimli sıcaklık sonuçları
a) Radyal jet fanlı b) Eksenel jet fanlı.

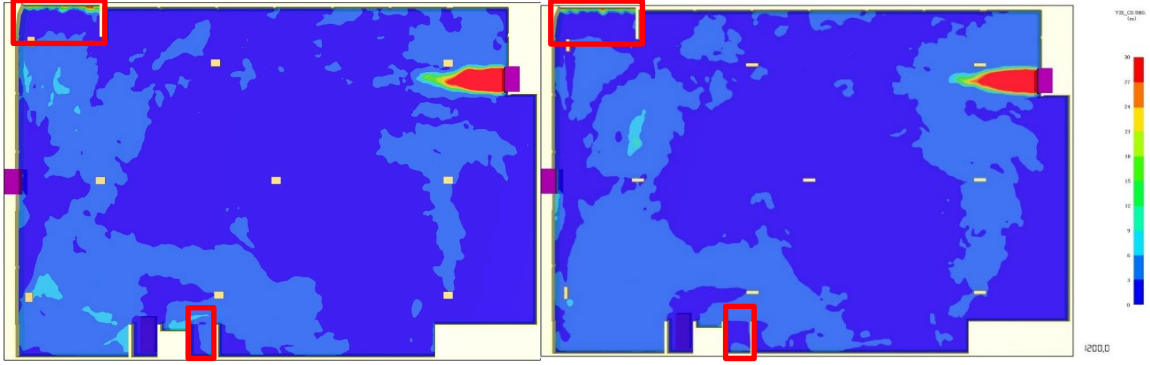
Radyal jet 1200. saniyede kaçış noktaları olarak kullanılabilir rampa girişindeki kaçış noktasında sıcaklık 29,98°C ve yanan aracın çevresinde sıcaklık 50,2°C seviyelerindedir. Otoparkın genelinde en yüksek sıcaklık değeri 50,2°C'dir (Şekil 11a). Eksenel jet fan kullanımında 1200. saniyede kaçış noktaları olarak kullanılabilir rampa girişindeki kaçış noktasında sıcaklık 28,15°C ve yanan aracın çevresinde sıcaklık 38,46°C seviyelerindedir. Otoparkın genelinde en yüksek sıcaklık değeri 48,78°C'dir (Şekil 11a).



Şekil 11:
15 hava değişimli sıcaklık sonuçları
a) Radyal jet fanlı b) Eksenel jet fanlı.

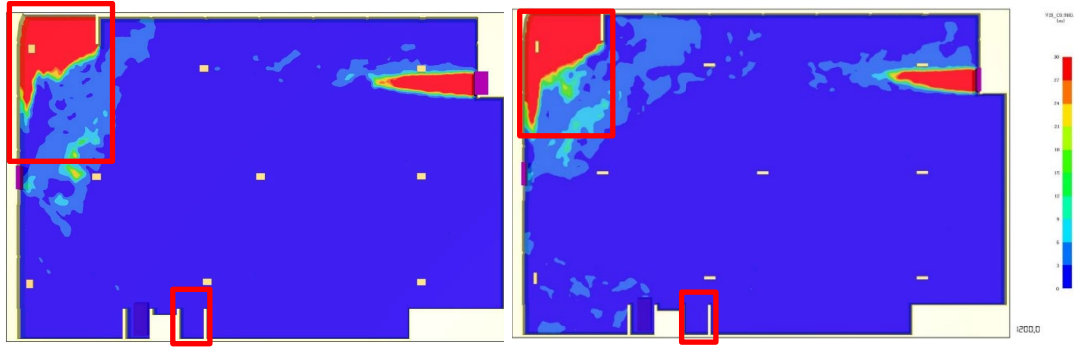
3.3. Görüş Mesafesi

Havalandırma Sistemlerinde, önemli olan diğer bir konu ise acil çıkış noktalarında yayaların kaçabilmesi ve yangın söndürme görevlilerinin yangına müdahale edebilmesi için, görüş mesafesi değerinin standartlara uygun olmasıdır. BS-7346- 7:2013 standardına göre kaçış yollarındaki görüş mesafesi en az 10 m olmalıdır. On hava değişimli radyal jet fanlı senaryo için görüş mesafesi Şekil 12.a'da işaretli bölgede 10 m'nin altında bir görüş mesafesi olduğu ortalamada ise 4 m görüş mesafesi olduğu tespit edilmiştir. Eksenel jet fan sonucu yine kaçış bölgesinde 3-4 m arasında tespit edilmiştir. Şekil 12.b'de verilmiştir.



