

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK YÜKSEK BİNALARDA MERDİVEN BASINÇLANDIRMA
SİSTEMLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Büşra HEPGÜZEL AÇIKYOL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK YÜKSEK BİNALARDA MERDİVEN BASINÇLANDIRMA
SİSTEMLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Büşra HEPGÜZEL AÇIKYOL
(503092038)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Abdurrahman KILIÇ

TEMMUZ 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503092038 numaralı Doktora Öğrencisi Büşra HEPGÜZEL AÇIKYOL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ÇOK YÜKSEK BİNALARDA MERDİVEN BASINÇLANDIRMA SİSTEMLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Abdurrahman KILIÇ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Feridun ÖZGÜÇ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Cem PARMAKSIZOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa ÖZGÜNLER
Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi

Dr. Gökhan BALIK
Etik Mühendislik Danışmanlık Tasarım
ve Eğitim Hizmetleri Ltd.Şti.

Teslim Tarihi : **10 Haziran 2016**
Savunma Tarihi : **27 Temmuz 2016**





Eşime,



ÖNSÖZ

Öncelikle en içten teşekkürlerimi tez çalışmam boyunca bana kılavuzluk eden danışmanım Prof. Dr. Abdurrahman Kılıç'a sunarım. Kendisinin desteğinden ve engin bilgilerinden her an faydalanabiliyor olmak bu tezi gerçekleştirmemde bulunmaz bir olanaktı. Dr. Gökhan Balık'a tez çalışmalarım boyunca her adımda yanımda olduğu için derin minnettarlığımı ve teşekkürlerimi sunarım. Cesaretlendirmesi, tez konumla ilgili kendi tecrübelerini aktarması ve yönlendirmesiyle Dr. Kazım Beceren'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca sağladıkları katkılardan dolayı tez izleme komitesinde yer alan Prof. Dr. Cem Parmaksızoğlu ve Doç. Dr. Mustafa Özgünler'e teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmam boyunca bana sonsuz sabır gösterdiği ve gayretlendirdiği için eşim Resul'e, onlara her ihtiyacım olduğunda yanımda olan anneme, babama, Alpay'a, Burcu ve Barış'a teşekkür ederim.

Haziran 2016

Büşra Hepgüzel Açıkıyol
Makina Yüksek Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1 DeneySEL Çalışmalar	6
2.2 Sayısal Çalışmalar	11
2.2.1 Zon modelleri	11
2.2.2 Network Modeli	12
2.2.3 Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Modeli	13
2.2.4 Diferansiyel Modeller.....	14
2.3 Standartlar ve Kodlar.....	15
3. MERDİVEN BASINÇLANDIRMA SİSTEMLERİ	17
3.1 Sistem Bileşenleri ve Farklı Uygulama Tipleri.....	17
3.2 Merdiven Basınçlandırma Sistemi Hesaplama Metotları.....	20
3.2.1 Analitik – ampirik metotlar.....	20
3.2.1.1 Tasarım için kullanılabilecek el ile hesap metodu (tek zondan oluşan merdivenler için)	23
3.2.1.2 Network modellerin çalışma prensibi	24
3.2.2 CFD metotları.....	26
3.2.2.1 Türbülanslı akış ve LES modelleme	28
3.3 Binalarda Hava Ve Duman Hareketine Yön Veren Kuvvetler	31
3.3.1 Baca etkisi.....	32
3.3.2 Rüzgâr etkisi	35
3.3.3 Bina iklimlendirme ve havalandırma sistemlerinin etkisi	38
3.3.4 Asansör piston etkisi.....	39
3.3.5 Dumanın âni genişmesi.....	40
3.3.6 Dumana etkiyen kaldırma kuvvetleri	40
3.3.7 Hava ve duman hareketine yön veren kuvvetlerin kıyaslanması	41
3.4 Çeşitli Yönetmelik ve Standartlarda Yer Alan Gereksinimlerin Kıyaslanması.....	42
3.4.1 Basınçlandırılmış merdivenlerin tesis edilmesi gereken durumlar	43
3.4.2 Minimum ve maksimum basınç farkları.....	44
3.4.3 Sistem tasarımı	49
3.4.4 Hava besleme menfezleri.....	50
3.4.5 Aşırı basınç tahliyesi	52

3.4.6 Fanlar.....	54
3.4.7 Basınçlandırma havası temini.....	55
3.4.8 Sistemin devreye girmesi ve kontrolü	56
3.4.9 Korunan lobiler	57
4. SAHA TESTLERİ VE SONUÇLARI.....	59
4.1 Saha Testlerinin Gerçekleştirildiği Binanın ve Merdivenin Özellikleri	59
4.2 Test Prosedürü	64
4.2.1 Ölçüm aletleri ve kalibrasyon	66
4.3 Birinci test grubu: kritik kat (KK) test grubu	67
4.4 İkinci test grubu: YGH etkisi test grubu	68
4.5 Üçüncü test grubu: düşey zonlama test grubu	71
4.6 Basınçlandırma hava debisinin elde edilmesi.....	72
4.6.1 Korunum yöntemi ile debinin belirlenmesi	72
4.6.2 Hız ölçümü yöntemi ile debinin elde edilmesi	74
4.7 Saha Testlerinin Sonuçları.....	76
4.7.1 Debi ölçüm değerleri.....	76
4.7.2 KK test grubu sonuçları.....	78
4.7.3 YGH etkisi test grubu sonuçları.....	81
4.7.4 Düşey zonlamanın etkisi test grubu sonuçları	85
5. CFD MODELLEME ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARI	89
5.1 Özdilek M3 merdiveni modeli.....	89
5.1.1 Model geometrisi ve sınır koşulları	90
5.2 Grid Yapısından Bağımsızlığın Araştırılması	92
5.3 CFD Modelleme Çalışmalarının Sonuçları	95
5.3.1 Baca Etkisinin Zamana Göre Değişimi	96
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR	99
KAYNAKLAR.....	103
EKLER	109
ÖZGEÇMİŞ.....	121

KISALTMALAR

AIRNET	: Bilgisayar programı
ASCOS	: Bilgisayar programı (Atrium Smoke Control Systems)
BYKHY	: Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik
CFAST	: Bilgisayar programı
CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CONTAM	: Bilgisayar programı
DNS	: Direct Numerical Simulation
FDS	: Fire Dynamics Simulator
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
KK	: 1. test grubunda sadece tahliye katındaki kapıların açık olduğu test
KK-6	: 1. test grubunda tahliye katı ve 6. kattaki kapıların açık olduğu test
KK-22	: 1. test grubunda tahliye katı ve 22. kattaki kapıların açık olduğu test
KK-33	: 1. test grubunda tahliye katı ve 33. kattaki kapıların açık olduğu test
kkA	: Kritik Kapılar Açık
kkK	: Kritik Kapılar Kapalı (tüm kapılar kapalı)
LES	: Large Eddy Simulation
NFPA	: National Fire Protection Association
NIST	: National Institute of Standards and Technology
RANS	: Reynolds Average Navier Stokes
SGS	: Subgrid Scale Stress
YGH	: Yangın Güvenlik Holü
yghV	: Yangın Güvenlik Holü Var
yghY	: Yangın Güvenlik Holü Yok
z1	: 3. Test grubunda merdivenin üç zondan oluştuğu temsili durum
z3	: 3. test grubunda merdivenin tek zondan oluştuğu temsili durum



SEMBOLLER

A	: Alan
A_e	: Efektif Sızıntı Alanı
C	: Akış katsayısı
C_{w1}	: Rüzgâr tarafı basınç katsayısı
C_{w2}	: Rüzgâr altı tarafı basınç katsayısı
g	: Yerçekim ivmesi
H	: Yükseklik
H_n	: Nötral düzlemin yerden yüksekliği
K	: Kayıp katsayısı
m	: Kütleli debi
P	: Basınç
Re	: Reynolds Sayısı
R_u	: Üniversal gaz sabiti
T	: Sıcaklık
T_b	: Bina sıcaklığı
T_o	: Dış ortam sıcaklığı
T_s	: Merdiven yuvası sıcaklığı
u	: Hız
U	: Rüzgâr hızı,
V	: Hacim
ΔP	: Basınç farkı
δ	: Sınır tabaka kalınlığı
ρ	: Yoğunluk
τ_{ij}	: Viskoz gerilmeler
δ_{ij}	: Kronecker delta fonksiyonu
q	: Isı akısı
V	: Hacim



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Çeşitli yapı elemanları için sızıntı alanları.	21
Çizelge 3.2 : Hava ve duman hareketine yön veren kuvvetler.....	32
Çizelge 3.3 : Farklı bölgelerde sınır tabaka kalınlıkları ve üs değerleri [11].	36
Çizelge 3.4 : Yerel engellerin bulunmadığı durumda dikdörtgen binalar için ortalama basınç katsayıları (C_w) [11].	38
Çizelge 3.5 : Çeşitli kuvvetler altında oluşan basınç farkı değerlerinin kıyaslanması.	42
Çizelge 3.6 : BYKHY'e göre basınçlandırılmış merdivenlerin bulundurulmasının gerekliliği olduğu binalar.	43
Çizelge 3.7 : EN 12101-6'ya göre basınçlandırma ve hava tahliyesi gereken durumlar.	44
Çizelge 3.8 : EN 12101-6'da yer alan bina sınıflandırması.	46
Çizelge 3.9 : EN 12101-6'da B sınıfı binalar için tanımlanan minimum basınç farkı değerleri [3].	46
Çizelge 3.10 : NFPA 92'de yer alan minimum tasarım basınç farkı değerleri [5]. ...	48
Çizelge 3.11 : BYKHY'ye göre farklı kapı kapatıcı kuvvetleri ve kapı genişliklerine göre maksimum basınç farkı değerleri.	49
Çizelge 3.12 : EN 120101-6'ya göre merdiven basınçlandırma sistemi tasarımında izlenmesi gereken prosedür.	50
Çizelge 4.1 : Merdivenlere hizmet veren fanların bulunduğu katlar ve fan etiket değerleri.....	62
Çizelge 4.2 : Birinci test grubu parametreleri.	68
Çizelge 4.3 : YGH etkisi test grubunda her bir teste, etkin parametrelere göre verilen isim.....	70
Çizelge 4.4 : İkinci test grubu parametreleri.....	70
Çizelge 4.5 : Düşey zonlamanın etkisinin incelendiği test grubunda her bir teste, etkin parametrelere göre verilen isim.	71
Çizelge 4.6 : Üçüncü test grubu parametreleri.....	72
Çizelge 4.7 : Bu çalışmada yapılan testlerin herbiri için hesaplanan debi değerleri.	76
Çizelge 4.8 : Frekans konvertörünün farklı set değerleri için ölçülen debi değerleri.	77
Çizelge 5.1 : Her bir modelde, zaman aralıklarının, 900-1000 s zaman aralığına göre değişim yüzdesi.	94
Çizelge B.1 : Birinci grup saha testi basınç farkı ölçümleri (Pa).	111
Çizelge B.2 : Birinci grup saha testi açık kapılarda hız ölçümleri (m/s).	112
Çizelge B.3 : İkinci grup saha testi basınç farkı ölçümleri (Pa).	113
Çizelge B.4 : İkinci grup saha testi açık kapılarda hız ölçümleri (m/s).	114
Çizelge B.5 : Üçüncü grup saha testi basınç farkı ölçümleri (Pa).	115
Çizelge B.6 : Üçüncü grup saha testi açık kapılarda hız ölçümleri (m/s).....	116



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Merdivenden yangın katına doğru kırık hava hızı : (a) yangın katında, farklı boyutta havalandırma açıklıklarına ve yangın sıcaklıklarına göre kritik hava hızı. (b) Yangın katından egzoz olması ve olmaması durumunda farklı yangın sıcaklıkları için gerekli basınçlandırma debisi [26].	8
Şekil 2.2 : Değişken-debili fanlı merdiven basınçlandırma sisteminin sistem cevabı [32].	9
Şekil 2.3 : Bir yangın kompartımanındaki yangın ile ideal zon model ile temsili [11].	11
Şekil 3.1 : Merdiven Basınçlandırma sistemleri: a) tekli enjeksiyon. b) çoklu enjeksiyon.	19
Şekil 3.3 : Akış yolları: a) paralel akış yolu. b) seri akış yolu.	22
Şekil 3.4 : Network modellemeye tipik bir kat ve bir şaftta hava akışı şeması.	25
Şekil 3.5 : Logaritmik ölçek üzerinde girdap boyutları[76].	29
Şekil 3.6 : Kış şartlarında baca etkisi nedeniyle oluşan akış ve basınçlar.	33
Şekil 3.7 : Atmosferik sınır tabakanın oluşumu.	35
Şekil 3.8 : Arazi şartlarının rüzgâr sınır tabaka üzerindeki etkileri [79].	35
Şekil 3.9 : Asansör kabininin aşağı doğru hareket etmesi ile oluşan akış [21].	39
Şekil 3.10 : Yangına etkiyen kaldırma kuvvetleri nedeniyle oluşan basınç farkı ve hava akışı.	41
Şekil 3.11 : Merdiven kapısı üzerine etkiyen kuvvetler [5].	48
Şekil 3.12 : Çoklu enjeksiyon sistemleri: (a) fan zemin seviyesinde. (b) fan çatı seviyesinde [5].	52
Şekil 3.13 : Besleme fanına bypass damperi eklenmiş merdiven basınçlandırma sistemi [5].	54
Şekil 4.1 : Özdilek Center.	59
Şekil 4.2 : Kule binası karakteristik kat planı.	60
Şekil 4.3 : Merdiveni üst ve orta zona ayıran duvarlar ve zonlar arasında geçişi sağlayan kapı: (a) üst zondan görünüm. (b) orta zondan görünüm.	61
Şekil 4.4 : River Plaza M3 merdiveni zonlara ayırma, besleme fanları ve basınçlandırma şaftı şematik görünümü.	62
Şekil 4.5 : Tesisat katında basınçlandırma havasını ileten kanalların basınçlandırma şaftı ile bağlantısı.	63
Şekil 4.6 : Merdiven-YGH ve merdiven-koridor arasında boru yerleşimi ve basınç farkı ölçümü: (a) merdiven içerisinden ölçüm yapımı, (b) boruların yerleşimi.	65
Şekil 4.7 : Ölçme aletleri: (a) testo 512 fark basınç transdüseri, (b) testo 425 hız ölçer.	66
Şekil 4.8 : Kalibrasyonda kullanılan gereçler: (a) daralan kesitli kanal, (b) eğik manometre.	67

Şekil 4.9 : Merdiven, YGH ve koridorun şematik gösterimi.	69
Şekil 4.10 : M-kapılarının açık bırakılması: (a) takoz ile, (b) ağırlık ile.	69
Şekil 4.11 : 34.kattaki tesisat dairesinde basınçlandırma fanı ve basınçlandırma kanalları.	75
Şekil 4.12 : Ölçme yöntemi için fan emiş ağzında hız ölçümleri.	75
Şekil 4.13 : KK test grubunda ölçülen basınç farkı değerlerinin katlara göre dağılımı (KK testi: tahliye katı kapıları açık, KK-6 testi: tahliye katı ve 6. kat kapıları açık, KK-22 testi: tahliye katı ve 22. kat kapıları açık, KK-33 testi: tahliye katı ve 33. kat kapıları açık).	79
Şekil 4.14 : İkinci test grubunda, tüm kapılar kapalı durumda, yangın güvenlik holünün bulunduğu ve bulunmadığı testlerde merdiven-koridor arasındaki basınç farkı ölçümleri (kkK-yghV: kritik kapılar kapalı – yangın güvenlik holü var, kkK-yghY : kritik kapılar kapalı – yangın güvenlik holü yok).	82
Şekil 4.15 : İkinci test grubunda, kritik kapılar açık durumda, yangın güvenlik holünün bulunduğu ve bulunmadığı testlerde merdiven-koridor arasındaki basınç farkı ölçümleri (kkA-yghV: kritik kapılar açık – yangın güvenlik holü var, kkA-yghY: kritik kapılar açık – yangın güvenlik holü yok).	84
Şekil 4.16 : Üçüncü test grubunda, tüm kapılar kapalı durumda, merdivenin tek ve üç zondan oluştuğu testlerde merdiven-koridor arasındaki basınç farkı ölçümleri (kkK-z3: kritik kapılar kapalı – üç zon, kkK-z1: kritik kapılar kapalı – bir zon).	86
Şekil 4.17 : Üçüncü test grubunda, kritik kapılar açık, merdivenin tek zondan oluştuğu ve üç zondan oluştuğu testlerde merdiven-koridor arasındaki basınç farkı ölçümleri (kkA-z3: kritik kapılar açık – üç zon, kkA-z1: kritik kapılar açık – bir zon)	87
Şekil 5.1 : Modelin üstten görünüşü.	90
Şekil 5.2 : Model geometrisi: (a) merdiven tarafının görünüşü, (b) basınçlandırma shaftı ve YGH tarafının görünüşü.	91
Şekil 5.3 : Model üzerinde 21 ve 22 katlar arasındaki yer alan zonlara ayırımı ve basınçlandırma shaftına hava besleyen yüzeyin görünüşü.	92
Şekil 5.4 : Farklı modellerin sonuçlarının kıyaslanması.	95
Şekil 5.5 : Model sonuçlarının test sonuçları ile kıyaslanması.	96
Şekil 5.6 : Her bir zonda bulunan katların ortalama η değerlerinin zamana göre değişimi.	98
Şekil C.1 : Grid-0.05 modelinde her bir kat için merdiven-dış ortam arası basınç farkı değerlerinin zamana göre değişimi.	117
Şekil C.2 : Grid-0.1 modelinde her bir kat için merdiven-dış ortam arası basınç farkı değerlerinin zamana göre değişimi.	118
Şekil C.3 : Grid-0.2 modelinde her bir kat için merdiven-dış ortam arası basınç farkı değerlerinin zamana göre değişimi.	119
Şekil C.4 : Grid-0.4 modelinde her bir kat için merdiven-dış ortam arası basınç farkı değerlerinin zamana göre değişimi.	120

ÇOK YÜKSEK BİNALARDA MERDİVEN BASINÇLANDIRMA SİSTEMLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Yüksek binalarda yangın anında insanların binadan tahliye edilmesi için basınçlandırılan merdivenler tesis edilmekte ve bu uygulama dünyanın birçok ülkesinde standart ve kodlarca istenilmektedir. Merdiven basınçlandırma sistemleri ile dış ortamdan alınan taze hava fan veya fanlar vasıtası ile merdiven yuvasına beslenir. Bu sayede merdiven içerisinde pozitif basınç sağlanarak merdivene duman girişinin engellenmesi amaçlanır. Çeşitli ülkelerin yangından korunma standartları ve kodları tarafından, merdivendeki basınçlandırmanın belirli limitler dâhilinde olması istenir. Basınçlandırma limitleri dumanın merdivene girmesini engelleyecek kadar çok, merdiven kapılarının açılmasına engel yaratmayacak kadar az olacak şekilde belirlenmiştir.

Merdiven basınçlandırma sistemleri üzerine iç ortam ve dış ortam arasındaki sıcaklık farkı (baca etkisi), rüzgâr hızı, yangın sırasında ortaya çıkan aşırı sıcaklık, binada bulunan iklimlendirme sistemleri ve asansör hareketinin hava hareketi üzerinde yarattığı kuvvetler etki eder. Aynı zamanda bir binada yangın anında bina tahliye planına göre çeşitli katlardaki kapılar açılır ve geri kapanır. Bu dinamik şartlar altında, istenilen limitlerin merdiven yuvası boyunca sürekli olarak sağlanması gerekir ve bunun için çeşitli yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerden biri merdivende bulunan sensörlerden gelen ölçüme göre fanın devir sayısı ve dolayısıyla sağladığı debinin sürekli olarak değiştirilmesidir. Diğer yöntem ise merdivende oluşan aşırı basıncın relief damperler ile dış ortama tahliye edilmesidir.

Basınçlandırma sistemi tasarımında basınçlandırma fanlarının kapasitesi ile aşırı basınç tahliye damperinin boyutları belirlenir. Bunun için iki farklı senaryo dikkate alınır. Birinci senaryoda tüm merdiven kapıları kapalıdır. Diğer senaryoda ise seçili katlarda merdiven kapıları açıktır, çok yüksek binalar için bu katlar tasarım yangın katı ve tahliye katıdır.

Son yıllarda dünyadaki büyük şehirlerin hızlı gelişmesi sonucu yüksekliği 100 metreden fazla olan bina sayısı hızla artmaktadır ve bu tip çok yüksek binalarda merdiven basınçlandırma sistemleri tasarımı, performansı ve uygulanan farklı yöntem ve tedbirlerin etkileri araştırılmaya devam etmektedir. Uygulamada, standartlarca istenilen basınçlandırmanın merdiven yuvası boyunca sağlanması için ek tedbirler alınmaktadır. Bu tedbirler merdiven yuvasının birden fazla basınçlandırma zonuna bölünmesi, merdivene her katta ya da üç katta bir basınçlandırma havasının temin edilmesi ve her katta merdiven girişinde korunaklı bir lobinin tesis edilmesidir.

Bu tez çalışmasında çok yüksek bir binada gerçekleştirilen saha testleri ve bir adet saha testinin hesaplamalı akışkanlar mekaniği kullanılarak modellenmesi ile alınan tedbirlerin ve tasarımda kullanılan parametrelerin etkileri araştırılmıştır.

Saha testlerinin gerçekleştirildiği kaçış merdiveni 163 metre yüksekliğindedir ve binada bulunan 40 kata da hizmet vermektedir. Bu kaçış merdiveni düşeyde üç basınçlandırma zonundan oluşmakta ve her katta merdivene erişim yangın güvenlik holü ismi verilen korunaklı bir lobiden geçerek yapılmaktadır. Basınçlandırma havası üç farklı katta yer alan üç adet basınçlandırma fanı ile sağlanmaktadır. Basınçlandırma havası, fanların bulunduğu katlarda yer alan kanallar vasıtası ile basınçlandırma şaftına iletilmekte ve her katta basınçlandırma şaftı ile merdiven arasında yer alan menfezlerden merdivene beslenmektedir.

Ofis amacıyla hizmet veren binada, testler binanın boş olduğu gece saatlerinde yapılmıştır. Dış ortam koşullarındaki farklılıkların birbiri ile kıyaslanacak testler üzerindeki etkilerini en aza indirmek amacıyla test grupları oluşturulmuş ve bir adet test grubunu oluşturan testler aynı gece içerisinde tamamlanmıştır. Üç grup saha testi gerçekleştirilmiştir ve her bir test grubu farklı bir parametrenin etkisini incelemektedir. Bir adet test grubu, dört farklı testten oluşmaktadır.

Test grupları oluşturulurken tasarımda kullanılan iki farklı senaryo (tüm merdiven kapılarının kapalı olduğu ve seçili katlarda merdiven ile kat kullanım alanları arasındaki kapıların açık olduğu senaryolar) dikkate alınmıştır. Bu sayede araştırılan parametrenin etkileri iki farklı durum altında incelenmiştir. Tüm kapılar kapalı durumu için besleme fanlarını kontrol eden frekans konvertörleri 20 Hz değerine sabitlenmiştir, kritik kapılar açık durumda ise tüm frekans konvertörleri 40 Hz değerine sabitlenmiştir. Böylelikle farklı testlerde aynı miktarda havanın merdivene beslenmesi hedeflenmiştir.

Saha testleri sırasında merdiven ile yangın güvenlik holü arasında ve merdiven ile kat kullanım alanı arasındaki basınç farkı her katta ölçülmüş ve araştırılan parametrelerin etkileri bu ölçümler üzerinden değerlendirilmiştir. Kritik kapılar açık durumu testlerinde, açık durumda olan merdiven kapısı açıklığında hava hızı ölçümleri yapılmıştır. Her bir test grubunun başlangıcında dış ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı değeri kaydedilmiştir. Merdivene beslenen basınçlandırma hava debisi kütle korunumu prensibine dayanan bir yöntemle elde edilmiştir. Bu yöntemde her bir test için ayrı ayrı hesaplama yaparak merdivene sağlanan hava debisi elde edilmiştir. Merdiveni sızıntılar nedeniyle terk eden hava debisi ile kritik kapılar açık durumu testlerinde açık durumda olan kapılardan geçerek merdiveni terk eden havanın debisi hesaplanarak merdivenden dışarıya çıkan hava debisi elde edilmiştir. Bu yöntem için basınç farkı ölçümleri ve açık kapılardaki hava hızı ölçümleri kullanılmıştır. Tüm testler tamamlandıktan sonra, fanın giriş ağzında hız ölçümleri yapılarak, farklı bir yöntemle basınçlandırma hava debisi ölçümü yapılmıştır. Bu yöntem ile iki adet ölçüm yapılmıştır, frekans konvertörlerinin tümü ilk ölçüm için 20 Hz değerine sabitlenmiş durumdadır, diğerine ise 40 Hz değerine sabitlenmiştir.

Birinci grup saha testlerinin tamamı kritik kapılar açık durumu testlerinden oluşmaktadır ve binanın hangi katında çıkan yangının merdiven basınçlandırma sistemi açısından daha kritik olduğu araştırılmıştır. Kritik kat test grubu ismiyle anılan bu test grubu ile merdiven basınçlandırma sistemi tasarımda kullanılan tasarım yangın katının binanın hangi bölümünde seçilmesi gerektiği ile ilgili inceleme yapılması amaçlanmıştır. Bu test grubunu oluşturan dört farklı testin tümünde alt basınçlandırma zonunda yer alan merdiven tahliye katında merdiven kapıları açıktır. Birinci ve ikinci testlerde sırasıyla 33. ve 22. katlarda merdiven ile kat kullanım alanı arasındaki kapılar açıktır, bu iki kat üst basınçlandırma zonunda yer almaktadır. Üçüncü testte orta basınçlandırma zonunda yer alan 6. katta kapılar açıktır ve dördüncü testte tahliye katı

hariç başka bir katta açık kapı bulunmamaktadır. Testler sırasında yapılan ölçümlerle elde edilen katlara göre basınç farkı dağılım grafikleri incelendiğinde, aynı zon içerisinde bir kat yerine başka bir katın seçiminin sonuçları çok değiştirmede elde edilmiştir. Üst zon ve orta zonda açık kapının olduğu testler kıyaslandığında ise, sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar arasındaki farka, fanlardan gelen taze havanın basınçlandırma şaftına bağlandığı katların neden olduğu düşünülmektedir.

İkinci grup saha testinde ülkemize yüksek binalarda yapılan bir uygulama olan, her katta kaçış merdiveni girişinde yer alan yangın güvenlik holünün merdiven basınçlandırma sistemi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yangın güvenlik holleri için ayrı bir basınçlandırma sistemi tesis edilmemektedir ancak bu hacımlar içerisinde merdivenden sızan hava nedeniyle dolaylı yoldan basınçlandırma olmaktadır. Yangın güvenlik holü etkisi test grubu ismi verilen bu test grubunda, tüm kapılar kapalı ve kritik kapılar açık durumları için ikişer adet test yapılmıştır. Bu testlerden ilkinde yangın güvenlik holleri bulunurken, diğer testte her katta yangın güvenlik holü ile merdiven arasındaki kapılar açık tutularak bu hacımlar merdiven hacmine eklenmiştir. Testler sonunda elde edilen basınç farkı dağılım grafikleri incelendiğinde, yangın güvenlik hollerinin bulunduğu merdiven – kat kullanım alanı arası basınç farkının iki katına çıktığı gözlemlenmiştir. Eğer bir zonda bir katta merdiven ile kat kullanım alanı arasındaki kapılar açık ise (kritik kapılar açık durumu) yangın güvenlik hollerinin bulunmasının bu zondaki etkisi, basınç farkını daha az arttırmaktadır. Yangın güvenlik hollerinin bulunması sebebiyle basınç farklarının iki katına çıkması matematiksel olarak da ispatlanmaktadır.

Düşey zonlama test grubu ismiyle anılan üçüncü grup test grubunda ise merdiven yuvasını zonlara ayırmanın etkisi incelenmektedir. Belirli bir yüksekliğin üzerinde olan binalarda baca etkisinin merdiven basınçlandırma sistemi üzerinde oluşturduğu olumsuz etkiyi gidermek için merdiven yuvası düşey zonlara ayrılmaktadır. Saha testlerinin gerçekleştirildiği kaçış merdiveni üç düşey zondan oluşmaktadır. Tüm kapılar kapalı ve kritik kapılar açık durumları için gerçekleştirilen ikişer tersin birincisinde merdiven üç zondan oluşmaktadır. Diğer testte ise zon ayırma duvarları üzerinde yer alan, bir zondan diğer zona geçişi sağlamak amacıyla tesis edilen kapı açık bırakılarak merdiven yuvası tek bir basınçlandırma zonuna indirgenmiştir. Bu test grubunun yapıldığı günde iç ve dış ortam arasındaki sıcaklık farkı 3°C olması nedeniyle baca etkisinin hava hareketi üzerinde yarattığı kuvvetler azdır ancak merdiven yuvasını zonlara ayırmanın basınçlandırılan merdiven üzerinde pozitif etkisi olduğu elde edilmiştir. Ölçümlerden elde edilen katlara göre basınç farkı dağılımı grafiklerinde, üç zondan oluşan sistemde bodrum katlara sağlanan basınçlandırmanın arttığı gözlemlenmiştir.

Çok yüksek bir binada merdiven basınçlandırma sisteminin CFD ile modellenmesi ilk defa bu çalışmada yapılmıştır. Yangın araştırmalarında sıklıkla kullanılan FDS paket programı ile ikinci test grubunda yer alan bir testin modeli yapılmıştır. Model sadece merdiven yuvası, basınçlandırma şaftı ve yangın güvenlik hollerini temsil eden hacımlardan oluşmaktadır. Model ile test sonuçlarının kıyaslanması sonucunda, FDS ile yapılan modellemenin kabul edilebilir mertebede olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen çözümler zamana bağlıdır ve saha testlerinde gerçekleştirilmesi oldukça güç olan baca etkisinin zamana bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Modelde, merdiven iç ortam sıcaklığı ile dış ortam sıcaklığı farkı 7°C'dir ve fanların çalışmaya başlamasından itibaren merdivende termodinamik dengenin sağlanması 10 dakikadan fazla sürede gerçekleşmiştir.



EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATIONS ON STAIR PRESSURIZATION SYSTEMS IN VERY HIGH RISE BUILDINGS

SUMMARY

Pressurized stairwells are the primary vertical evacuation route from the building. The practice of the pressurized stairwells is defined in the fire safety codes and standards of many countries. The fresh air is supplied by fan or fans into stairwells by this means pressurization is provided and smoke spread into stairwell is prevented. The limits of the pressurization are defined in many codes and standards. The minimum pressurization limit prevents the stairwell to be smoke filled and the maximum pressurization limit restricts the door blocking forces exerted on the stairwell door. The specified limits should be provided along the height of the stairwell under any circumstances.

The stairwell pressurization systems are affected by the temperature difference between the stairwell and ambient (stack effect), wind effect, excessive temperatures of the fire, HVAC systems of the building and elevator piston effect. Also some doors of the pressurized stairwell is opened and closed in compliance with the fire floor and building evacuation plan. Under these dynamic circumstances, some precautions are taken to fulfill the requirements of pressurization limit along the height of the stairwell. One of the precautions is altering the flow rate of the air into the stairwell by modulating frequency converters of the fans, which are controlled by one or more static pressure sensors that sense the pressure difference between the stairwell and the building. The other one is discharging pressure buildup in the stairwell directly from stairwell to the outside via relief vents.

Pressurization system of each stairwell are individually designed and two scenarios are taken into the consideration for each design. All of the doors of the stairwell are closed in one scenario and the doors of the selected floors are opened for the other scenario. The air flow rate of the supply system depends on the all of the doors closed scenario and the size of the relief vent depends on the doors of the selected floors open scenario.

Over the past few decades, very high rise buildings have been constructed widely and the number of buildings with a height more than 100 m is increasing. The fire safety measures in such high rise buildings are still investigated. Thus stairwell pressurization system performance, design and system components in high rise buildings are still examined. In practice, additional measures are taken to fulfill the requirements such as dividing a stairwell into a number of pressurization zones, supplying pressurization air into stairwell by multiple air supply points such as an air supply point for each floor and providing a protected lobby in front of the stairwell.

In this study, parameters that affect the stairwell pressurization system and the system design are investigated via executing field tests and numerical studies. The stairwell in which the field tests were executed is 163 m height and serves 40 floors of the

building. The stairwell divided vertically into three pressurization zones by use of wall and door assembly at two intermediate landings of the staircase and a protected lobby is constructed in front of the stairwell at each floor. Three identical pressurization fans serve to the stairwell and untreated pressurized air is introduced into the staircase through grilles at each floor. A pressurization shaft is utilized for the transfer of pressurization air into the stairwell.

The tests are conducted after working hours of the office building in order to prevent the factors disturbing the accuracy of the measurements, such as an uncontrolled opening of a stair door by an occupant. Set of the tests which are compared with each other is completed on the same night, to minimize the effect of outside weather conditions, e.g. wind and temperature. Three sets of tests is performed and each test set consist four test. Each test set investigate an individual affected parameter of the stairwell pressurization system.

Two separate conditions, which are based on the system design are taken into account for the test sets. These are referred as “all doors closed” and “critical doors open” conditions. By this means the effect of the investigated parameters are examined under two different conditions. Frequency converters of the pressurization fans are adjusted to a fixed value for each condition in order to supply the same amount of air into the stairwell, i.e. 20 Hz for all doors closed condition and 40 Hz for critical doors open condition.

For each test case, two different pressure difference values are measured for all floors, one of the pressure difference value is taken in between the stairwell and the fire protection lobby and the other one is taken in between the stairwell and the corridor. Air velocity at the door openings are measured as an average of 15 readings for the tests of critical doors open condition. Also the ambient temperature and wind flow rate is measured at the beginning of each set of the test. For the tests of all doors closed condition, the pressurization air flow rate is obtained by calculating the leakage air flow rate through the closed doors by using pressure difference measurements in between the stairwell and the corridor. The air flow rate of the critical doors open condition tests are calculated by obtaining the leakages through the closed doors and adding the air flow rates measured across open doors. The supply air flow rates of each test are calculated individually by this method which based on conservation of mass principle. After completion of the tests, it was later decided that the flow rate values obtained by the above method be compared with those obtained by using another method. As the alternative method, velocity is measured at the fresh air inlet connection of each fan, which is a more straight forward approach than using the fan characteristic curve to estimate the flow rate. Each fan inlet is divided into 21 equally sized meshes and velocity of each mesh is measured approximately at the mesh center. One measurement are conducted for each condition by this method.

First set of test is comprised of the critical doors open condition tests and investigates which floor chosen as design fire floor is more critical for the stairwell pressurization system. The staircase doors at discharge floor are opened in each of four tests of this test set . The staircase doors at 33th and 22th floors are held in open position for first and second tests respectively, these floors are located in the top pressurization zone of the stairwell. The 6th floor of the stairwell which coincide the middle pressurization zone is chosen for the third test and the doors in between the staircase and the corridor are held in open position for this test. For the fourth test, all of the stairwell doors are closed except the doors of discharge floor. Pressure difference curves with respect to

height of building of first and second test are the same, thus it is concluded that opening stairwell doors at any floor of a specific zone does not have a significant impact on the system. The comparison of the opening stairwell doors at different zones is done by using the results of first (or second) test with the third test. A slight difference between the pressure difference curves of this two test is observed and it is considered that the cause of this difference is due to the floors of the zones which has the connection of the pressurization fans and the pressurization shaft.

The presence of fire protection lobby is investigated in the second set of tests. The fire protection lobbies locate in front of the stair at each floor, i.e. when a person on a floor needs to use the stair, he/she has to open the fire protection lobby door and the stair door in sequence. The fire protection lobbies are not pressurized with another pressurization system indeed these spaces are pressured indirectly with stairwell pressurization. The building without fire protection lobby is simulated by keeping only one of the two doors (of the stair and fire protection lobby) open at each floor. Two different conditions are taken into account, where the first one (all doors closed) analyses the condition that all stair doors are kept closed and the second one (critical doors are open) is conducted when the stairwell is opened to the floor on a given level (fire floor) and the stair termination door at the discharge floor is kept open. The comparison of the results for test cases with and without fire protection lobby revealed that, at constant pressurized air flow rate, the presence of fire protection lobby increases the pressure difference between the staircase and the corridor. The ratio of this increment depends on whether or not an open door is available in the corresponding vertical pressurization zone. This result is proved mathematically. In a zone where an open door is available, fire protection lobby introduces a relatively low increment of the pressure difference between the stair and the corridor.

In the third set of tests, the effect of dividing stairwell into vertical pressurization zones is investigated. The main advantage of this practice is that it allows acceptable pressurization of stairwells of high rise buildings despite the negative effect of stack effect. Two tests are executed for each condition; the stairwell is comprised of three zones in one of the tests and the stairwell consists of one pressurization zone by opening the doors which locates in between the pressurization zones. It was obtained that the dividing stairwell into zones has positive effect on the pressurization of stairwells.

The CFD modeling of stairwell pressurization system in a very high rise building is executed in this study. One test of the second set of test is modeled by using Fire Dynamics Simulator (FDS) which is extensively used for fire applications. The model consists of the volumes of stairwell, pressurization shaft and fire protection lobbies. After the modeling studies including grid dependency analysis, the pressure difference curves of the test and the model are compared. It is concluded that the modeling a stairwell pressurization system in a very high rise building with FDS gives acceptable results. Time dependent model results are examined in order to investigate the rate of change of stack effect. Although the difference between the stairwell and ambient temperatures is 7°C, the thermodynamic equilibrium is ensured after 10 minutes in the modeling studies.



1. GİRİŞ

Yangınlarda meydana gelen ölüm olaylarının yüksek sıcaklığa maruz kalmaktan çok, karbonmonoksit zehirlenmesi veya oksijen yetersizliği sebebiyle meydana geldiği bilinen bir gerçektir. Kapalı mekânlarda çıkan yangınlarda duman, sıcaklığının yüksek olması sebebiyle düşey shaftlara (merdiven yuvalarına, asansör kuyularına, mekanik ve elektrik shaftlara) yönelerek üst katlara doğru hareket eder. Bu nedenle bina yangınlarında ölüm olayları genellikle binanın üst katlarında meydana gelir. Ayrıca asansör kuyularının ve merdiven yuvalarının dumanla dolması insanların binadan tahliye edilmesi ve itfaiyenin yangına müdahale etmesini güçleştirir. Bu nedenle binalarda yangın anında duman hareketinin yönetilmesi gerekir.