Şekil 12:
10 hava değişimli görüş mesafesi sonuçları
a) Radyal jet fanlı b) Eksenel jet fanlı.

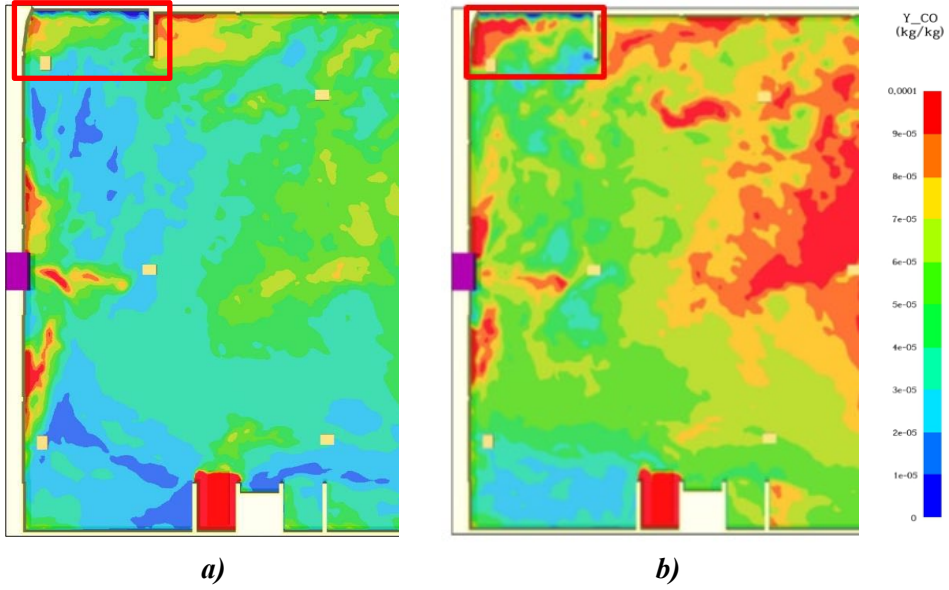
Onbeş hava değişimli radyal jet fanlı senaryo için görüş mesafesi rampa kaçış bölgesinde Şekil 13.a'dan işaretli bölgede 30 m olduğu tespit edilmiştir. Fakat yangın merkezine yakın olan kaçış bölgesinde görüş mesafesi 3 m olarak tespit edilmiştir. Aynı şekilde eksenel jet fan kullanıldığında rampa kaçış bölgesinde görüş mesafesi 30 m olurken yangın merkezine yakın kaçış yerinde görüş mesafesi 3 m olarak tespit edilmiştir (Şekil 13 b).



Şekil 13:
15 hava değişimli görüş mesafesi sonuçları
a) Radyal jet fanlı b) Eksenel jet fanlı.