Duman kontrol sistemleri ile duman ve zehirli gazların binadan çıkarılması, binada bulunanların dumandan arındırılmış kaçış yolları vasıtası ile binadan tahliye edilmesi ve itfaiyenin yangına müdahalesinin kolaylaştırılması amaçlanır. Duman kontrol sistemleri arasında yer alan başlıca uygulamalardan biri basınçlandırma sistemleridir. Basınçlandırma sistemlerinin öncelikli hedefi bina tahliyesi sırasında kaçış yollarına dumanın girmesinin engellenmesi ve sonrasında itfaiyenin yangına müdahalesini kolaylaştırmaktır.

Türkiye’de merdiven basınçlandırma sistemleri hakkındaki hususlar Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik’te (BYKHY) [2] belirtilmektedir. BYKHY’de hakkında yeterli hüküm bulunmayan hususlar için, öncelikle Türk Standartları’na, ikinci olarak Avrupa Birliği Standartları’na başvurulması, daha sonra uluslararası geçerliliği olan bir standardın kullanılması gerekmektedir. Merdiven basınçlandırma sistemlerinin konu edildiği Avrupa standardı EN 12101-6’dır [3] ve bu standardın hazırlanmasında İngiliz standardı BS 5588-4 [4] esas alınmıştır. EN 12101-6 standardı, TS EN 12101-6 ismi ile Türkçe’ye çevrilmiştir. Uluslararası geçerliliği olan standart olarak Amerikan standardı olan NFPA 92 [5] kullanılabılır.

Bu tez çalışmasına konu olan “çok yüksek bina” tanımı ile 100 m ve üzeri yüksekliğe sahip binalar kastedilmektedir. BYKHY’te “yüksek bina” tanımı binanın kot aldığı

noktadan saçak seviyesine kadar olan mesafenin 21.5 m'den fazla olduğu binalar ile bodrum katlar, asma katlar ve çatı arası piyesler dâhil olmak üzere toplam yüksekliği 30.5 m'den fazla olan binalar ifade edilmektedir.

Merdivenlerde sağlanan basınçlandırmanın, yangın katında dumanın ve yangının yarattığı basınçtan yüksek olması gerekir. Çeşitli ülkelerin standartları ve kodlarında merdiven yuvası ile kat kullanım alanları arasındaki en düşük basınç farkı değeri belirtilmiştir. BYKHY'ye göre merdiven kapıları kapalı iken merdiven yuvası ile bina kullanım alanları arasındaki basınç farkının en az 50 Pa olması şarttır, bu değer açık kapı durumu için (bazı katlarda kapılar açıkken, kapıların kapalı olduğu diğer katlarda) 15 Pa'dır.

Yangın anında kaçış yollarına yönelen insanların binadan tahliyesini kolaylaştırmak için kaçış yolu üzerinde bulunan kapılar kaçış yönünde itilerek dışarı doğru açılır. Merdiven basınçlandırma sistemi ile sağlanan pozitif basınç, merdiven kapısının açılma yönünün tersinde bir kuvvet oluşturur. Merdiven tarafında basıncın çok yüksek olması, kapının açılmasını zorlaştırır veya imkânsız hale getirebilir. Merdiven kapıları aynı zamanda otomatik kapı kapatıcılar ile donatılır ve otomatik kapı kapatıcılar da kapı açılış yönünün tersi yönde kuvvet uygular. BYKHY'te [2], diğer standartlarda olduğu gibi, kapının açılmasını engelleyen kuvvetin maksimum değeri için bir sınırlama getirilmiştir. Bu sınırlama şu şekilde ifade edilmektedir: “hem basınçlı havanın ve hem de otomatik kapı kapatıcının kapı üzerine yarattığı kuvveti yenerek kapıyı açmak için kapı koluna uygulanması gereken kuvvetin 110 Newton'u geçmemesi gerekir”.

Bir binada yangın çıktığında öncelikle merdiven kapıları kapalı olacak ve basınçlandırma için gerekli hava debisi ihtiyacı az olacaktır. Daha sonra insanların merdivene yönelmesi ile merdivene açılan kapılar açılacak ve basınçlandırma için gereken debi artacaktır. Basınçlandırma sisteminin standart ve kodlarca istenen gereksinimlere, dinamik şartlar altında cevap vermesi gerekmektedir.

Çok yüksek binalarda, merdiven yuvası boyunca belirli limitler aralığında basınçlandırmanın sağlanması için karmaşık tedbirler alınmakta ve istenilen basınçlandırmanın sağlanmasının zor olduğu literatürde yer alan bazı çalışmalarda belirtilmektedir [6, 7]. Alınan tedbirlerin ve tesir eden parametrelerin, çok yüksek binalar üzerindeki etkilerinin testlerle incelendiği çalışmalar literatürde oldukça sınırlı

sayıdadır. Yangın araştırmalarında, ölçekli model üzerinde deney yapmak tercih edilen bir metot değildir, bu sebeple çok yüksek binalarda saha testleri gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada mevcut birçok yüksek binada saha testi çalışmaları yapılarak, merdiven basınçlandırma sistemine etkiyen çeşitli parametreler incelenmiştir. Ayrıca sahada yapılan bir adet testin CFD ortamında modellenmesi yapılmıştır ve baca etkisinin zamana göre değişimi incelenmiştir.

Ülkemizde farklı bir uygulama olarak belirli bir yüksekliğin üzerindeki binalarda kaçış merdivenine erişim korunaklı bir lobiden geçerek yapılmaktadır. Yangın güvenlik holü ismi verilen bu lobinin, merdiven basınçlandırma sistemi üzerine etkileri saha çalışmalarıyla incelenmiştir. Ayrıca yine belirli bir yüksekliği aşan binalarda, merdiven yuvası birden fazla zona ayrılmaktadır. Merdiven yuvasını zonlara ayırmanın etkisi de bu çalışmada saha testleri ile incelenmektedir. Merdiven basınçlandırma sistemi tasarımında belirli katlarda merdiven ile koridor arasındaki kapılar açılarak hesaplama yapılır. Bu çalışmada ayrıca hangi katta merdiven ile koridor arasındaki kapıları amanın daha kritik olduğu incelenmiştir.

Merdiven basınçlandırma sistemi tasarımında merdiven iç ortam sıcaklığı, bina sıcaklığına eş mertebelerde alınmaktadır. Literatürde, merdivene şartlandırılmayan hava beslendiği için merdiven sıcaklığının dış ortam sıcaklığına eş mertebelerde alınmasını öneren çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada yapılan CFD modelleme ile merdivendeki sıcaklığın ve baca etkisinin zamana göre değişimi incelenmiştir. Ayrıca çok yüksek bir binada basınçlandırılan merdivenin CFD ile modellenmesi ilk kez bu çalışmada yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümü olan Kaynak Araştırması bölümünde, literatürde yer alan çalışmaların özeti yer almaktadır. Üçüncü bölümde merdiven basınçlandırma sistemi bileşenleri, farklı uygulama tipleri, hesaplama metotları, binalarda hava hareketine yön veren kuvvetler açıklanmakta ve BYKHY, EN 12101-6 ve NFPA 92’de yer alan hükümler karşılaştırmalı olarak ele alınmaktadır. Dördüncü bölümde saha testleri ve sonuçları, beşinci bölümde ise CFD alışmaları ve sonuçları yer almaktadır. Altıncı bölümde sonuçlar tartışılmaktadır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Basınçlandırma konsepti 20. yüzyılın başından itibaren ameliyathaneler ve laboratuvarlarda biyolojik ve kimyasal kirleticilerin yayılmasını engellemek için kullanılmaktadır. 1960'lı yıllardan günümüze kadar merdiven basınçlandırma sistemleri konusunda araştırmalar yapılmakta ve 1970'den itibaren binalarda dumanın yayılmasını engellemek için de kullanılmaktadır [1]. Bu araştırmalar 1983'te Klote ve Forgetgill'in hazırladığı kitapta [8] bir araya getirilmiştir. Bu kitap daha sonra Klote ve Milke tarafından 1992 [9] ve 2002 [10] yıllarında tekrar gözden geçirilerek genişletilmiştir. Bu sayede yapılan araştırmaların bir araya toplandığı bir kaynak oluşturulduğu gibi, duman kontrol sistemleri konusunda çalışan mühendislere de kılavuz oluşturulmuştur. 2012 yılında yeni bir güncelleme yapılarak Klote ve arkadaşları tarafından *Handbook of Smoke Control Engineering* kitabı [11] çıkarılmıştır.

Literatürde merdiven basınçlandırma konusunda yapılan çalışmalar kronolojik olarak sıralanmak istenirse, ilk çalışmalarda yangın katında kapalı merdiven kapısının iki tarafındaki basınç farkı ele alınarak, merdivene duman girişinin engelleyen minimum basınç farkı araştırılmıştır. Aynı zamanda ilk çalışmalarda yangın katında merdiven kapısı açık olduğunda, merdivene duman girişini engellenmesi için merdiven kapısından kata doğru yönelen minimum hava hızı araştırılmıştır. Daha sonraki çalışmalarda ise kapı, duvar gibi çeşitli merdiven ve bina bileşenlerinin sızıntı karakteristiği araştırılmıştır. Sızıntı karakteristikleri, merdiven basınçlandırma sistemi tasarımında kullanılan temel öğelerden biridir. Devam eden çalışmalarda merdiven basınçlandırma sisteminin çeşitli bileşenlerinin etkileri ve yaşayan binalarda merdiven basınçlandırma sistemlerinin istenileni karşılayıp karşılamadığı ve bunun nedenleri incelenmektedir. Aynı zamanda sistem tasarımının nasıl yapılması gerektiği, matematiksel modelleme, farklı modelleme ortamlarında hazırlanan modeller ile basınçlandırılan merdivenler üzerinde çeşitli incelemeler de literatürde yer almaktadır.

Bu bölümde literatürdeki çalışmalar iki kısma ayrılarak incelenmektedir; ilk kısımda deneysel çalışmalar, ikinci kısımda ise sayısal çalışmalar yer almaktadır. Deneysel

Çalışmaların incelendiği kısımda öncelikle merdiven içerisinde duman ve hava hareketi ve bu harekete yön veren kuvvetler hakkında yapılan araştırmalar daha sonra merdiven basınçlandırma sistemleri üzerine yapılan çalışmalar derlenmiştir.

2.1 Deneysel alışmalar

McGuire 1967 yılında yaptığı çalışmada [12] duman ile atmosferik havanın birbirine benzer olduğunu bildirmektedir. Duman ve havanın ana bileşeninin azot olduğu, oksijen ve karbondioksit oranlarının %10 oranında farklılık gösterdiği ve bu farkın önemli bir değişikliğe sebep olmadığı ancak dumanın içindeki partiküllerin görüş mesafesini oldukça düşürdüğu belirtilmektedir. Ayrıca McGuire çalışmasında [12] duman hareketine yön veren kuvvetleri açıklamaktadır ve bu kuvvetleri yarattıkları basınç yükü üzerinden kıyaslamaktadır. Duman hareketine yön veren kuvvetler; baca etkisi, rüzgâr etkisi, bina iklimlendirme sistemleri, asansör piston etkisi, yanma gazlarının âni genleşmesi ve bu gazlara etkiyen kaldırma kuvvetidir. Tamura ve Wilson 1967 yılında yaptığı çalışmada üç farklı binada baca etkisini incelemiştir [13]. 1969 yılında Tamura yaptığı sayısal çalışma ile baca etkisi ve rüzgâr etkisini ayrı ayrı ve bir arada ele alarak incelemiştir [14]. Duman hareketi ve duman kontrolü araştırmaları için Kanada’da *Experimental Fire Tower* adı verilen özel bir bina inşa edilmiştir ve bu binada birçok deneysel araştırma yapılmıştır. Achakji’nin 1987 yılında yaptığı çalışmada [15] bu özel binanın tüm ayrıntıları açıklanmaktadır. Tamura ve Klote, 1989 yılında *Experimental Fire Tower*’da yaptıkları deneyler ile yangın anında ortaya çıkan genleşme ve dumana etkiyen kaldırma kuvvetlerinin etkilerini incelemişlerdir [16]. 1990 yılında *Experimental Fire Tower*’da Tamura tarafından yapılan testlerde rüzgâr ve baca etkisi araştırılmıştır [17]. Bir otel binasında iklimlendirme sistemlerinin duman hareketi üzerine etkisi Tamura ve Shaw tarafından 1985 yılında araştırılmıştır [18]. Tamura ve Wilson’un 1967 yılında yaptığı çalışmada ve Tamura ve arkadaşlarının 1970 yılındaki çalışmasında, bina iklimlendirme sistemleri duman kontrolü için özelleşmiş modda çalışırken, baca etkisini incelemişlerdir [19, 20]. Tamura ve Klote asansör piston etkisinin duman hareketine etkilerini 1986 yılında incelemiştir [21]. Bu alışmalar Klote ve Milke’nin 1992 ve 2002 yıllarında hazırladıkları kitaplarda [9, 10] yer almaktadır. Mowrer’in 2009 yılında yaptığı çalışmada ise, duman hareketine yön veren kuvvetler ve etkileri tekrar ele alınmıştır [22].

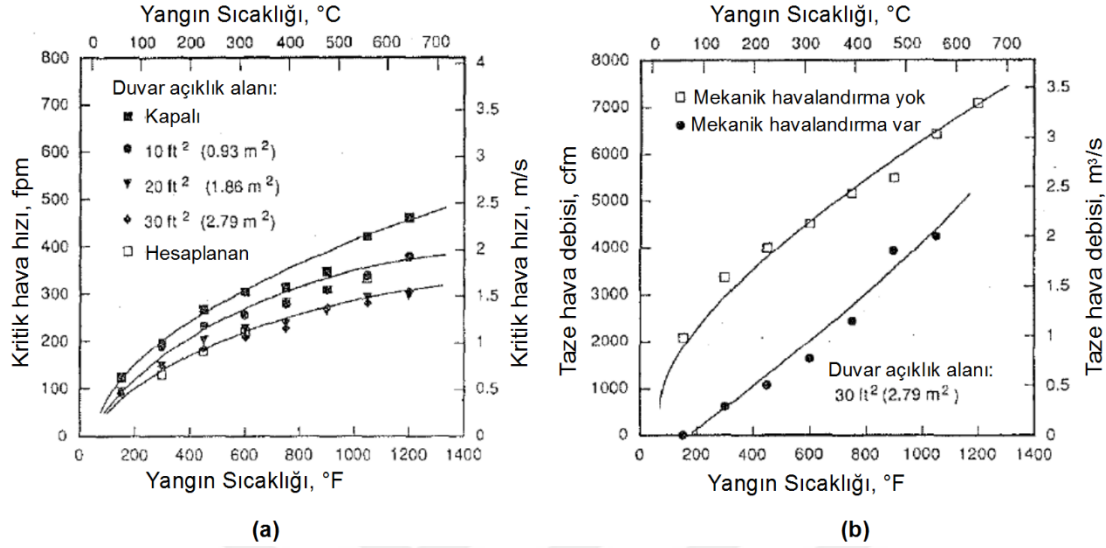
Yangının çıktığı kompartımandaki basınç, yanma gazlarının âni genleşmesi ve yanma gazlarına etkiyen kaldırma kuvvetleri nedeniyle binada bulunan diğer yerlerdeki basınç değerlerine göre daha yüksek mertebelere ulaşır. Merdivenlere dumanın girişini engellemek için bu basıncın yenilmesi gerekmektedir. Bu nedenle yangın katında kapının iki tarafı arasındaki basınç farkının ne olması gerektiği ve yangın katında merdiven kapısı açık iken dumanın merdivenlere girişini engellemek için kapıdan çıkması gereken hava hızı araştırmaları büyük öneme sahiptir.

DeCicco 1972 yılında yaptığı merdiven basınçlandırma sistemi testlerinde, yangın katında, dumanın merdivenlere sirayetini engellemek için merdiven ile koridor arasında basınç farkının minimum 12.5 Pa olması gerektiğini bildirmiştir [23]. Yangın anında meydana gelen patlamaların yaratacağı aşırı basınçlar için, bu farkın 37 Pa olarak alınması gerektiği Shaw ve Tamura'nın 1976 yılında yaptığı çalışmada önerilmiştir [24].

Tamura 1989 yılında [25] ve 1991 yılında [26] yaptığı çalışmalarda yangın katında açık duran kapıdan kata doğru akan havanın, merdivenlere dumanın girişini engellemek için gereken kritik hızını belirlemeye çalışmıştır. Bu testler *Experimental Fire Tower* isimli binada gerçekleştirilmiştir. Farklı yangın sıcaklıklarında yapılan testlerde, yangın katında farklı havalandırma açıklığı alanları ve egzoz sisteminin etkisi incelenmiştir [26]. Yangın katında havalandırma açıklığı olmadığı zaman dumanın girişini engellemek için daha fazla miktarda havanın merdivenlere verilmesi gerekmekte ve kapıdaki kritik hava hızı artmaktadır, yangın katında açık duran merdiven kapısı nedeniyle basınçlandırma havasının da bu kata yöneldiği ve kattaki basınç artışına katkı sağladığı bildirilmektedir (Şekil 2.1-a). Yangın katında bir duvarda açıklık bulunan testlerde ise kritik hız değerleri daha düşüktür. Yangın katından egzoz yapıldığında belirlenen kritik hız değeri, 2.79 m² açıklık olan durumdaki kritik hız değeriyle eşdeğerdir. Egzoz yapılmayan durumda dumanın merdivene girişini engellemek için daha fazla havanın merdivenlere beslenmesi gerekmektedir (Şekil 2.1-b).

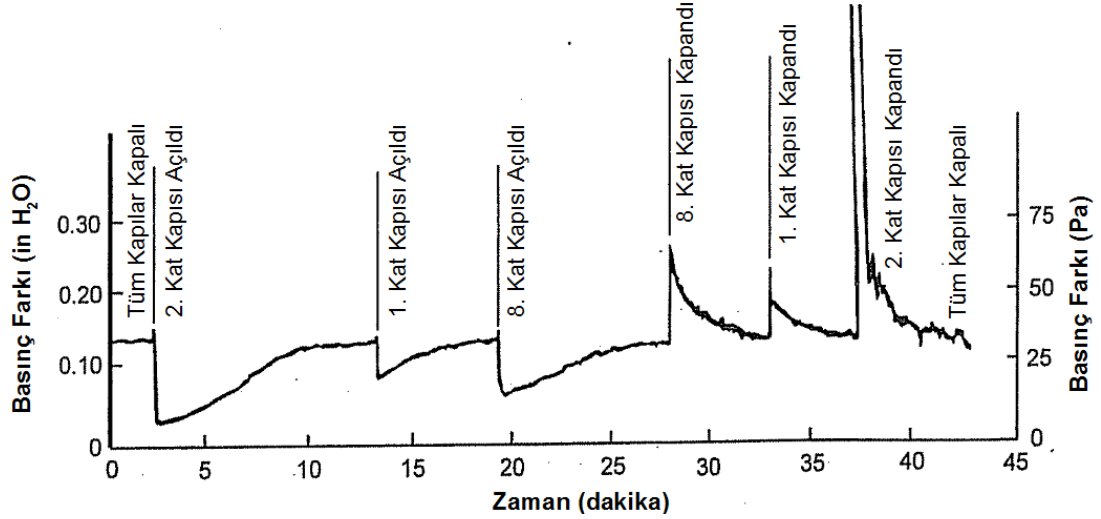
Basınçlandırma hava debisi miktarının, sızıntılardan geçerek merdivenleri terk eden hava miktarı ile açık duran merdiven kapılarından çıkan hava miktarını karşılaması gerekmektedir. Hava, merdiveni sızıntılar ve açık duran kapılar yolu ile terk etmektedir. Merdivenlere sağlanan debinin hesaplanması için sızıntı alanlarının bilinmesi gereklidir, bu nedenle sızıntı alanlarını araştıran birçok çalışma yapılmıştır

[27-31]. Bu çalışmalardan elde edilen sızıntı alanı değerleri Klote ve Milke'nin çalışmasında derlenmiştir [9], sızıntı alanları Bu çalışmanın üçüncü bölümünde ayrıntıları ile verilmektedir.



Şekil 2.1 : Merdivenden yangın katına doğru kırık hava hızı : (a) yangın katında, farklı boyutta havalandırma açıklıklarına ve yangın sıcaklıklarına göre kritik hava hızı. (b) Yangın katından egzoz olması ve olmaması durumunda farklı yangın sıcaklıkları için gerekli basınçlandırma debisi [26].

Literatürde, kullanımda olan binalarda (yaşayan binalarda) yapılan saha testleri de yer almaktadır. Bu çalışmalarda ana amaç farklı tiplerde sistemlerin incelenmesi olduğu gibi, mevcut sistemlerin tasarlandığı gibi çalışıp çalışmadığını kontrol etmek de olabilmektedir. Farklı tiplerde aşırı basınç tahliye menfezlerinin sistem üzerine etkileri Tamura tarafından 1990 yılında 22 katlı apartman ve 2 adet çok katlı ofis binalarında yapılan testlerle incelenmiştir [32]. Tamura 1990 yılında yayınladığı bir diğer çalışmada aşırı basınç tahliye mekanizmalarını *experimental fire tower* üzerinde de test etmiştir [33]. Ayrıca Tamura bu çalışmasında fanın sağladığı debinin bir adet sensörden alınan kontrol ile değiştirildiği sistemde, sistem cevabını incelemiştir [33]. Çalışmada sırasıyla 2., 1. ve 8. kat kapıları açılmış ve kapatılmıştır ve bu sırada belirli bir katta merdiven ile koridor arasındaki basınç farkını zamana göre kaydetmiştir (Şekil 2.2). İlk hâlde 33 Pa basınç farkı okumuştur, 2., 1. ve 8. kat kapıları açıldığında basınç farkının ilk hâline dönmesi sırasıyla 10,5 dakika, 6 dakika ve 8.5 dakika almıştır. 8., 1. ve 2. kat kapıları kapandığında ilk hâline dönmesi sırasıyla 5 dakika, 4.5 dakika ve 5.5 dakika almıştır.



Şekil 2.2 : Değişken-debili fanlı merdiven basınçlandırma sisteminin sistem cevabı [32].

Chow 1993 yılında Hong Kong'ta 11 katlı bir binada merdiven basınçlandırma sistemlerinin performansını incelemiştir [34] ve sistemin yerel yönetmelikte istenilenleri karşılayamadığı, yangın anında sistemin başarılı bir şekilde çalışmayacağı sonucuna varmıştır. Bellido ve arkadaşları 2009 yılında bir ofis kompleksinin altı farklı binasında merdiven basınçlandırma sistemlerini test etmişlerdir [35]. Aşırı basınç tahliye menfezlerinin merdiven içerisinde artan basıncı düşürmekte oldukça az bir etkiye sahip olduğunu ve frekans konvertörlerinin sistemi stabil olmayan bir çalışma durumuna soktuğu sonucuna varmışlardır. He 1999 yılında yaptığı çalışmada [36] basınçlandırma ve duman kontrolü sistemlerinin, yangın kompartımanındaki yangına etkilerini incelemiştir.

Literatürdeki birçok araştırmada, merdiven basınçlandırma sistemlerinin etkili olabilmesi için, yangın çıkan katın havalandırması gerektiği bildirilmektedir. Bu havalandırma kat duvarlarında açılabilir paneller (havalandırma açıklıkları), duman şaftları ve mekanik sistemlerle yapılmaktadır. Tamura 1978 yılında yaptığı çalışmada [37] yangın katında havalandırmanın önemini ortaya koymuştur ve havalandırma açıklığı büyüklüğünü deneysel olarak araştırmıştır. Tamura 1992 yılında yayınladığı makalede ise [38] önceki birkaç çalışmasını derleyerek bir araya getirmiş ve merdiven basınçlandırma sistemimin yanı sıra yangın katını havalandırmak için mekanik egzoz fanlarının da önemini vurgulamıştır.

Basınçlandırılan merdivenlere ulaşım doğrudan kat kullanım alanlarından yapılabildiği gibi korunaklı bir lobi vasıtasıyla yapılabilmektedir. Dünyanın farklı

yerlerinde korunan lobinin basınçlandırıldığı, taze hava beslemesi ve egzoz ile havalandırıldığı ve hiç basınçlandırılmadığı uygulamalar mevcuttur. Wang ve Gao 2004 yılında yaptıkları çalışmada [39] Çin’de merdiven ve korunan lobinin ayrı ayrı sistemler ile basınçlandırılmasının yerel mevzuat uyarınca gerekli olduğunu belirtmişler ve basınçlandırılan merdiven ve basınçlandırılan lobi ile ilgili araştırmalar yapmışlardır. Wang ve Gao yaptıkları çalışmanın sonucunda, merdiven basınçlandırmanın tek başına yeterli olduğunu ve aşırı basınçlandırma olduğu durumda merdiven ve lobi kapısının açılmasında büyük güçlüklerle karşılaşıldığını belirtmişlerdir. Kim ve arkadaşlarının 2014 yılında yaptığı çalışmada [40] ise Kore’de merdivenlere açılan lobinin de temiz hava ile basınçlandırıldığı bildirilmiştir. Bu çalışmada, lobi basınçlandırma sistemlerinin istenildiği gibi çalışmadığı belirtilmiş ve alternatif bir lobi basınçlandırma metodu önerilmiştir. Chung 1999 yılında yaptığı çalışmada [41] Tayvan’da lobilerin temiz hava ile beslendiği ve egzoz ile havanın dışarı atıldığı bir lobi havalandırma sisteminden bahsetmiştir. Klote 1993 yılında yaptığı çalışmada [42] asansör shaftı önünde yer alan basınçlandırılmış lobiler hakkında inceleme yapmış ve uygulanabilir olduğunu belirtmiştir.

Klote 2012 yılında [43] merdivenlerin işlem görmemiş dış hava ile basınçlandırıldığını bu nedenle merdiven ve dış ortam arasındaki sıcaklık farkının düşük olduğunu ve baca etkisinin de az olduğunu açıklamıştır. Ayrıca bina bir bölümden diğer bölüme geçilirken (örneğin alışveriş katlarından ofis katlara çıkılırken) taban alanının değişmesi ve kat ile dış ortam arasındaki alanların değişmesinin daha önemli olduğunu belirtmiştir. Bu nedenle otopark, otel lobisi, otel ortak kullanım alanları ve otel odası katlarının tamamına hizmet veren basınçlandırılmış merdivenin tasarımının daha zor olduğunu vurgulanmıştır.

Shi ve arkadaşları 2014 yılında yaptıkları çalışmada 1/3 oranında küçültülmüş bir bina modeli üzerinde yangın testleri yapmışlardır [44]. Altıncı katta heptan kullanılarak havuz yangını meydana getirilen çalışmada, merdivenlerde herhangi bir basınçlandırma sistemi bulunmamaktadır. Yangın olan katın bir üst katında, merdivenlerden dışarıya doğru cam açıldığında ısı ve kütle debisinde önemli değişiklikler olduğu belirtilmiştir.

Lay 2014 yılında yaptığı çalışmada [6] merdiven basınçlandırma sistemlerinin tasarlandığı gibi çalışmaktan çok uzak olduğunu, tasarımda birçok belirsiz parametre

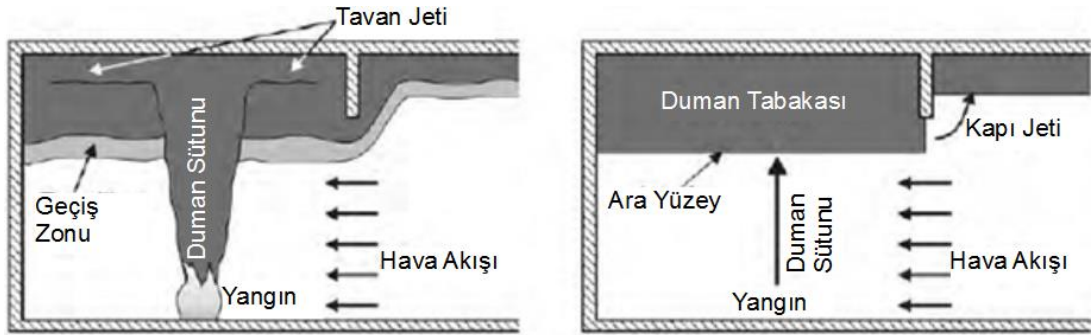
kullanıldığını vurgulamıştır ve merdiven basınçlandırmaya alternatif olabilecek bir dumandan korunan kaçış yolu metodu önermiştir.

2.2 Sayısal Çalışmalar

Duman kontrol sistemleri için deneyler veya testler yapmak oldukça zahmetlidir. Bu nedenle çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiş ve bilgisayar ortamında da araştırmalar yapılmıştır. Aynı zamanda bazı bilgisayar programları merdiven ve asansör basınçlandırma sistemleri tasarımı için geliştirilmiştir [9]. Literatürde yer alan matematiksel modeller farklı tiplerde olup, zon modeli, network modeli, diferansiyel modeli ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modeli şeklinde gruplara ayrılmaktadır.

2.2.1 Zon modelleri

Zon modeller kompartıman içerisindeki yangın deneylerinden elde edilen veriler doğrultusunda ortaya çıkmıştır. Zon modeller daha çok oda içerisindeki yangının modellenmesi için kullanılır ve yangın kompartımanı ve yakınındaki hacimleri üç kısım ele alır. Bu kısımlar; yangından yükselen duman sütunu, bunun üstünde sıcak duman tabakası zonu ve en altta yer alan dumansız ve soğuk olan alt zondur (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : Bir yangın kompartımanındaki yangın ile ideal zon model ile temsili [11].

Klote ve Forney'in 1993 yılında yaptığı çalışmada zon modeller ile bir şaftta duman hareketi incelenmiştir [45]. Feustel tarafından geliştirilen COMIS programı multi-zone model (çok-zonlu model) olarak isimlendirilmektedir [46], ancak programın prensibi network modele benzemektedir.

2.2.2 Network Modeli

Network modellerde, bir bina düğümlerden oluşan bir devre ile ifade edilir. Her bir düğüm noktasına sıkıştırılamaz statik akış denklemi uygulanır ve basınç yükseklik ile ilişkilendirilir. Her bir düğüm noktası bir odayı ifade edebildiği gibi, bir katı ya da bir zonu da temsil edebilmektedir. Bu yöntem ile binada bulunan düğüm noktası sayısı kadar cebirsel denklem elde edilir. Cebirsel denklemler birlikte çözülerek her noktadaki basınç değeri elde edilir. Basınç değerleri hesaplandıktan sonra, komşu düğüm noktaları arasındaki akış debisi hesaplanır. Network modelde ısı geçişi hesaplamaları yapılmaz ve binadaki sıcaklık dağılımı kabuller yapılarak veya ayrı bir program ile hesaplanır.

İlk Network modeller Sander ve Tamura tarafından 1974 yılında geliştirilmiştir [47]. 1982 yılında Klote tarafından geliştirilen ASCOS isimli network modeli [9, 48] özellikle basınçlandırılmış merdiven ve asansör analizleri için özelleştirilmiştir. ASCOS araştırma amacıyla hazırlanmış bir program olmasına rağmen 1980 ve 1990 yıllarında duman kontrol sistemleri tasarımında yaygın olarak kullanılmıştır [11].

Walton tarafından 1989 yılında AIRNET isimli network modeli geliştirilmiştir [49]. AIRNET yakınsama, hesaplama hızı ve bilgisayar hafızası kullanma konusunda oldukça gelişmiş bir modeldir [11]. NIST (*United States National Institute of Standards and Technology*) tarafından geliştirilen CONTAM programı AIRNET programındaki algoritmaların geliştirilmesiyle elde edilmiştir [11]. Literatürde CONTAM programı kullanılarak yapılan birçok araştırma bulunmaktadır. CONTAM programı günümüzde sistem tasarımında da kullanılmaktadır. CONTAM programı kullanımı, Walton ve Dols'un hazırladığı dokümanda [50] ayrıntılarıyla açıklanmaktadır.

Jo ve arkadaşları 2007 yılında CONTAM programını kullanarak yüksek binalarda baca etkisi ve basınç dağılımı karakteristiğini incelemişlerdir [51]. CONTAM gibi network modelleme kullanan programlarda bir düğüm noktası ile ifade edilen bir oda içerisinde sıcaklığın ve basıncın sabit olduğu kabul edilir. Bu nedenle bir oda içerisindeki duman hareketi bu yöntemle modellenemez. Bu kısıtın önüne geçmek için hibrit modeller geliştirilmektedir. Klote 2004 yılında CONTAM programı ile zon model olan CFAST programını birlikte kullanarak kaçış merdivenlerindeki hava akışını incelemiştir [52].

Miller ve Beasley 2008 ve 2009 yıllarında yaptıkları çalışmalarda baca etkisi nedeniyle dumanın merdivenlere ve asansöre dolmasının, basınçlandırma sistemleri kullanarak engellenmesini incelemişlerdir [53, 54]. Bu iki çalışmada da CONTAM programı kullanılmıştır. Bowers ve arkadaşlarının 2010 yılında CONTAM programını kullanarak yaptıkları çalışmada farklı dış ortam sıcaklığı ve farklı bina konfigürasyonlarında, bina içerisindeki farklı merdivenleri ve asansörleri basınçlandırarak detaylı analizler yapmışlardır [55].

2.2.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Modeli

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD veya CFD) ile modellemede, araştırılan hacim birçok kontrol hacmine bölünür ve her bir kontrol hacmi için ayrı ayrı kütle, momentum ve enerji denklemleri çözülür. Çözüm genellikle üç boyutlu ve zamana bağlı olarak yapılır. Araştırma amacıyla derlenen CFD programları olduğu gibi, ticari amaçlarla derlenen programlar da bulunmaktadır. NIST tarafından hazırlanan FDS (*Fire Dynamics Simulator*) programının binalarda yangın araştırmalarında sıklıkla kullanıldığı gözlemlenmiştir. FDS ücretsiz bir programdır.

Hadjisophocleus 2009 yılında yaptığı çalışmada [56], *Experimental Fire Tower* binasında yangın anında merdiven şaftındaki sıcaklık ve konsantrasyon değişimini hem deneysel olarak hem de FDS programı kullanarak incelemiştir. FDS programının yüksek binalardaki yangınların modellenmesinde kullanılabileceği sonucuna varmıştır.

Ferreira ve Cutonilli FDS programını kullanarak merdiven basınçlandırma sistemi ve alternatif duman kontrol sisteminin kıyaslamasını yapmıştır [7]. Kıyaslama yangın senaryosu üzerinden yapılmıştır. Alternatif sistem, merdivenlere hem hava beslenmesi hem de havanın egzoz edilmesinden oluşmakta olup, bu sistem merdiven havalandırması olarak da anılmaktadır. Böylece merdivenlere duman dolması halinde dumanın seyreltilmesi amaçlanır. Alternatif sistemin, merdiven basınçlandırma ile eşdeğer koruma sağladığı ve alternatif sistemde merdiven kapılarının açılmasında zorluk yaşanmayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Klote 2011 yılında merdivenlerin havalandırılmasının kullanılabilirliğini FDS programı ile araştırmıştır [57] ve uygulanabilir olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Chow 1998 yılında zon model olan CFAST ve CFD programı olan PHOENICS programını kullanarak yangın anında asansör şaftındaki hava ve duman hareketini

incelemiştir [58]. Zon model kullanılan modelde dumanın asansör şaftının en üst noktasında ulaşım zamanının hesabının gecikme içerdiği fakat CFD ile yapılan modelde gecikmenin olmadığını bildirmişlerdir. Dumanın asansör şaftını kullanarak ofis alanlarına yayılmasını engellemek için, ofis alanları ile asansör şaftı arasında lobi bulundurulmasını önermişlerdir. Long-fei ve arkadaşları 2011 yılında 150 m yüksekliğindeki bir binayı FDS programı ile modellemişler ve yangının sıçraması konusunda araştırma yapmışlardır [59].

Mercier ve Jaluria'nın 1999 yılında [60] yaptıkları deneysel çalışmada bir şaftta dumana etkiyen kaldırma kuvvetlerini incelemişlerdir ve bu çalışma 2003 yılında Cao ve Guo tarafından [61], 2008 yılında da Xiao ve arkadaşları tarafından [62] CFD ile modellenmiştir. Bu iki sayısal çalışmanın amacı FDS modellerini doğrulamak ve deney ortamında incelenemeyen parametrelerin etkileri incelenmektedir. Cao ve Guo [61] FDS ile yaptıkları çalışmada farklı yangın sıcaklıklarının ve şaftın boyutlarının dumana etkiyen kaldırma kuvvetleri üzerindeki etkisinin gözle görülür olduğu sonucuna varmışlardır. Xiao ve arkadaşlarının FDS ile yaptıkları çalışmada [62] ise akış alanında Reynolds, Grashof ve Biot sayılarının etkilerini detaylı olarak incelemişlerdir.

2003 ve 2005 yıllarında Qin ve arkadaşları basınçlandırılmayan merdivenlerde, duman ve hava arasındaki tabakayı incelemişlerdir [63, 64]. Yangın sıcaklığının duman sıcaklığı, hızı ve oksijen konsantrasyonunda oldukça etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Sun ve arkadaşları 2009 yılında deneysel olarak ve FDS programı ile basınçlandırma sistemi olmayan bir binanın 6 katlı merdiveninde yangın sonrasında çıkan dumanın hareketini incelemişlerdir [65]. Yapılan çalışmada en üst ve en alt kat hariç, duman sıcaklığının yükseklik arttıkça eksponansiyel olarak azaldığı sonucuna varmışlardır, en üst ve en alt katta ise duman sıcaklığı göreceli olarak fazladır (bu çalışmada yangın en alt kattadır).