3.4. Karbonmonoksit Miktarı

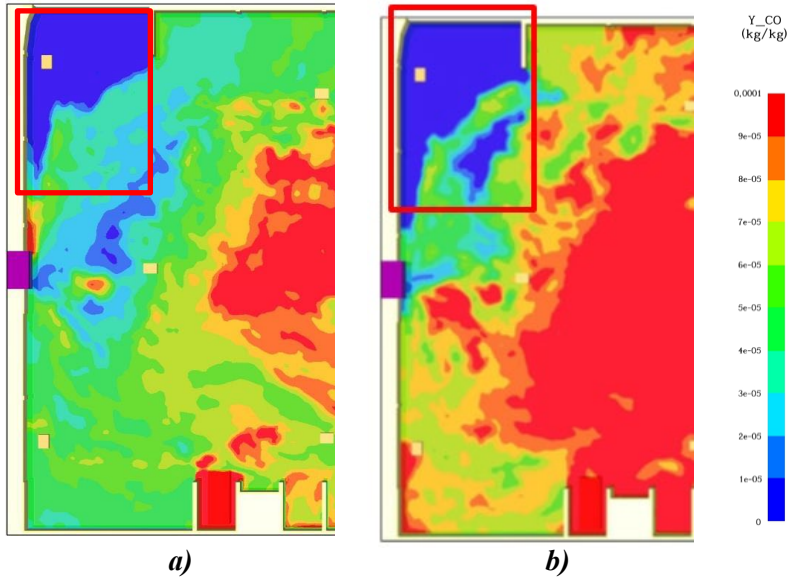
İnsan boyu seviyesindeki (1,7 metre) karbon monoksit miktarı sonuçlarının, BS-7346-7:2006 standartlarına göre 90 ppm 15 dakika ve 30 ppm 8 saat etkilenme sınırı olarak belirtilmiş olması, kaçış yollarında 100 ppm'i aşmama sonucunu doğurur. Yangının maksimum olduğu 1200. saniyede otoparkın kaçış noktasında kısmi bölgede en yüksek 90 ppm ve ortalama 75 ppm'lik zehirli gaz (CO) bulunmaktadır. Bu durum standardı karşılamaktadır (Şekil 14.a).



Şekil 14:
10 hava değişimli radyal jet fanlı senaryo için
a) 1200. sn CO seviyeleri. b) 2100. sn CO seviyeleri.

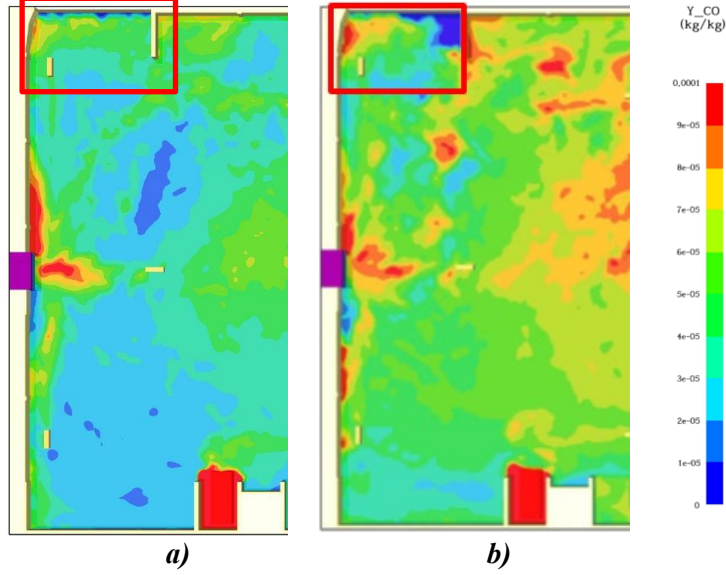
Şekil 14.b'de 1200. saniyeye ulaştıktan on beş dakika sonra yani 2100. saniyeye ulaştığımızda kısmi bölgede 100 ppm'lik değerin üzerine çıktığından standartta hedeflenen en yüksek değeri aşmaktadır.

Şekil 15.a ve b'de 15 beş hava değişimli radyal jet fanlı senaryo için yangın yükünün zirveye ulaştığı (4 MW) 1200. ve 2100. saniyede dahi otoparkın kaçış noktasında 1 ppm'lik zehirli gaz bulunmaktadır. Bu durum standardı karşılamaktadır.



Şekil 15:
15 hava değişimli radyal jet fanlı senaryo için
a) 1200. sn CO seviyeleri b) 2100. sn CO seviyeleri