2.2.4 Diferansiyel Modeller

Diferansiyel modeller ilk olarak Black tarafından geliştirilmiştir [66-70]. Bu tip modellemede network modellerde kullanılan cebirsel denklemler yerine diferansiyel denklemler kullanılır. Bu modellemede merdiven yuvası, asansör şaftı gibi binanın düşey şaftları kontrol hacimlerine bölünür ve her bir kontrol hacmi için kütle, momentum ve enerji korunumu denklemleri uygulanır [69]. Böylelikle şaft

içerisindeki sıcaklık dağımı da elde edilir. Diferansiyel modellemede, CFD modellemeden farklı olarak hava ve duman ideal gaz olarak kabul edilir ve sürekli rejimde tek boyutlu çözüm yapılabilir.

Black COSMO adını verdiği diferansiyel modeli ile çeşitli çalışmalar yapmıştır; kat basınçlandırma ile dumandan korunan hacim yaratmanın etkilerini [66], yangın anında asansör shaftında dumanın hareketini [67], yangın anında havalandırma sistemi ile katların basınçlandırılmasının duman hareketine etkilerini [68] ve merdiven basınçlandırma sistemlerini [70] incelemiştir.

2.3 Standartlar ve Kodlar

Dünyada birçok ülke yangınları önlemek ve yangın anında can ve mal güvenliğini sağlamak için standartlar ve kodlar geliştirmiştir. Ülkemizde de Türkiye Cumhuriyeti Bakanlar Kurulunca onaylanmış olan *Binaların Yangından Korunması Hakkındaki Yönetmelik* (BYKHY) [2] kullanılmaktadır. Avrupa Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri'nde farklı konular (algılama sistemleri, sulu söndürme sistemleri vb.) için farklı standartlar geliştirilmiştir. Merdiven basınçlandırma sistemleri ve bileşenleri için Avrupa Birliği'nde EN 12101-6 [3], Amerika'da ise NFPA 92 [5] kullanılmaktadır. Avrupa Birliği uyum süreci nedeniyle EN 12101-6 standardının ülkemizde de geçerliliği bulunmaktadır ve TS-EN 12101-6 ismiyle ülkemizde geçerli Türk Standardı olarak kullanılmaktadır. Tasarımda öncelikle yönetmelik (BYKHY) hükümleri dikkate alınır ve yönetmelikte hakkında yeterli hüküm bulunmayan hususlar için sırasıyla Türk Standardı, Avrupa Standartları ve uluslararası geçerliliği kabul edilen standartlar esas alınır.

BYKHY'de öncelikle sistemin hangi şartlarda zorunlu olduğu belirtilir ve tasarımın nasıl yapılacağına dair bazı sınırlı bilgiler verilir. EN 12101-6 ve NFPA 92 ise tasarımın nasıl yapılacağına ilişkin ayrıntılar içerir. Bu çalışmanın dördüncü bölümünde yönetmelikte ve standartlarda yer alan bilgiler kıyaslanmaktadır.



3. MERDİVEN BASINÇLANDIRMA SİSTEMLERİ

Standart ve kodlarda istenilen düzeyde basınçlandırmanın tüm merdiven yuvası boyunca sağlanması, hava hareketine yön veren kuvvetler tarafından engellendiği gibi çok yüksek binalarda merdiven yuvası yüksekliğinin fazla olması sebebiyle de güçleşmektedir. Bu sebeple basınçlandırma sistemi sadece merdivene hava besleyen fandan oluşmamakta, farklı sistem bileşenleri bulunmaktadır. Ayrıca farklı yapısal özelliklerde basınçlandırma sistemi uygulamaları yapılmaktadır. Bu bileşenler ve uygulamalar hakkındaki gereksinimler standart ve kodlarda da yer almaktadır.

Kaçış merdiveni ve merdiven basınçlandırma sistemi üzerine etkiyen parametreler olarak sadece hava hareketine yön veren kuvvetlerin gözönüne alınması yeterli değildir. Farklı sistem bileşenleri (fan sayısı, frekans konvertörü, aşırı basınç tahliye mekanizmaları) ve farklı uygulamalar (merdivene bir ya da daha çok noktadan hava beslenmesi, merdivenin düşey doğrultuda birden fazla zona bölünmesi v.b.) da kaçış merdiveni ve basınçlandırma sistemi üzerine etkimektedir.

Bu bölümde merdiven basınçlandırma sistemini oluşturan bileşenler, farklı uygulama tipleri, hava hareketine yön veren kuvvetler açıklanmakta ve BYKHY, EN 12101-6 ve NFPA 92’de yer alan hükümler karşılaştırmalı olarak ele alınmaktadır.

3.1 Sistem Bileşenleri ve Farklı Uygulama Tipleri

Basınçlandırma sistemlerinde, fan dış ortamdan aldığı taze havayı herhangi bir ısıtma, soğutma veya nemlendirme işlemi uygulamadan kanallarla merdivene iletir. Fanın dışarıdan hava aldığı yerin, dumandan etkilenmeyecek bir konumda olması gerekir. Fan en üst seviyede olduğu gibi en alt seviyede veya ara katlarda da yer alabilmektedir. Çok yüksek binalarda ise genellikle birden fazla fan kullanılmaktadır.

Kaçış merdiveni kapılarının tamamının kapalı olmasıyla, kapıların bazılarının açılması hâlinde gereken debi ihtiyacı farklıdır. Değişen debi ihtiyacını karşılamak için çeşitli tedbirler alınmaktadır. Bu tedbirler fanın devir sayısının kontrol edilmesi ve aşırı basınca neden olan havanın tahliyesi için özel menfezlerin kullanılmasıdır.

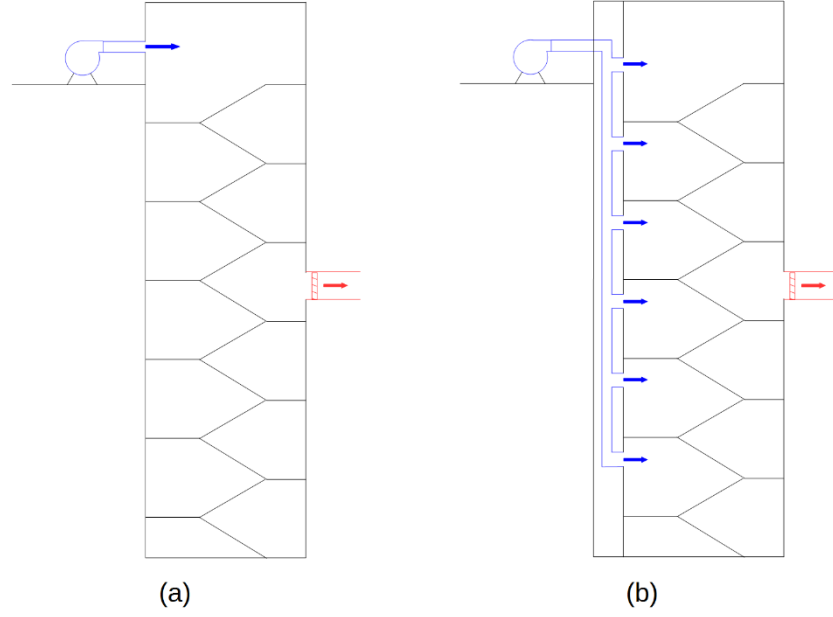
Merdiven basınçlandırma sistemi fan(lar)ı farklı debi ihtiyaçlarına göre farklı devir sayılarında çalışabilmek için frekans konvertörlüdür. Frekans konvertörü merdiven ile kat kullanım alanları arasındaki basınç farkını ölçen sensörler ile kontrol edilir. Genellikle her bir basınçlandırma fanı için iki adet sensör kullanılmaktadır.

Fanın kapasitesi frekans konvertörü ile ancak belirli bir değere kadar düşürülebilmektedir. Tüm merdiven kapıları kapalı olduğunda gereken debi miktarı genellikle fanın en düşük devirde sağladığı debi değerinden düşüktür. Tipik uygulamalarda frekans konvertörü ile debinin %30 kadar düşürülmesine izin verildiği, aksi halde yeterince soğutma yapılamayan fan motorunun çalışmama riski olduğu bilinmektedir [71]. Bu durumda fanın en düşük devrindeki debi değeri ile tüm kapıların kapalı olduğu durum için gerekli olan debi değeri arasındaki farkın, aşırı basınç tahliye menfezi ile bina dışına atılması gerekir.

Merdivende belirlenen basınç değerinin üzerinde basınçlandırma olduğunda, tahliye menfezinde bulunan tahliye damperi (relief damper) açılarak fazla hava merdiven dışına boşaltılır. Tahliye menfezinde bulunan tahliye damperi karşıt ağırlık prensibine göre çalışabildiği gibi, motorlu da olabilmektedir. Karşıt ağırlık prensibine göre çalışan relief damperlerde, damperin merdivene bakan yüzeyinde belirlenen değerden fazla basınç oluştuğunda damper açılır ve fazla hava boşaltılır. Fazla hava doğrudan bina dışına boşaltılacak şekilde düzenleme yapılır.

Frekans konvertörlü fan ve aşırı basınç tahliye menfezleri ülkemizde sıklıkla kullanılan uygulamalardır. Bunun dışında, farklı ülkelerde merdiven tahliye kapısının sürekli açık tutulması suretiyle tahliye menfezi olarak kullanıldığı [33] ve fana bypass sisteminin monte edildiği uygulamalar [5] da mevcuttur.

Çok yüksek binalarda basınçlandırmanın merdiven yuvası boyunca homojen dağılabilmesi için alınan tedbirlerden biri merdiven yuvasına birden fazla noktadan üfleme yapılmasıdır. Şekil 3.1’de tekli enjeksiyon ve çoklu enjeksiyon sistemleri gösterilmektedir. Şekil üzerinde mavi ile gösterilenler taze hava girişidir, kırmızı ile gösterilen ise aşırı basınç tahliye mekanizmasıdır. Tekli enjeksiyon sistemlerinde, fandan gelen taze doğrudan merdiven içerisine aktarılır (Şekil 3.1-a). Çoklu enjeksiyon sistemlerinde ise (Şekil 3.1-b) fandan gelen taze hava, düşey bir shaft içerisinde yer alan kanal sistemi ile her katta merdivene beslenmektedir. Çoklu enjeksiyon her üç katta bir olacak şekilde de yapılabilir.



Şekil 3.1 : Merdiven Basınçlandırma sistemleri: a) tekli enjeksiyon. b) çoklu enjeksiyon.

Alınan tedbirlerden bir başkası ise merdiven yuvasının birden fazla zona bölünmesidir. Her bir merdiven zonu duvarlar ile birbirinden ayrılır. İnsanların bir zondan diğer zona geçişini sağlamak için zon ayırım duvarları üzerinde bir kapı bulunur. Bu kapı açık olduğunda zonlamanın etkisi kaybolur, bu sebeple zon ayırım duvarları üzerinde yer alan bu kapıların üzerinde kapı kapatıcılar yer alır ve bu kapılar kapalı tutulur.

Ülkemizde yapı yüksekliği 51.5 m'nin üzerinde olan tüm binalarda yapıldığı gibi, çok yüksek binalarda basınçlandırılan merdivenlerin önünde korunan bir lobinin bulunduğu uygulamalar mevcuttur (kat kullanım alanlarından merdivenlere erişim korunaklı bir lobiden geçilerek yapılmaktadır). Korunaklı lobiler ilave bir bariyer yaratmaktadır, bu bariyer duman girişini engellediği gibi, merdivende basıncı sağlayan havanın merdivenden dışarıya çıkmasını da engellemektedir. Farklı ülkelerde korunaklı lobiler için de ayrı bir basınçlandırma sistemi kullanıldığı uygulamalar mevcuttur.

Çok yüksek binalarda yangın anında binanın tahliye edilmesinde genellikle kademeli tahliye planı kullanılır. Kademeli tahliyede öncelikle yangın katı tahliye edilir. Bazı uygulamalarda yangın katına komşu katlar da yangın katı ile birlikte tahliye edilir. Yangının devam etmesi ve büyümesi halinde diğer katlar da kademeli bir şekilde tahliye edilir. Tüm binanın aynı anda tahliye edilmesi özellikle çok yüksek veya konaklama amaçlı binalar için fazla uygun bir yöntem değildir.

3.2 Merdiven Basınçlandırma Sistemi Hesaplama Metotları

Basınçlandırma sistemi tasarımında, merdivene sağlanması gereken debi hesabının iki farklı senaryoya göre yapılması EN 12101-6 [3] standardı tarafından istenilmektedir. Birinci senaryoda tüm merdiven kapıları kapalı durumdadır, ikinci senaryoda ise seçili katlarda merdiven ile kat kullanım alanları arasındaki kapılar açıktır. Seçili katlar ise genellikle tasarım yangın katı, bu kata komşu kat ve merdiven tahliye katıdır. Bina kat sayısına göre açık kapı sayısı arttırılabilir.

Basınçlandırma için gereken debi miktarı, merdiven yuvasından dışarıya çıkan hava debisine eşittir. Dışarıya çıkan debi; sızıntılar vasıtası ile olduğu gibi, açık durumda olan kapılar sebebiyle de olmaktadır. Debi hesabı kat sayısı az olan binalar için basit hesaplamalarla yapılabilir, çok katlı binalar için ise network modelleme gibi ayrıntılı hesap yöntemlerine başvurulabilmektedir.

Merdivenlere sağlanan debinin hesaplanması için sızıntılardan geçen hava miktarı ve açık kapılardan geçen debi miktarının hesaplanması gerekir. Sızıntılardan geçen debiyi hesaplamak için çeşitli denklemler ve ampirik katsayılar kullanılır. Bu bağıntılar ve ampirik katsayılar, network modellerde de kullanılmaktadır.

3.2.1 Analitik – ampirik metotlar

Merdiven basınçlandırma sistemleri tasarımında el ile yapılan basit hesaplama metotlarından, bilgisayar ile çözülen algoritmalara kadar birçok analitik metot bulunmaktadır. Bu metotlardan bazıları araştırma amacıyla da kullanılmaktadır. Analitik hesaplamaların çoğunda, deneyler ile belirlenmiş ampirik değerler ve katsayılar kullanılmaktadır.

Ampirik değerler özellikle merdivenden dış ortama sızan hava miktarının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Çeşitli tipte kapılar, duvarlar ve benzeri yapı elemanlarının sızıntı oranları deneysel yöntemler ile elde edilmiştir. Çizelge 3.1’de çeşitli yapı elemanları için sızıntı katsayıları verilmiştir. Bu çizelgede için iki farklı kaynak kullanılmıştır, bu kaynaklar EN 12101-6 [3] standardı ve *Handbook of Smoke Control Engineering* [11] kitabıdır. *Handbook of Smoke Control Engineering* kitabından alınan sızıntı değerleri italik yazı karakteri ile yazılmıştır. Bu kitap NFPA tarafından hazırlanmış olup, Amerikan Standartlarında referans olarak kullanılmaktadır. İtalik yazı karakteri ile işaretli değerler Amerika’da hazırlanan bir başka kaynak olan *SPFE*

Handbook of Fire Protection Engineering kitabında da [72] bulunmaktadır. Çizelge 3.1’de iki kaynak kullanılması ile Avrupa ve Amerika’da kullanılan değerlerin bir arada verilmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 3.1 : Çeşitli yapı elemanları için sızıntı alanları.

Kapı Sızıntıları Alanları		
Kapı Tipi		Sızıntı alanı (m ²)
Tek kanatlı kapı (basınçlandırılan hacme açılan)		0.01
Tek kanatlı kapı (basınçlandırılan hacimden açılan)		0.02
Çift kanatlı kapı		0.03
Asansör kapısı		0.06
Duvar Sızıntı Alanları		
Duvar Tipi		Alan oranı (A _{sızıntı} /A _{duvar})
Dış cephe duvarları (cephe üzerindeki kapı ve camlar etrafındaki sızıntıları içerir)	Sıkı	$0.7 \times 10^{-4} - 0.5 \times 10^{-4}$
	Ortalama	$0.21 \times 10^{-3} - 0.17 \times 10^{-3}$
	Gevşek	$0.42 \times 10^{-3} - 0.35 \times 10^{-3}$
	Çok gevşek	$0.13 \times 10^{-2} - 0.12 \times 10^{-2}$
İç duvarlar ve merdiven duvarları (duvar üzerindeki kapı ve duvar sızıntılarını içermez)	Sıkı	$0.14 \times 10^{-4} - 0.14 \times 10^{-4}$
	Ortalama	$0.11 \times 10^{-3} - 0.11 \times 10^{-3}$
	Gevşek	$0.35 \times 10^{-3} - 0.35 \times 10^{-3}$
Zemin Sızıntı Alanları		
Zemin Tipi		Alan oranı (A _{sızıntı} /A _{zemin})
Zemin döşemesi (saftlar etrafındaki sızıntıları içerir)	Sıkı	0.66×10^{-5}
	Ortalama	$0.52 \times 10^{-4} - 0.52 \times 10^{-4}$
	Gevşek	0.17×10^{-3}

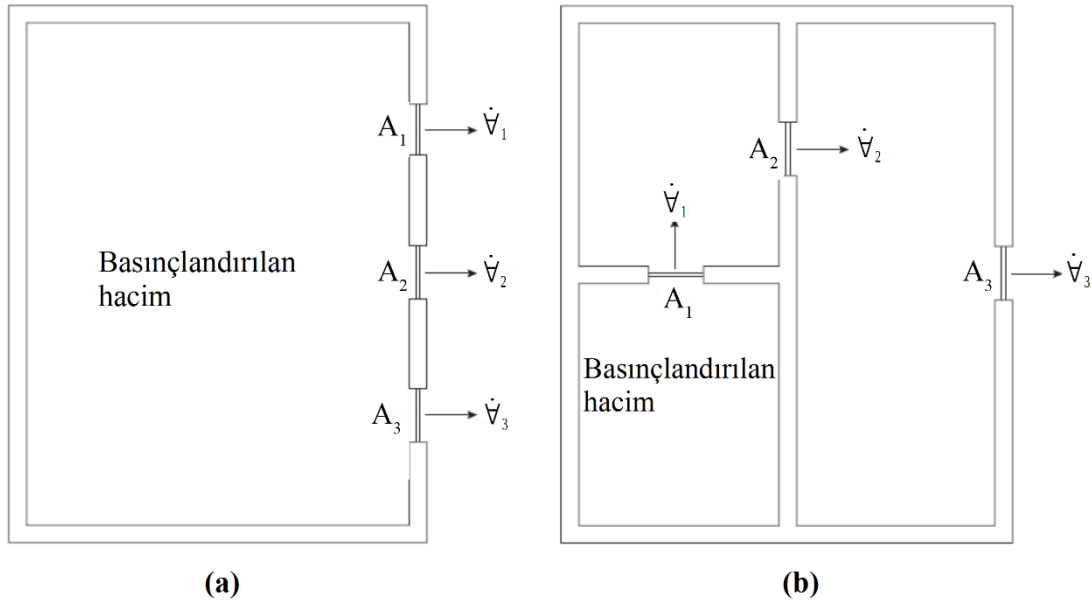
Hava birbirine seri veya paralel bağlanan sızıntı veya açıklıklardan geçerek dış ortama çıkar. Havanın takip ettiği karmaşık akış yollarını basitleştirmek için efektif sızıntı alanları kavramı ortaya çıkmıştır [11]. Aralarında basınç farkı olan iki farklı hacim arasında birden fazla akış yolu varsa, iki hacim arasındaki akış yolları tek bir akış yoluna indirgenerek hesaplamalarda basitleştirme sağlanır. Efektif sızıntı alanı hesabı elektrik direnç hesaplamalarına benzemektedir ve seri ve paralel sızıntı alanları hesapları aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

Şekil 3.2-a’da basınçlandırılmış bir hacimden dışarıya açılan birbiri ile paralel bağlı sızıntı alanları gösterilmektedir. Bu üç sızıntı alanının efektif sızıntı alanı denklem (3.1) ile hesaplanır.

$$A_e = A_1 + A_2 + A_3 \quad (3.1)$$

Birbiri ile paralel bağlı “n” adet sızıntı alanı olduğunda efektif sızıntı alanı denklem (3.2) ile hesaplanır.

$$A_e = \sum_{i=1}^n A_i \quad (3.2)$$



Şekil 3.2 : Akış yolları: a) paralel akış yolu. b) seri akış yolu.

Şekil 3.2-b’de ise birbiri ile seri bağlı üç adet sızıntı alanı gösterilmektedir. Bu sızıntı alanlarının efektif sızıntı alanı denklem (3.3) ile hesaplanır, “n” adet seri bağlı sızıntı alanı olduğunda ise efektif sızıntı alanı denklem (3.4) ile hesaplanır.

$$A_e = \left(\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} + \frac{1}{A_3^2} \right)^{-1/2} \quad (3.3)$$

$$A_e = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{A_i^2} \right)^{-1/2} \quad (3.4)$$

Aralarında açıklıklar bulunan farklı basınçlardaki iki hacim arasındaki sızıntı debisini hesaplamak için, basınç farkı değerini içeren farklı korelasyonlar kullanılmaktadır. Bir sızıntıdan/açıklıktan geçen akış, aşağıdaki genel denklem ile ifade edilebilir (denklem (3.5)'te $\dot{V}$ hacımsal debiyi, Δp basınç farkını ifade etmektedir).

$$\dot{V} = f(\Delta p) \quad (3.5)$$

Yüksek Re sayılarındaki akışlarda, Bernoulli denkleminden elde edilen orifis denklemi, basınç farkının karekökü ile debi arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Denklem (3.6) hacımsal debi, denklem (3.7) ise kütleli debi ifadeleridir.

$$\dot{V} = CA \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (3.6)$$

veya

$$\dot{m} = CA \sqrt{2\rho\Delta p} \quad (3.7)$$

Denklem (3.6) ve (3.7)'de A ifadesi akış alanını tanımlamaktadır. Bernoulli denklemi sürekli rejimde, sürtünmesiz ortamdaki sıkıştırılamaz akış için tanımlanmıştır. Bu nedenle bu iki denklemde de C katsayısı bulunmaktadır, kapı sızıntıları ve duvardaki çatlaklar için bu katsayı 0.6 ile 0.7 arasında bir değer alır [10]. Standart hava yoğunluğu 1.2 kg/m^3 , C katsayısı 0.65 alındığında hacımsal debi için aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\dot{V} = 0.839A\sqrt{\Delta p} \quad (3.8)$$

3.2.1.1 Tasarım için kullanılabilecek el ile hesap metodu (tek zondan oluşan merdivenler için)

Tek basınçlandırma zonundan oluşan (100 metreden daha az yüksekliğe sahip) bir merdiven için yukarıdaki bağıntıları kullanarak tasarım debisini elde etmek mümkündür.

Açık kapılardan geçen debinin hesaplanması için denklem (3.9) kullanılabilir. BYKHY'ye [2] göre, tahliye kapısı ve en az iki adet iç kapının her birinden, kapının tam açık olduğu konumda en az 1 m/s hızla hava akışı olması gerekmektedir, bu

sebeple hava hızı (V) 1 m/s alınabilir. Kapının alanı (A) yaklaşık olarak 2 m²'dir. Bu denklemde bulunan (N) ise açık kapı sayısını belirtmektedir. Tasarım hesaplarında 3 adet kapının açık bulunduğu göz önüne alınmaktadır.

$$\dot{V}_{\text{açık kapılar}} = 1.15 \times N \times (A \times V) \quad (3.9)$$

EN 12101-6 standardında [3] %15 kadar kanal sızıntısının hesaba katılması önerilmektedir, bu nedenle denklem (3.9)'da 1.15 çarpanı yer almaktadır [71].

Kapalı kapılardan olan sızıntı kayıpları için denklem (3.8)'de ifade edilen orifis denklemini kullanılır. Orifis denklemini kanal sızıntılarını göz önüne almak için 1.15 çarpanı ile ve kapalı kapının bulunduğu kat sayısı (N) ile çarpılır (denklem (3.10)). Efektif sızıntı alanı (A_e), merdivenden binaya doğru tek kanatlı bir kapının sızıntısı ve duvarlardan geçen sızıntıların (Çizelge 3.1) paralel bağlı olduğu göz önüne alınarak hesaplanır. Eğer merdiven önünde lobi bulunuyorsa, paralel bağlı kapı ve duvar sızıntılarına ek olarak bir adet seri bağlı kapı sızıntısının eklenmesi gerekir. Basınç farkı için 50 Pa değeri kullanılabilir [71].

$$\dot{V}_{\text{kapalı kapılar}} = 1.15 \times N \times (0.839 \times A_e \times \sqrt{\Delta p}) \quad (3.10)$$

Basınçlandırma için gerekli olan debi miktarı ise kapalı kapılardan ve açık kapılardan geçen debi değerlerinin toplanması ile elde edilir (denklem (3.11)). Üç adet açık kapıdan geçen debi değeri yaklaşık olarak 25000 m³/h'dir. Bir adet kapalı kapının bulunduğu kattan olan sızıntılar ise yaklaşık olarak 265 m³/h'tir. Bu durumda tek zondan oluşan binalarda, basınçlandırma hesabında belirleyici olanın açık kapılar olduğu sonucuna varılmaktadır; 10 katlı bir bina için gereken debi değeri yaklaşık olarak 27000 m³/h iken, 20 katlı binada bu değer yaklaşık olarak 30000 m³/h'dir.

$$\dot{V}_{\text{toplam}} = \dot{V}_{\text{açık kapılar}} + \dot{V}_{\text{kapalı kapılar}} \quad (3.11)$$

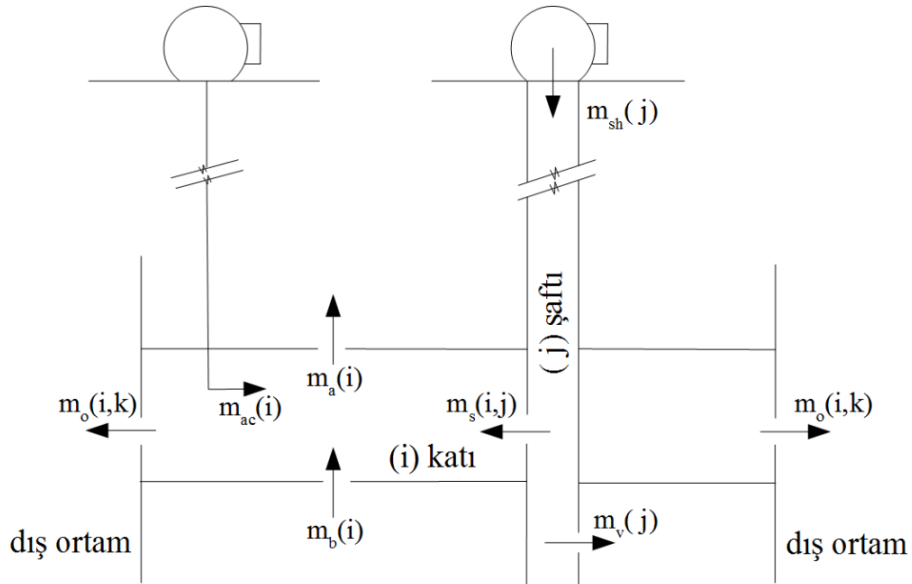
Tek zondan oluşan ve yukarıda belirtilenden daha yüksek binalar için bu yöntem ile hesap yapılmak istenirse, 4 adet kapının açık olduğu göz önüne alınarak hesap yapılması önerilmektedir [71].

3.2.1.2 Network modellerin çalışma prensibi

Network modeller 1970'li yıllardan beri geliştirilmektedir ve binalarda enerji analizi çalışmalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modeller araştırma amacıyla

kullanıldığı gibi, tasarım amacıyla da kullanılmaktadır. Network modellemede bir binada yer alan hacımlar, her biri belirli basınç ve sıcaklıkta bulunan düğüm noktaları ile ifade edilirler. Her bir kat ayrı bir düğüm noktası olabildiği gibi, her bir oda da ayrı bir düğüm noktası olabilmektedir. Merdiven yuvası gibi düşey shaftlarda merdiven yuvasının her bir kata karşılık gelen bölümü bir düğüm noktası ile ifade edilebilmektedir.

Şekil 3.3'te bir binada her bir katın bir düğüm noktasından oluştuğu ve shaftın da tek bir adet düğüm noktası ile ifade edildiği network model şeması gösterilmektedir. Şekil 3.3'te m_o , m_a , m_b , m_s kat ile sırasıyla dış ortam, üst kat, alt kat ve shaft arasındaki açıklıklardan geçen kütleli debi, m_{ac} ile iklimlendirme sistemiyle kata beslenen hava debisini ifade etmektedir.



Şekil 3.3 : Network modellemede tipik bir kat ve bir shaftta hava akışı şeması.

Binayı tanımlayan denklem seti, her bir kat için kütle korunum prensibi ile elde edilir, Şekil 3.3'teki binaya göre, “i” katı için kütle korunumu denklem (3.12) ile ifade edilmektedir.

$$-\sum_{k=1}^n m_o(i,k) - m_a(i) + m_b(i) + \sum_{j=1}^J m_s(i,j) + m_{ac}(i) = 0 \quad (3.12)$$

Şekil 3.3'te, “j” shaftına beslenen hava miktarı m_{sh} ile, menfezden çıkan kütleli debi ise m_v ile ifade edilmektedir. Bu shaft için kütle korunum prensibi uygulandığında denklem (3.13) elde edilir.

$$m_{sh}(j) - \sum_{i=1}^I m_s(i,j) - m_v(i) = 0 \quad (3.13)$$

Şaftın içerisindeki basınç dağılımı elde edilmek istenirse, şaft her bir kata karşılık bir düğüm noktası olmak üzere birden fazla düğüm noktası ile ifade edilir ve her bir düğüm noktası için basınç denklem (3.14) ile hesaplanır. Bu denklemde p_i , “i” katına karşılık gelen basıncı, p_{i-1} “i” katının altında yer alan katın basıncını, h kat yüksekliğini, Δp_L ise basınç kaybını ifade eder.

$$p_i = p_{i-1} - \rho h + \Delta p_L \quad (3.14)$$

Basınç kaybı Δp_L denklem (3.15) ile hesaplanabilmektedir. Bu denklemde K kayıp katsayısını, $\dot{V}$ hacımsal debiyi ve A şaftın kesit alanını ifade etmektedir.

$$\Delta p_L = K \frac{\rho}{2g} \left(\frac{\dot{V}}{A} \right)^2 \quad (3.15)$$

Tüm network modeller, bir açıklıktan olan kütle geçişi ile açıklığın iki tarafındaki basınç farkı arasında lineer olmayan bir ilişki olduğu prensibine dayanmaktadır [49]. Geliştirilen network modeller arasındaki temel fark ise lineerleştirme işlemidir. AIRNET programı yakınsama, bilgisayar kaynaklarının verimli kullanımı konusunda en verimli olandır ve günümüzde yaygın olarak kullanılan CONTAM programı da AIRNET programı algoritmalarına dayanmaktadır.

3.2.2 CFD metotları

Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (CFD); mekanik, havacılık, otomobil, enerji, çevre ve tıbbi alanlarında akış davranışını incelemek için kullanılmaktadır. CFD simülasyonları farklı mühendislik sistemlerinin incelenmesinde, tasarımında ve farklı koşullar altındaki performanslarını belirlemede kullanılmaktadır.

CFD modellemede, diferansiyel yönetici denklemler cebirsel denklemlere dönüştürülerek nümerik olarak çözülür. Yönetici denklemler; süreklilik denklemi, Navier-Stokes denklemi ve enerji denklemidir.

CFD çözüm üç adımdan oluşmaktadır, ilk adımda geometrik model hazırlanır, çok sayıda kontrol hacmine (hücre, grid) bölünür ve sınır koşulları ile çeşitli akışkan özellikleri tanımlanır. İkinci adımda seçilen nümerik model ile her bir grid için kabul

edilen yakınsama sağlanana kadar çözüm yapılır ve her bir grid için basınç, hız, sıcaklık ve diğer değişkenler elde edilir. Son adımda ise elde edilen sonuçlar analiz edilir ve grafikler ile ifade edilir.

Yönetici denklemler (süreklilik, Navier-Stokes ve enerji denklemleri), üç adet fiziksel prensibin matematiksel olarak ifadesidir ve aşağıdaki gibidir;

- Kütle korunumu (süreklilik denklemi)
- Newton'un ikinci yasası, momentum korunumu (Navier-Stokes denklemi)
- Termodinamiğin birinci yasası, enerji korunumu (Enerji denklemi)

Sonlu hacim metodunun (*finite volume method*) uygulanması ile her bir hücre için hücreye giren ve çıkan kütle akıları kullanılarak hücrede kütle korunumu sağlanır. Newton'un ikinci yasasının uygulanması ile bir hücreye etkiyen kuvvetlerin toplamı ve momentum korunumu ile ilgili bir bağıntı (Navier-Stokes Denklemleri) elde edilir. Termodinamiğin birinci yasası, akış alanındaki enerjinin korunduğunu ifade eder. Akıştaki bir parçacığın enerjisinin zamanla değişimi; parçacık üzerindeki net iş, net ısı geçişi ve parçacığın iç enerjisinin zamanla değişiminin toplamıdır.

Yukarıda belirtilen fiziksel prensipler kısmi diferansiyel denklemler ile ifade edilebilir. Sıkıştırılabilir bir akış için süreklilik denklemi (denklem (3.16)), Navier Stokes Denklemi (denklem (3.17)) ve enerji korunumu denklemi (denklem (3.18)) arasındaki ilişki denklem (3.19) ile ifade edilen hal denklemi ile sağlanır. Hal denklemi akışkana bağlı olarak belirlenir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_i) = 0 \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j + p \delta_{ij} - \tau_{ij}) = 0 \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e_{tot}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_i e_{tot} + u_i p + q_i - u_i \tau_{ij}) = 0 \quad (3.18)$$

$$f(p, \rho, T) = 0 \quad (3.19)$$

Yukarıdaki denklemde ρ yoğunluk, p basınç, u anlık hız, τ_{ij} viskoz gerilmeler, δ_{ij} Kronecker delta fonksiyonu x_i ve y_i koordinat değişkenleri, T kompartıman içerisindeki sıcaklık, e_{tot} toplam enerji ve q_i ısı akısıdır.

Korunum denklemlerinin CFD ile çözümünde farklı yöntemler vardır ve bu yöntemler RANS, LES ve DNS isimleri ile anılmaktadır. RANS (Reynolds Avaraged Navier Stokes) uygulaması tam bir modellemedir, korunum denklemlerinin ampirik katsayılarla dayanan modelleri hazırlanır ve bu modeller çözülür. DNS (Direct Numerical Simulation) uygulaması tam bir çözümdür ve tüm akış alanında korunum denklemleri çözülür. LES (Large Eddy Simulation) ise diğer iki yöntemin tam arasında yer alır. LES’de akış alanı filtreleme ile ikiye ayrılır ve üniversal özellik taşıyan akış elemanları modellenirken, geriye kalanlar için çözüm yapılır. Araştırılan akış geometrisi için oluşturulan hücrelerin, DNS çözümü için oldukça sık olması gerekirken, RANS için kaba hücre yapısı kullanılabilir. Günümüzdeki bilgisayar alt yapısı ile sadece basit akışlar için DNS çözümü elde edilebilmektedir.

3.2.2.1 Türbülanslı akış ve LES modelleme

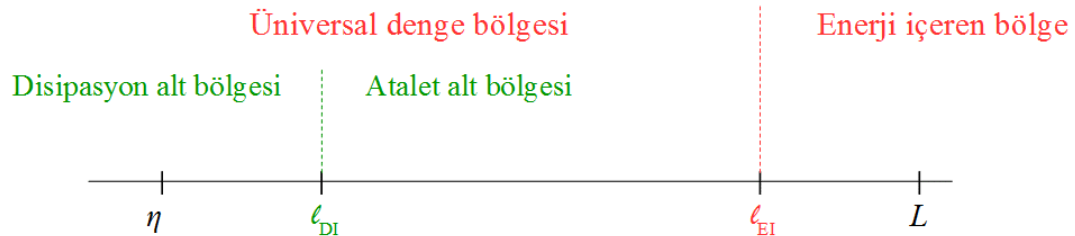
Türbülanslı akışlar, akış girdaplarından oluşmakta olup düzensiz, kaotik ve tahmin edilemezdir [73]. Vorteks ismiyle de anılan girdaplar belirli bir eksen etrafında dönen akış parçacıklarıdır. Girdaplar, düz bir eksen etrafında dönüm yapabildiği gibi, kavisli bir eksen etrafında da dönüm yapabilmektedir. Aynı zamanda birleşme, bölünme, uzama gibi çeşitli yapılar göstermektedir. Türbülanslı akışın önemli bir karakteristik özelliği çok farklı büyüklüklerde ve oldukça geniş bir boyut aralığında girdapların oluşmasıdır [74]. Türbülanslı akışta laminar akışa göre momentum, ısı ve kütle geçişi daha fazladır çünkü akış partikülleri mikroskobik düzeyde hızla karışmaktadır [74].

Büyük girdapların boyutu, akış geometrisi ve serbest akış hızına oldukça yakın değerlerdir. Büyük girdaplar, kararlı olmadığı için küçük girdaplara bölünür ve sahip oldukları kinetik enerjiyi oluşan küçük girdaplara aktarırlar. Oluşan bu küçük girdaplarda benzer bir bölünme işlemi ile daha küçük girdaplara ayrılır. En küçük mertebedeki girdaplar için sürtünme kuvvetleri (viskoz stresler) önem kazanır ve bu girdapların sahip olduğu tüm kinetik enerji, iç enerjiye (ısı enerjisine) dönüşür. En küçük girdapta, girdabın sahip olduğu enerjinin iç enerjiye dönüşmesi disipasyon (enerji yitimi) olarak isimlendirilir. Enerjinin en büyük girdaptan alınarak daha küçük girdaplara aktarılması ve en sonunda disipasyona uğraması ardışık süreç (*cascade process*) olarak isimlendirilir. Sürtünme kuvvetleri tüm boyutlardaki girdaplara etki eder, ancak en küçük boydaki girdaplar üzerindeki etkisi daha fazladır. Ardışık süreç boyunca bir girdabın sahip olduğu kinetik enerjinin tamamı, kendisinden daha küçük

olan girdaba aktarması tam olarak doğru bir ifade değildir, aktarılan kinetik enerjinin küçük bir kısmı sürtünme kuvvetleri nedeniyle iç enerjiye dönüşür [75].