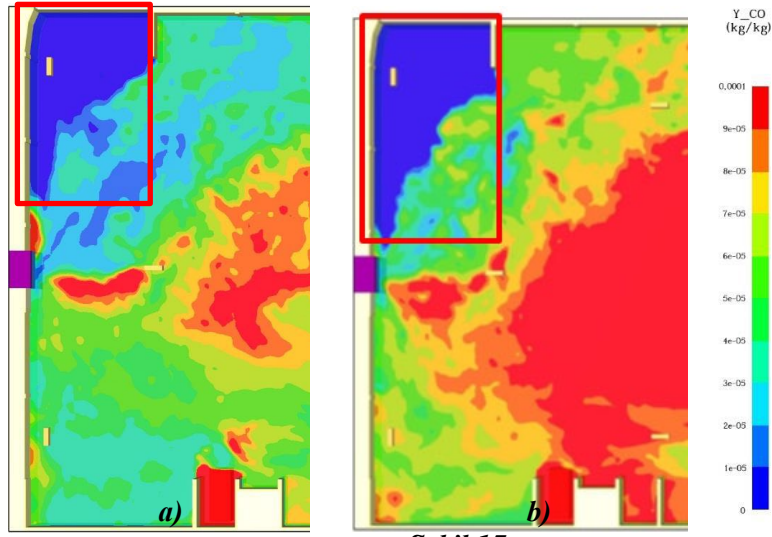
Şekil 16.a'da aksel jet fan kullanımı 10 hava değişimi oranı için yangın yükünün zirveye ulaştığı (4 MW) 1200. saniyede otoparkın kaçış noktasında renk göstergesine göre maksimum 80 ppm'lik zehirli gaz bulunmaktadır. Bu seviyedeki CO gazının yoğunluğu standardı karşılamaktadır.



Şekil 16:
10 hava değişimli aksel jet fanlı senaryo için
a) 1200. sn CO seviyeleri b) 2100. sn CO seviyeleri

Şekil 16.b'de 1200. saniyeden on beş dakika sonra yani 2100. saniyeye ulaştığımızda kaçış bölgesinde 0 ppm'lik değerlerin görüldüğü çok küçük bir alan olduğu genel olarak bölgede 80 ppm'lik değere ulaşıldığı tespit edilmiştir.

Şekil 17.a'da aksel jet fan kullanımı ve 15 hava değişim oranı yangın yükünün en yüksek olduğu 1200. saniyede otoparkın kaçış noktasında büyükçe bir alanda ortalama 1 ppm'lik zehirli gaz bulunmaktadır. Bu durum standartı karşılamaktadır. Şekil 17.b'de 1200. Saniyeden itibaren on beş dakika sonra yani 2100. saniyeye ulaştığımızda kısmi bölgede 1 ppm'lik değere ulaştığından standartta hedeflenen en yüksek değeri aşmamaktadır.



Şekil 17:
15 hava değişimli eksenel jet fanlı senaryo için
a) 1200. sn CO seviyeleri b) 2100. sn CO seviyeleri

Radyal ve eksenel jet fanlı otopark yangın sistemleri için yapılan analiz sonuçları karşılaştırmalı şekilde Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6: Hava değişim oranına göre radyal ve eksenel fan analiz sonuçları

	Hava hızı (m/s)	Sıcaklık (°C)	Görüş mesafesi (m)	CO (ppm)
Radyal jet fanlı (10 Hava değişimi)	0,9154	60,35	< 4	>100
Radyal jet fanlı (15 Hava değişimi)	1,324	50,2	30	1
Eksenel jet fanlı (10 Hava değişimi)	0,9176	50,2	< 3	82
Eksenel jet fanlı (15 Hava değişimi)	1,318	38,02	30	1

4. SONUÇLAR

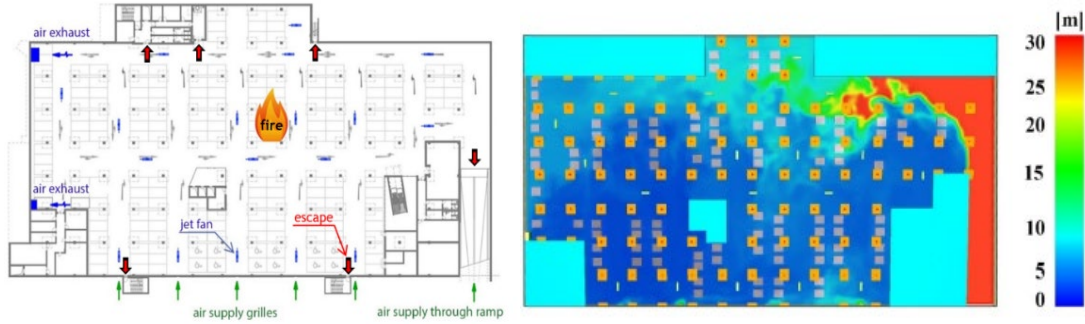
Bu çalışma, ülkemizde kapalı otoparklarda jet fanlı yangın simülasyonlarında HAD analizlerinin nasıl yapılacağını belirleyen bir Türk standardı olmadığını ortaya çıkarmıştır. Jet fanlı havalandırma sistemleri projelendirilirken yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizlerinde fan üreticilerinin büyük bir bölümü, İngiliz BS 7346-7:2013 standardına göre sonuçları yorumlamak zorundadır.