Örnek olarak yüksek Reynolds sayılarındaki tam gelişmiş bir türbülanslı akışın karakteristik serbest akış hızı U , karakteristik akış uzunluğu L olarak isimlendirilsin. Bu akıştaki en büyük girdabın boyutu l_o , karakteristik akış uzunluğu (L) mertebesinde ve bu en büyük girdabın karakteristik hızı $u(l_o) = u_o$, serbest akış hızı olan U mertebesinde. En büyük girdabın Reynolds sayısı da ($Re_o = u_o l_o / \nu$) büyük olacağından viskozitenin büyük girdaplar üzerindeki doğrudan etkisi ihmal edilebilir.

Kolmogorov lokal izotropi hipotezine göre, büyük girdaplar anizotropiktir yani akışın etrafını çevreleyen geometriden ve serbest akış hızından etkilenirler. Küçük boyutlardaki ($l \ll l_o$) girdaplar ise izotropiktir, yani yönden bağımsız olduğu kabul edilir. Enerjinin daha küçük girdaplara aktarılması sırasında yön bilgisinin kaybolduğu (küçük girdaplara aktarılmadığı) ve aynı zamanda küçük girdapların istatistiksel olarak universal olduğu kabul edilir. Anizotropik girdaplar ile izotropik girdapları ayırmak için l_{EI} ismi verilen uzunluk boyutu tanımlanmakta olup ve bu uzunluğun yaklaşık olarak en büyük girdapların altıda biri olduğu varsayılır; $l_{EI} = \frac{1}{6} l_o$ [76]. Şekil 3.4'te bu boyutlar bir ölçek üzerinde verilmektedir. Bu ölçekte serbest akışın boyutu L , disipasyonun gerçekleştiği boyut ise η ile ifade edilmektedir, enerji içeren bölge ile universal denge bölgesi l_{EI} ile ayrılmaktadır. Anizotropik girdaplar enerji içeren bölgede, izotropik girdaplar ise universal denge bölgesinde yer almaktadır. Universal denge bölgesi de oldukça geniş bir skalaya sahip olup kendi içinde ikiye ayrılmaktadır. Büyük girdaplardan küçük girdaplara enerji aktaran bölge atalet alt bölgesi, disipasyonun gerçekleştiği bölge ise disipasyon alt bölgesi olarak isimlendirilir.



Şekil 3.4 : Logaritmik ölçek üzerinde girdap boyutları[76].

Yukarıda da ifade edildiği gibi türbülanslı akışı ifade eden korunum denklemlerinin çözümlerinde üç farklı yöntem kullanılabilmektedir. DNS çözümünde tüm ölçekler

için çözümleme yapılır. RANS modellemede ise tüm ölçekler modellenir. LES modellemede ise, büyük ölçekteki akış çözülürken, küçük ölçekler modellenir, yani akış geometrisinden etkilenen ve universal özellik göstermeyen bölge için çözüm yapılırken universal karakter gösteren küçük akış bölgeleri için modelleme yapılır [76]. LES modellemede çözülen bölge ile modellenen bölgenin birbirinden ayrılması, grid yapısına oldukça bağlıdır.

LES modelleme

LES modelleme ile çözüm dört aşamadan oluşmaktadır [76].

- 1- Momentum korunum denklemi filtreleme işleminden geçirilir. Böylece çözümü yapılacak kısım ile modellenilecek kısım birbirinden ayrılır.
- 2- Çözümü yapılacak olan filtrelenmiş momentum korunumu denkleminin yanında, küçük ölçekteki girdapların etkisini içeren SGS gerilmesi (*subgrid scale stress*) elde edilir.
- 3- SGS gerilmelerinin çözümü için model belirlenir.
- 4- Filtrelenmiş denklem sayısal yöntemler ile çözülür.

FDS programında filtreleme işlemi için kutu filtre (box-filter) kullanılmaktadır ve filtre büyüklüğü (Δ) olarak hücre hacminin küp kökü kullanılmaktadır ($\Delta = V_c^{1/3} = \sqrt[3]{\delta_x \delta_y \delta_z}$) [77]. Herhangi bir ϕ değişkeni için, filtrelenmiş $\bar{\phi}$ değişkeni aşağıdaki denklem ile elde edilir;

$$\bar{\phi}(x, y, z, t) = \frac{1}{V_c} \int_{x-\delta x/2}^{x+\delta x/2} \int_{y-\delta y/2}^{y+\delta y/2} \int_{z-\delta z/2}^{z+\delta z/2} \phi(x', y', z', t) dx' dy' dz' \quad (3.20)$$

Momentum korunum denklemi denklem (3.21)'de verilmektedir. Bu denklemdeki $f_{d,i}$ terimi Lagrange partiküllerini ifade etmektedir.

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + f_{d,i} \quad (3.21)$$

Filtreleme işleminin (denklem (3.20)'nin), denklem (3.21)'e uygulanmasıyla filtrelenmiş momentum denklemi elde edilir;

$$\frac{\partial \bar{\rho u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho u}_i u_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{d,i} \quad (3.22)$$

Denklem (3.22)'de yer alan $\overline{\rho u_i u_j}$ terimini hesaplayabilmek için *Favre Filtre* uygulanır;

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{d,i} \quad (3.23)$$

Denklem (3.23)'te yer alan $\tilde{u}_i \tilde{u}_j$ teriminin hesaplanabilmesi için, SGS gerilmeleri tanımlanır;

$$\tau_{ij}^{sgs} = \bar{\rho} (\tilde{u}_i \tilde{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j) \quad (3.24)$$

Denklem (3.24)'ün denklem (3.23)'te yerine yazılmasıyla LES momentum denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}^{sgs}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{d,i} \quad (3.25)$$

Denklem (3.25)'te yer alan SGS stres terimi için uygun bir kapatma denklemi gerekmektedir. FDS programı denklem (3.25)'i kendi özelleşmiş çözüm aralığı için modifiye etmektedir.

LES'de modelleme, SGS terimleri için yapılır; türbülans viskozitesi (μ_t) ve türbülans difüzivitesi için model gerekmektedir. Türbülans difüzivitesi; Schmidt sayısı (kütle difüzyonu için) ve Prandtl sayısı (ısı difüzyon için) kullanılarak hesaplanır. Türbülans viskozitesi için, bu tez çalışmasında Smagorinsky Modeli kullanılmıştır. Denklem (3.26)'da yer alan C_s katsayısı için 0.2 kullanılmaktadır.

$$\mu_t = \rho (C_s \Delta)^2 |S| ; |S| = \left(2S_{ij}S_{ij} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right)^{\frac{1}{2}} ; S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.26)$$

3.3 Binalarda Hava Ve Duman Hareketine Yön Veren Kuvvetler

Binalardaki basınç dağılımına ve dolayısıyla hava ve duman hareketine yön veren kuvvetler üç grup altında toplanabilir (Çizelge 3.2).

İlk grupta duman/hava hareketine normal şartlar altında etkiyen, doğal kuvvetler yer alır, bu kuvvetler baca etkisi ve rüzgâr etkisidir. İkinci grupta bina mekanik

sisteminden doğan kuvvetler yer alır. Bu kuvvetler ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinin etkisi ile asansör kabinlerinin yarattığı piston etkisidir. Üçüncü grup da yangının neden olduğu yüksek sıcaklıklar nedeniyle oluşan kuvvetler bulunur, bu kuvvetler duman üzerine etkiyen kaldırma kuvveti ve dumanın ani genişlemesidir.

Çizelge 3.2 : Hava ve duman hareketine yön veren kuvvetler.

Doğal Kuvvetler	Mekanik Sistemler Nedeniyle Oluşan Kuvvetler	Yangının Sebep Olduğu Kuvvetler
Baca etkisi	Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinin etkisi	Dumanın âni genişlemesi
Rüzgâr etkisi	Asansörün piston etkisi	Duman üzerine etkiyen kaldırma kuvveti

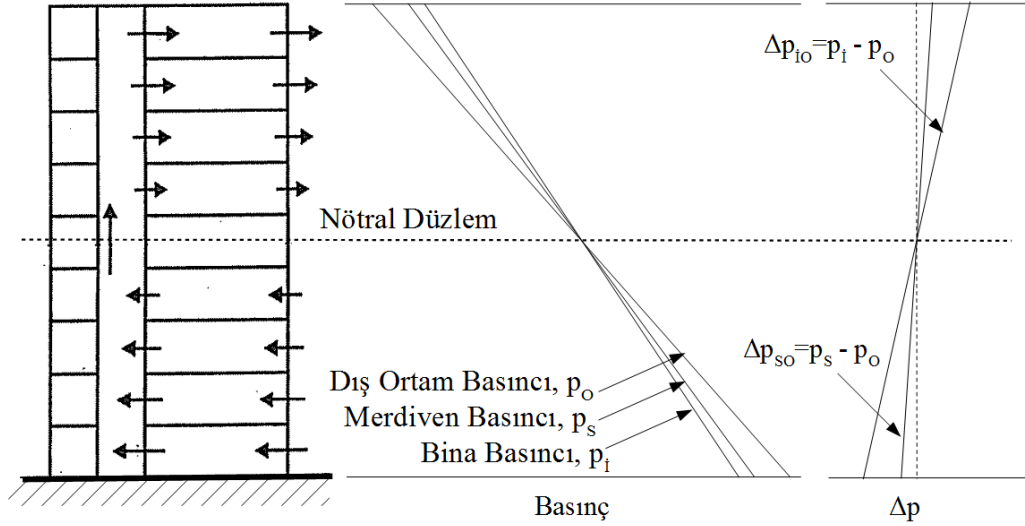
Dumanın ve havanın termofiziksel özellikleri hemen hemen aynı olduğundan ilk iki gruptaki kuvvetler hem dumana hem de havaya etki etmektedir. Ancak, üçüncü gruptaki kuvvetler dumanın aşırı sıcaklığı nedeniyle oluşmaktadır ve bu kuvvetler sadece duman için ele alınabilir.

3.3.1 Baca etkisi

Sıcaklıkları farklı iki hacim içindeki havanın yoğunluklarının farklı olmalarından dolayı soğuk olan hacimdeki basınç, sıcak hacmin basıncına göre alt bölgelerde daha yüksek iken üst bölgelerde daha düşüktür. Bu sebeple alt bölgelerde soğuk hacimden sıcak hacme doğru hava akışı meydana gelirken, üst bölgelerde ise sıcak hacimden soğuk hacme doğru hava akışı olur ve sıcak hacim içerisinde hava yukarıya doğru hareket eder. Şekil 3.5’de grafik üzerinde gösterilen bu etki, baca etkisi olarak isimlendirilir. Belirli bir yükseklikte her iki hacimde basınç eşittir ve bu yüksekliğe karşılık gelen düzlem *nötral düzlem* olarak isimlendirilmektedir. Çok katlı bir binada, merdiven ile dış ortam arasındaki baca etkisi bina sızıntılarına oldukça bağlıdır.

Binalarda baca etkisinin neden olduğu basınç farklarının hesaplanmasına denklem (3.27) ile ifade edilen statik basınç denklemi kullanılır. Bina şaftlarının kesit alanları büyük olduğu için, sürtünme kayıpları ihmal edilmektedir. Bu denklemde p basıncı, ρ yoğunluğu, g yerçekimi ivmesini ve z yüksekliği ifade eder.

$$dp = -\rho g dz \quad (3.27)$$



Şekil 3.5 : Kış şartlarında baca etkisi nedeniyle oluşan akış ve basınçlar.

Yoğunluğun şaft boyunca ya da dış ortam boyunca sabit olduğu kabulü ile denklem (3.27) bina içinde yer alan şaft ve dış ortam için ayrı ayrı integre edilirse, sırasıyla denklem (3.28) ve denklem (3.29) elde edilir.

$$p_s = p_a - \rho_s g z \quad (3.28)$$

$$p_o = p_a - \rho_o g z \quad (3.29)$$

Denklem (3.28) ve (3.29)'da yer alan “s” ve “o” alt indisleri sırasıyla şaftı ve dış ortamı ifade etmektedir. Her iki denklemde de p_a , $z = 0$ seviyesindeki basıncı ifade etmektedir, basitleştirme sağlamak için bu seviyede $p_{s(z=0)} = p_{o(z=0)} = p_a$ kabulü yapılabilir. Bina içinde yer alan şaft ile dış ortam arasındaki basınç farkı, denklem (3.28)'den denklem (3.29)'un çıkarılmasıyla elde edilen denklem (3.30) ile ifade edilir.

$$\Delta p_{so} = p_s - p_o = (\rho_o - \rho_s) g z \quad (3.30)$$

Binanın iç basıncındaki değişimler, atmosferik basınçla kıyaslandığında oldukça düşük mertebelerdedir. Bu nedenle atmosferik basınçta (p_{atm}) ideal gaz denkleminde yoğunluğun elde edilmesinde kullanılabilir [10].

$$\rho = \frac{p_{atm}}{RT} \quad (3.31)$$

Denklem (3.31)'in, denklem (3.30)'da kullanılmasıyla, denklem (3.32) elde edilir. Elde edilen bu denklemde T_o ve T_s sırasıyla dış ortam sıcaklığını ve şaft sıcaklığını ifade etmektedir.

$$\Delta p_{so} = \frac{gp_{atm}}{R} \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_s} \right) z \quad (3.32)$$

Denklem (3.32), nötral düzlemi $z = 0$ 'da olan bir şaft için geliştirilmiştir. Nötral düzlem yeri bilinen bir şaft için, şaft ile dış ortam arasındaki sızıntı alanlarına ve binada başka bir şaft bulunup bulunmadığına bakılmaksızın denklem (3.32) kullanılarak şaft ve dış ortam arasındaki basınç farkı hesaplanabilir. Bu hesaplama için z , nötral düzlemin yerden yüksekliğini ifade eder. Denklem (3.32) ile hesaplanan baca etkisi nedeniyle oluşan basınç farkı, Tamura ve Klote'un yaptığı çalışma [17] ile doğrulanmıştır.

Nötral düzlemin yüksekliği şaft ile dış ortam arasındaki açıklıkların özellikleri, sayısı ve yüksekliğine bağlıdır. Klote ve Milke'nin çalışmasında [10] farklı durumlar için nötral düzlemin yerini belirleyen farklı formülasyonlar önerilmektedir. Şaft ve dış ortam arasında sürekli açıklığın olduğu durumda nötral düzlemin yeri Denklem (3.33) ile hesaplanır [10, 11], bu denklemde H ile şaft yüksekliği, H_n ile nötral düzlem ile şaftın en alt noktası arasındaki mesafe ifade edilmektedir.

$$\frac{H_n}{H} = \frac{1}{1 + \left(\frac{T_s}{T_o} \right)^{1/3}} \quad (3.33)$$

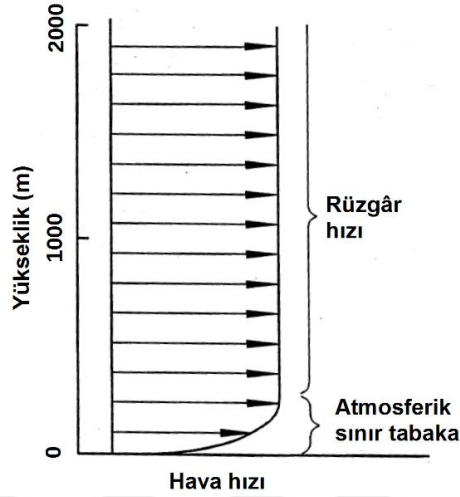
En üst ve en alt katlarında birer açıklığı olan şaftlar için nötral düzlemin yeri hesabında denklem (3.34) kullanılmaktadır [10, 11, 78]. Bu denklemde A_a ile nötral düzlemin yukarısındaki açıklık, A_b ile nötral düzlemin aşağısındaki açıklık ifade edilmektedir.

$$\frac{H_n}{H} = \frac{1}{1 + \left(\frac{T_s}{T_o} \right) \left(\frac{A_b}{A_a} \right)^2} \quad (3.34)$$

Nötral düzlemin konumu, A_b/A_a oranına oldukça bağlıdır. A_b/A_a oranı sıfıra yakın ise, H_n değeri H değerine daha yakındır (yani altta yer alan açıklık üstteki açıklığa göre oldukça küçük ise nötral düzlem yukarıdadır) [10].

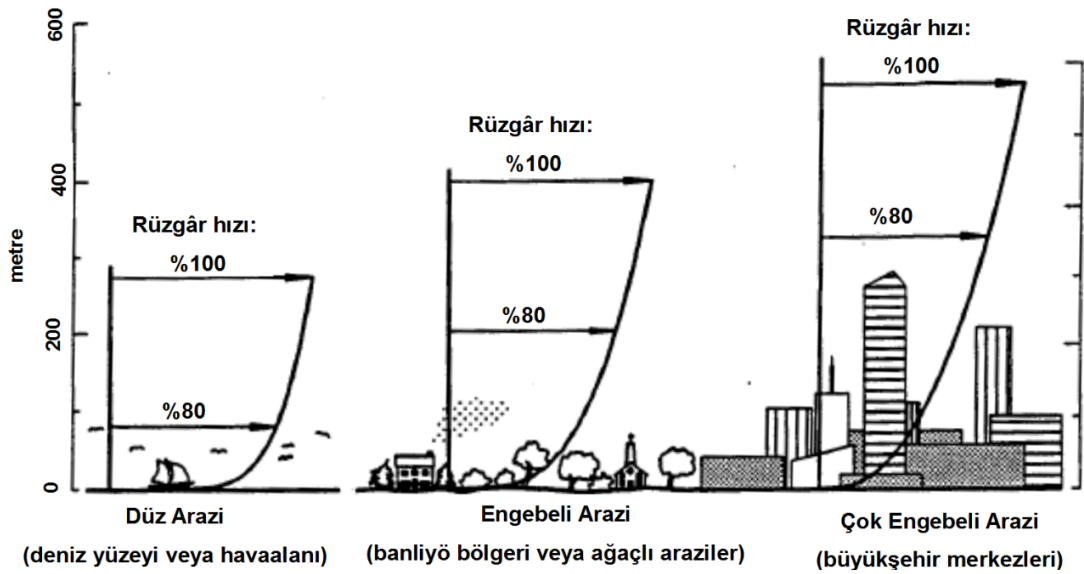
3.3.2 Rüzgâr etkisi

Yeryüzü üzerinde esen rüzgâr, kaymama şartından dolayı yüzeyin tam üzerinde sıfır değerini alır ve yüzeyden uzaklaştıkça, havanın hızı da artar. Belirli bir yüksekliğe gelindiğinde, havanın hızı, rüzgâr hızına eşit olur (Şekil 3.6). Hava hızının, rüzgâr hızına eşit olduğu yüksekliğin altında kalan tabaka, *atmosferik sınır tabaka* olarak isimlendirilir.



Şekil 3.6 : Atmosferik sınır tabakanın oluşumu.

Yeryüzünün üzerinde bulunan yükseltiler atmosferik sınır tabakayı etkiler. Şekil 3.7’de görüldüğü gibi şehir merkezleri gibi yüksek binaların bulunduğu yerlerde sınır tabaka kalınlığı çok fazla iken, düz arazide sınır tabaka kalınlığı daha azdır.



Şekil 3.7 : Arazi şartlarının rüzgâr sınır tabaka üzerindeki etkileri [79].