Bu çalışmada yapılan radyal jet fanlı analizlere göre; 10 hava değişimi oranının eksenel ve radyal fan kullanımında özellikle görüş mesafesini sağlamadığı tespit edilmiştir. Yine Radyal jet fan kullanımında 10 hava değişimi miktarında sıcaklık değerinin sınır değerinde olduğu, CO dağılımının 1200. ve 2100. sn'ler arası 100 ppm'in üzerine çıktığı tespit edilmiştir. Eksenel jet fan kullanımında görüş mesafesi değeri 10 hava değişimi için 3 m'nin altında elde edilmiştir. Bu değer radyal jet fan değerine yakın olup iki değerinde standarda göre uygun değerler değildir.

Eksenel jet fan sıcaklık sonuçları Radyal jet fana göre daha düşük ve standarda uygundur bunun sebebinin eksenel jet fanların yerleştirme yüksekliğinin daha az olması olarak yorumlanmıştır. Her iki fan tipinde görüş mesafesinde elde edilen değerlerin izin verilen değerlerin altında olması nedeniyle jet fanlı sistemlerde 15 hava değişiminin daha sağlıklı olacağı çalışmada tespit edilmiştir.

Tablo 6'ya göre radyal jet fanlı ve on hava değişimli senaryoda yangının 2100.saniyesinde CO gazı seviyesi 100 ppm'in üzerine çıktığı tespit edilmiştir. Eksenel jet fanlı senaryolarda sıcaklık dağılımları ve CO gazı seviyelerinde standarda uygun daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Çalışma sonunda eğer bir kapalı otoparkta 10 hava değişimi üzerinden uygulama yapılacaksa seçilen jet fanın eksenel tipte fan olması standartları karşılamada en uygun sonuçları vermektedir.

Bu çalışmada karşılaştırmalar Kmecová ve diğ. (2019) çalışması ile yapılmaktadır. Bunun nedeni Kmecová ve diğ. (2019) çalışmasında kullanılan yazılım bu çalışmada kullanılan yazılım ile aynıdır. İncelenen otoparklarda rampa, kaçış yerleri benzerliği mevcuttur. Kmecová ve diğ. (2019) çalışmasında 15 hava değişimi incelemeleri yapmıştır.



Şekil.18

Kmecová ve diğ.(2019) çalışması
a) Otopark ve jet fan yerleşimi b) 1300. sn görüş mesafesi

Kmecová ve diğ.(2019) çalışmasında radyal jet fanlı ve 10 hava değişimli senaryoda yangının 2100.saniyesinde CO gazı seviyesi 100 ppm'in üzerine çıktığı tespit edilmiştir. Yani eksenel jet fanlı senaryolarda sıcaklık dağılımları ve CO gazı seviyelerinde standarda uygun daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Kmecová ve diğ. (2019) yaptığı çalışmada 10 hava değişimi ile 1300. sn'de kaçış bölgesi görüş mesafesinin bu çalışmada olduğu gibi 0-5 m arasında olduğu Şekil.18 b'den görülmektedir. Görüş mesafesi değeri bizim çalışmamızda 10 hava değişim oranı için yine 5 m'den küçüktür (Şekil.12 a). Bu bağlamda aldığımız sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Kmecová ve diğ. (2019) yaptığı çalışmada rampa bölgesinin 10 hava değişiminde görüş mesafesinin oldukça iyi olduğu 25-30 m arasında olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada 10 hava değişiminde rampa bölgesinde görüş mesafesinin 3 m olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin otopark tasarımı olduğu havanın Kmecová ve diğ. (2019) çalışmasında rampaya direnç ile karşılaşmadan yangın ile yüzleşmeden girdiği bu çalışmada ise direk olarak yangın hacmine girdiği tespit edilmiştir. Bu karşılaştırmaya göre yer altı otoparklarında araç rampasının yangının çıkabileceği hacimden ayrıştırılacak şekilde tasarlanması tavsiye edilmektedir. Kmecová ve diğ. (2019) çalışmasında yangın Şekil.18 a'da görüldüğü üzere otoparkın merkezine yakın bir yerde tetiklenirken bu çalışmamızda Şekil.5'ten görüleceği üzere müdahalenin en zor olduğu en kötü senaryoya göre en dip noktadan başlatılmıştır. Bu sebepten dolayı bu çalışmada rampa harici bulunan kaçış noktası yangın sebebiyle kullanım dışı kalmaktadır. Kmecová ve diğ. (2019) çalışmasında rampa dahil kaçış yolu alternatifi varken bizim çalışmamızda sadece rampa kaçış yolu olarak kalmıştır. Bu sonuca göre yangının çıktığı lokasyonun önemi göze çarpmaktadır.

Bu çalışma sonucu, İngiliz BS 7346-7:2013 standardının tavsiye ettiği saatlik en az 10 hava değişimi sayısına göre yapılan analizlerin özellikle CO ve sıcaklık değerlerinde riskli ya da uygun olmayan değerler elde edilmiştir. On beş hava değişimli olarak yapılan otopark tasarımlarının daha güvenli olduğu analizlerde standartta belirtilen değerlerin altında kalarak yeterli olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda eğer 10 hava değişimi uygulaması yapılacaksa ve mimari kat yüksekliği sınırlaması yoksa aksenel jet fan kullanımının tercih edilmesi standarda daha uygun sonuçların elde edilmesine sebep olmaktadır. Bu çalışmada, Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmeliğinde geçen en az 10 hava değişim oranı ifadesinin en az 15 hava değişimi olarak değiştirilmesi hususunda tavsiye verileri elde edilmiştir.

Bu çalışma içten yanmalı bir motora sahip aracın yanmasını incelemiştir. Fakat günümüzde bazı otoparklara Ulusal Mevzuat gereği girebilen LPG'li araçların yanması yada yeni teknoloji ile hayatımıza giren elektrikli araçların yanması üzerine çalışmalar yapılmalıdır. Farklı teknolojiler kullanan araçların yanmasında

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu çalışmanın yazarları olarak, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını onaylarız..

YAZAR KATKISI

Bu çalışma Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Mustafa Sinan Bakır tarafından Dr.Öğr.Üy. Kemal Furkan SÖKMEN'in danışmanlığında "Yer altı araç otoparklarında jet fan havalandırma sistemlerinin ve fan yerleşim optimizasyonunun hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile analizi" başlıklı Yüksek Lisans Tezinden üretilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Alarko-Carrier. (2007). Fanlar: Özellikleri ve Analiz. Alarko-Carrier Teknik Bülten, (24).
2. Aveiro, J. L., & Viegas, J. C. (2010). Smoke control in an underground car park with impulse ventilation. V European Conference on Computational Fluid Dynamics, Lisbon: June 14–17.
3. Bacak, A. (2017). Numerical Investigation of Impulse Ventilation System in Underground Car Park, International Journal of Engineering and Applied Sciences, 4, 14–16.
4. Bakır, M.S, (2019). Yer altı araç otoparklarında jet fan havalandırma sistemlerinin ve fan yerleşim optimizasyonunun hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile analizi. Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi
5. Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik. (2015). T.C. Resmî Gazete, 29411, 09 Temmuz 2015.
6. Chow, W. K. (1998). On safety systems for underground car parks, Tunnelling and Underground Space Technology, 13 (3), 281–287. doi:10.1016/S0886-7798(98)00060-1
7. Çakır, M.T. & Ün, Çağrı. (2020). CFD Analysis of Smoke and Temperature Control System of Car Park Area with Jet Fans. Journal of Engineering Research and Reports. 27-40. 10.9734/jerr/2020/v13i317102.
8. Çengel, Y. & Cimbala J.M. (2020) *Akışkanlar Mekaniği*, Palme Yayınevi, İstanbul
9. Joyeux, D. (1997). Natural Fires in Closed Car Parks: Car Fire Tests (INC-96/ 294d-DJ/NB). Saint-Aubin: CTICM.

10. Khatoon, S., & Shah, A. N. (2016). Prediction of Comfort Parameters for Naturally Ventilated Underground Car Parks, *The Nucleus*, 53 (3), 214-220.
11. Kmecová M., Krajčík M., Strakov Z., (2019). Designing Jet Fan Ventilation for an Underground Car Park by CFD Simulations. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 63(1), pp. 39–43. <https://doi.org/10.3311/PPme.12529>
12. Lu, S., Wang, Y. H., Zhang, R. F., & Zhang, H. P. (2011). Numerical study on impulse ventilation for smoke control in an underground car park. *The 5th Conference on Performance-based Fire and Fire Protection Engineering*, 11, 369–378. doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.671
13. Mangs, J., & Keski-Rahkonen, O. (1994a). Characterization of the fire behaviour of a burning passenger car. Part I: Car fire experiments. *Fire Safety Journal*, 23 (1), 17–35. doi:10.1016/0379-7112(94)90059-0
14. Mangs, J., & Keski-Rahkonen, O. (1994b). Characterization of the fire behaviour of a burning passenger car. Part II: Parametrization of measured rate of heat release curves. *Fire Safety Journal*, 23 (1), 37–49. doi:10.1016/0379-7112(94)90060-4
15. Merci, B., Taerwe, L., Vandevelde, P., Van den Bulck, E., Van den Schoor, F., van Beeck, J., & Vantomme, J. (2011). *Fundamental design approaches for improvement of the Fire Safety in Car Parks (080010)*. Flanders: IWT Agency for Innovation by Science and Technology.
16. Morgan, H. P., & De Smedt, J.-C. (2004). Hot smoke tests: testing the design performance of smoke and heat ventilation systems and of impulse ventilation. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, 6 (1), 7–18.
17. NFPA Standards. (2014). *NFPA 130: Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems*.
18. Senveli, A., Dizman, T., Celen, A., Bilge, D., Dalkılıç, A. S., & Wongwises, S. (2015). CFD Analysis of Smoke and Temperature Control System of an Indoor Parking Lot with Jet Fans. *Journal of Thermal Engineering*, 1 (2), 116-130. doi:10.13140/2.1.4336.2568
19. Shipp, M. (2010). *Fire Spread In Car Parks (BD2552)*. London: Department for Communities and Local Government, UK.
20. Shipp, M., & Spearpoint, M. (1995). Measurements of the severity of fires involving private motor vehicles. *Fire and Materials*, 19 (3) 143-151. doi:10.1002/fam.810190307
21. Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations. *Monthly Weather Review*, 91 (3) 99-164. doi:10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2
22. Sultansu, S. & Onat, A. (2020). The Cfd Analysis of Ventilation and Smoke Control System with Jet Fan in a Parking Garage. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 32 (1), 89-95. DOI: 10.7240/jeps.522037
23. The BSI Standards. (2013). *BS 7346-7: 2013 Components for smoke and heat control systems. Code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control systems for covered car parks*.
24. Umamaheswararao, L. (2017). Optimum Design of Impulse Ventilation System in Underground Car Parking Basement by Using CFD Simulation. *Industrial Engineering & Management*, 6 (4), 4–9. doi: 10.4172/2169-0316.1000238
25. Viegas, J. C. (2006). The use of jet fans to improve the air quality in underground car parks. *Healthy Buildings: Creating a Healthy Indoor Environment for People*, 4, 227–232.

26. Viegas, J. C. (2009). The use of impulse ventilation to control pollution in underground car parks. *International Journal of Ventilation*, 8 (1), 57–74. doi:10.1080/14733315.2006.11683832
27. Viegas, J. C., & Saraiva, J. G. (2001). CFD study of smoke control inside enclosed car parking using jet fans. In *InterFlam 2001: 9 th International Fire Science & Engineering Conference*, 1465–1470.
28. Viegas, J. C., & Saraiva, J. G. (2002). Avaliação com recurso a CFD da aplicação de ventiladores de impulso a parques de estacionamento cobertos. *Proceedings of Métodos Numéricos en Ingenieria V. Madrid: SEMNI*.
29. Zhao, B., & Kruppa, J. (2004). Structural behaviour of an open car park under real fire scenarios. *Fire and Materials*, 28 (24), 269–28