Hava hızı ve sınır tabaka kalınlığı arasındaki ilişki genellikle denklem (3.35) ile ifade edilen yaklaşım ile hesaplanır. Bu denklemde U rüzgâr hızını, U_o referans yükseklikteki rüzgâr hızını, z rüzgâr hızı (U) yüksekliğini, z_o referans yüksekliği, ve a rüzgâr üst değeri (boyutsuz) ifade eder. Rüzgâr üst değeri, arazi durumuna göre değişmektedir. Çizelge 3.3'te farklı arazi şartları için rüzgâr üst değeri ve sınır tabaka kalınlığı verilmektedir.

$$U = U_o \left(\frac{z}{z_o} \right)^a \quad (3.35)$$

Çizelge 3.3 : Farklı bölgelerde sınır tabaka kalınlıkları ve üs değerleri [11].

Bölge Kategorisi	Tanım	Sınır tabaka kalınlığı, δ (m)	Rüzgâr üssü, a
1	Büyük şehir merkezleri; binaların %50'si 21m'den yüksek ve rüzgârın geldiği istikamet 800m veya bina yüksekliğinin 10 katından fazla olduğunda (hangisi daha büyük ise)	460	0.33
2	Kentsel veya banliyö alanları, ağaçlık alanlar veya az katlı konutların sık aralıklarla yerleştiği yerler, rüzgârın geldiği istikamet en az 460m veya bina yüksekliğinin 10 katı kadar olduğunda (hangisi daha büyük ise)	370	0.22
3	Dağınık bir şekilde yapıların bulunduğu, havaalanları gibi açık bölgeler, bina yükseklikleri genellikle 9.1 m'den az olduğunda	270	0.14
4	Düz, engelsiz alanlar, en az 1.6 km boyunca rüzgâr akışa engel olmayan yerler	210	0.10

Rüzgâr hızı ölçümleri genellikle havaalanları ve meteoroloji merkezlerinde yapılır. Bir bina için rüzgâr kuvveti hesabı yapılacağı zaman, en yakın ölçüm noktasındaki rüzgâr hızı değerleri kullanılır. Meteoroloji merkezlerinden alınan değerler, belirli bir zaman aralığında yapılan ölçümlerdir. Ölçülen rüzgâr hızı değeri (U_{met}) için, bir yıl için yapılan ölçümlerin ortalaması kullanılır [78]. Gerçek rüzgâr hızının belirlenmesi için denklem 3.36 kullanılır. Denklemde kullanılan sınır tabaka kalınlığı ve rüzgâr üs değeri için Çizelge 3.3'teki veriler kullanılmaktadır.

$$U_{g,met} = U_{met} \left(\frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{a_{met}} \quad (3.36)$$

Bu denklemde $U_{g,met}$ rüzgâr anemometresi yukarıdaki rüzgâr hızını, U_{met} ölçülen rüzgâr hızını, H_{met} rüzgâr ölçüm yerinin yüksekliğini, δ_{met} rüzgâr anemometresi yakınında sınır tabaka kalınlığını ve a_{met} rüzgâr anemometresi yakınında rüzgâr üst değeri (boyutsuz) ifade etmektedir.

Rüzgâr anemometresi yukarıdaki rüzgâr hızı ($U_{g,met}$) ile bina yukarıdaki rüzgârın hızı (U_H) eşit kabul edilir. Binanın belirli bir duvarının en üst noktasına etkiyen rüzgâr hızı ($U_{g,H}$) ise denklem (3.37) kullanılarak hesaplanır.

$$U_{g,H} = U_H \left(\frac{\delta}{H} \right)^a \quad (3.37)$$

Denklem (3.37)'de $U_{g,H}$ binanın yukarıdaki rüzgârın hızını, U_H duvarın tepesindeki rüzgâr hızını, H rüzgâr tarafındaki duvarın yüksekliğini, δ bina yakınında sınır tabaka yüksekliğini, a bina yakınında rüzgâr üst değeri (boyutsuz) ifade eder.

Denklem (3.37)'de yer alan U_H ifadesi yerine, denklem (3.36)'dan $U_{g,met}$ ifadesi çekilerek yazılırsa, denklem (3.38) elde edilir. Bu denklem ile meteorolojiden alınan rüzgâr hızı ile rüzgâr ölçüm noktası yüksekliği değeri kullanılarak belirli bir binada, belirli bir duvar üzerine etkiyen rüzgâr hızı elde edilir.

$$U_H = U_{met} \left(\frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{a_{met}} \left(\frac{H}{\delta} \right)^a \quad (3.38)$$

Belirli bir duvar üzerine etkiyen rüzgâr hızı değeri ile rüzgâr nedeniyle oluşan basınç hesaplanır. Denklem (3.39), dinamik basınç hesaplama denklemidir. Bu denklemde yer alan ρ_o , dış ortamdaki havanın yoğunluğunu, C_w ise boyutsuz basınç katsayısını ifade etmektedir.

$$p_w = \frac{1}{2} C_w \rho_o U_H^2 \quad (3.39)$$

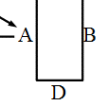
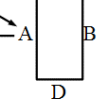
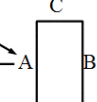
Boyutsuz basınç katsayısı (C_w), binanın geometrisine ve bina yakınındaki rüzgâr setlerine bağlıdır. C_w değeri bina yüzeyi boyunca değişim gösterir, bu nedenle bina

yüzeyi boyunca ortalaması alınarak ortalama basınç katsayısı $\overline{C_w}$ kullanılır. Çizelge 3.4'te çeşitli geometriler için $\overline{C_w}$ değerleri verilmektedir.

Rüzgâr etkisi nedeniyle bir binanın karşılıklı iki tarafı arasındaki basınç farkı, denklem (3.40) ile hesaplanır. Denklemde $\overline{C_{w1}}$ rüzgâr tarafındaki ortalama basınç katsayısı iken, $\overline{C_{w2}}$ rüzgârtı taraftaki ortalama basınç katsayısıdır. ($\overline{C_{w1}}$ pozitif değerler alırken, $\overline{C_{w2}}$ negatiftir).

$$\Delta p_w = \frac{1}{2} (\overline{C_{w1}} - \overline{C_{w2}}) \rho_o U_H^2 \quad (3.40)$$

Çizelge 3.4 : Yerel engellerin bulunmadığı durumda dikdörtgen binalar için ortalama basınç katsayıları ($\overline{C_w}$) [11].

Bina Yükseklik Oranı	Bina Plan Oranı	Yükseklik	Plan	α	A	B	C	D
$\frac{h}{w} \leq \frac{1}{2}$	$1 < \frac{l}{w} \leq \frac{3}{2}$			0° 90°	+0.7 -0.5	-0.2 -0.5	-0.5 +0.7	-0.5 -0.2
	$\frac{3}{2} < \frac{l}{w} < 4$			0° 90°	+0.7 -0.5	-0.25 -0.5	-0.6 +0.7	-0.6 -0.1
	$1 < \frac{l}{w} \leq \frac{3}{2}$			0° 90°	+0.7 -0.6	-0.25 -0.6	-0.6 +0.7	-0.6 -0.25
	$\frac{3}{2} < \frac{l}{w} < 4$			0° 90°	+0.7 -0.5	-0.3 -0.5	-0.7 +0.7	-0.7 -0.1
$\frac{3}{2} < \frac{h}{w} \leq 6$	$1 < \frac{l}{w} \leq \frac{3}{2}$			0° 90°	+0.8 -0.8	-0.25 -0.6	-0.8 +0.8	-0.8 -0.25
	$\frac{3}{2} < \frac{l}{w} < 4$			0° 90°	+0.7 -0.5	-0.4 -0.5	-0.7 +0.8	-0.7 -0.1

Not: h = çatı saçağına kadar yükseklik, l = binanın yatay yönde daha büyük olan uzunluğu, w = binanın yatay yönde daha küçük olan uzunluğu, α = rüzgâr açısı.

3.3.3 Bina iklimlendirme ve havalandırma sistemlerinin etkisi

Yangın anında herhangi bir önlem alınmamışsa bina iklimlendirme ve havalandırma sistemleri, dumanın tüm binaya yayılmasına neden olabilir [11]. Bu nedenle bu

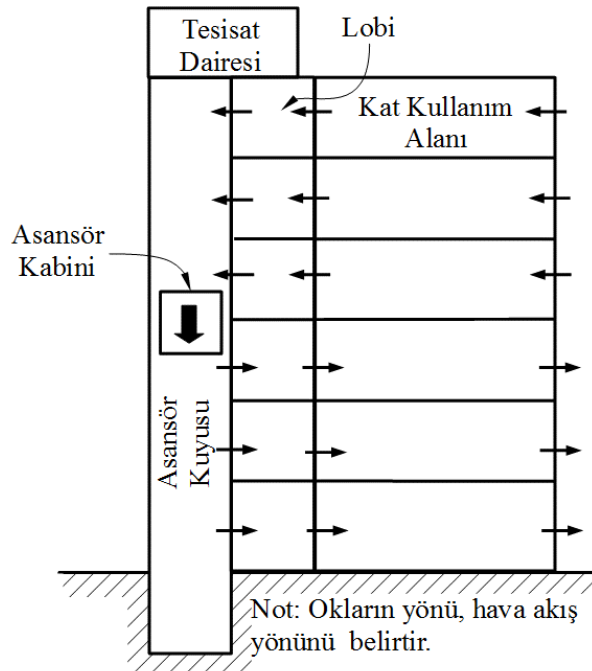
sistemler yangın anında kapatılır ya da duman kontrol için özelleşmiş operasyon modunda çalışır.

3.3.4 Asansör piston etkisi

Bir asansör şaftında asansör kabininin hareketi sürekli olmayan basınç farkları yaratır. Şekil 3.8’de görüldüğü gibi aşağıya doğru hareket eden asansör kabini, üst katlarda âni basınç düşüşüne, alt katlarda ise kademeli olarak basınç artışına neden olur. Orta katlarda ise asansör kabini yaklaştıkça basınç artar ve asansör kabinin geçmesi ile basınç âni olarak düşer. Bir binada aşağıya doğru hareket eden bir asansör, havanın ve dumanın üst katlarda dışarıdan asansör şaftına doğru, alt katlarda ise asansör şaftından dışarıya doğru hareket etmesine neden olur. Asansör kabini yukarıya doğru hareket ettiğinde ise tersi hava hareketi olur. Yangın anında acil durum asansörleri hariç, asansörlerin çalışmasına izin verilmez.

Lobi ile kat kullanım alanları (Şekil 3.8) arasındaki basınç farkı denklemi Tamura ve Klote tarafından 1986 yılında analitik olarak geliştirilmiş ve deneysel olarak ispatlanmıştır [21]. Denklem (3.41)’de yer alan bu bağıntı, aşağıya doğru hareket eden bir asansörün bulunduğu binada, asansörün üstünde kalan katlar için geçerlidir.

$$\Delta p_{li} = \frac{\rho}{2} \left[\frac{A_s U (A_e / A_{li})}{N_a C A_e + C_c A_a [1 + (N_a / N_b)^2]^{1/2}} \right]^2 \quad (3.41)$$



Şekil 3.8 : Asansör kabininin aşağı doğru hareket etmesi ile oluşan akış [21].

Denklem (3.41)'de Δp_{li} lobi ile kat kullanım alanları arasındaki basınç farkını, ρ asansör kuyusu içerisindeki havanın yoğunluğunu, U asansör kabininin hızını, N_a kabinin üzerindeki kat sayısını, N_b kabinin altındaki kat sayısını, C bina sızıntı alanları katsayısını (boyutsuz) ve C_c kabin etrafındaki akış için akış katsayısını ifade eder. C_c katsayısı tek ve çift kabilner için sırasıyla 0.94, 0.83 değerini alır. Ayrıca bu denklemdeki A_e kat ile shaft arasındaki efektif sızıntı alanını, A_s asansör kuyusu kesit alanını, A_a kabinin etrafındaki serbest akış alanını ve A_{li} asansör lobisi ile bina iç alanları arasındaki sızıntı alanını ifade eder.

3.3.5 Dumanın âni genişmesi

Yangın anında ortaya çıkan enerji, ortamdaki gazların (havanın, yanma sonu açığa çıkan gazların ve dumanın) genişmesine neden olur. Yangın sırasında ilave olan yakıt miktarı, hava miktarı yanında çok az olduğu için ihmal edilebilir. Yanma sonucu oluşan gazların termal özelliklerinin hava ile aynı olduğu kabul edilirse, ortamdaki gazların hacmindeki artış basitçe sıcaklık artış oranı ile ifade edilebilir.

$$\frac{\dot{V}_{son}}{\dot{V}_{ilk}} = \frac{T_{son}}{T_{ilk}} \quad (3.42)$$

Denklem (3.42)'ye göre ortam sıcaklığı (T_{ilk}) 21°C iken, yangın nedeniyle yangın kompartımanında sıcaklık (T_{son}) 600°C değerine yükselirse, kompartımandaki gaz miktarı ilk haline göre 3 katına çıkar. Bu hacmin yaklaşık üçte ikisi yangın kompartımanından dışarıya çıkar. Gazın kompartıman dışına doğru ısı genleşme nedeniyle olan bu akışı, kompartımandaki gaz sıcaklığı arttıkça devam edecektir.

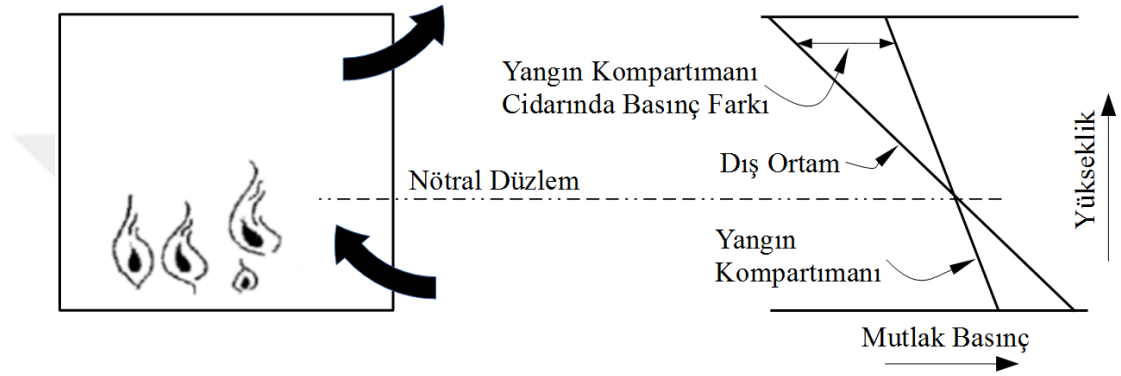
3.3.6 Dumana etkiyen kaldırma kuvvetleri

Yangın sıcaklığı sabitlendiğinde, yangın kompartımanındaki gazın genişmesi sona erer. Bu andan sonra, kompartımandan dışarıya doğru duman hareketi kaldırma kuvvetleri nedeniyle gerçekleşir. Şekil 3.9'da gösterilen kompartıman yangınında, kompartıman içindeki hava dış ortama göre daha sıcaktır ve dolayısıyla daha hafiftir. Bu nedenle kompartıman içindeki hava kompartıman üst sınırlarından dışarı çıkar. Aynı anda daha soğuk olan dış ortam havası kompartıman alt sınırlarından içeriye girer ve kütle korunumu sağlanır. Bu akış, Şekil 3.9'un sağ tarafında gösterilen yangın kompartımanı ve dış ortam arasındaki basınç farkı nedeniyle meydana gelir.

Oluşan basınç farkı, baca etkisi nedeniyle oluşan basınç farkı ile aynı şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta p_{fo} = \frac{g p_{atm}}{R} \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_f} \right) h \quad (3.43)$$

Denklem (3.43)'da Δp_{fo} , T_o , T_f ve h sırasıyla yangın kompartımanı ile çevresi arasındaki basınç farkı, kompartıman çevresindeki havanın sıcaklığı, kompartıman içerisindeki sıcaklık ve nötral düzlem ile mesafedir.



Şekil 3.9 : Yangına etkiyen kaldırma kuvvetleri nedeniyle oluşan basınç farkı ve hava akışı.

3.3.7 Hava ve duman hareketine yön veren kuvvetlerin kıyaslanması

Çeşitli kuvvetlerin yarattığı basınç farkı değerleri hesaplanarak Çizelge 3.5 oluşturulmuştur. Bu sayede bu kuvvetlerin kıyaslanmasına olanak sağlanmıştır. Baca etkisi hesaplamalarında, farklı bina yükseklikleri (h) için hesaplanan değerler, ilgili satırda, ΔP sütununa yazılmıştır. Denklem (3.32) kullanılarak yapılan baca etkisi hesabında, atmosfer basıncı (p_{atm}) için 101325 Pa, hava gaz sabiti (R) için 287 J/(kgK) kullanılmış ve nötral düzlemin binanın tam ortasında yer aldığı kabul edilmiştir. Rüzgâr etkisi hesaplamalarında denklem (3.40) ve Çizelge 3.5'te verilen koşullar kullanılmıştır. İklimlendirme sistemlerinin etkisi için literatürde yer alan kaynaklar gözden geçirilmiş ve Klote ve Milke'nin çalışmasındaki [10] değerler kullanılmıştır. Asansör piston etkisi hesapları için denklem (3.41) kullanılmıştır. Yanma gazlarına etkiyen kaldırma kuvvetlerinin etkisi için denklem (3.43) kullanılmıştır ve baca etkisi hesaplamalarında kullanılan değerler ile basınç farkı değeri hesaplanmıştır.

Literatürde çeşitli kaynaklarda basınçlandırma sistemleri üzerinde ana tesirin baca etkisi nedeniyle olduğu bu nedenle basınçlandırma sistemleri tasarımında baca

etkisinin göz önüne alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Klote ve arkadaşlarının 2012 yılında yayınladığı *Handbook of Smoke Control Engineering* kitabında [11] merdivenlere basınçlandırma sağlamak için beslenen havanın ısıtma ya da soğutma işleminden geçmediği belirtilmektedir. Bu nedenle merdivenlerdeki havanın sıcaklığının basınçlandırmaya başlanması ile dış ortam sıcaklığına yaklaşacağı ve baca etkisinin tesirinin azalacağı vurgulanmaktadır.

Çizelge 3.5 : Çeşitli kuvvetler altında oluşan basınç farkı değerlerinin kıyaslanması.

Yönetici Kuvvet	ΔP Ölçüm Yönü	Koşullar	ΔP (Pa)
Baca Etkisi (denklem (3.32))	Şafttan dışarıya doğru	$T_{\text{şaft}} = 21^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{dışortam}} = -18^{\circ}\text{C}$: h = 10 m h = 100 m h = 200 m	9 90 180
Rüzgâr Etkisi (denklem (3.40))	Rüzgâr tarafından rüzgâraltı tarafına	$\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $C_{w1} = 0.8$, $C_{w2} = -0.3$: $U_H = 7 \text{ m/s}$ $U_H = 14 \text{ m/s}$	32 129
İklimlendirme Sistemlerinin Etkisi	Duman bariyeri üzerinden ölçüm	Bu değer Klote ve Tamura'nın çalışmasından [10] alınmıştır.	12 - 90
Asansör Piston Etkisi (denklem (3.41))	Asansör lobisinden binaya doğru	$C_C = 0.83$, $A_S = 5.61 \text{ m}^2$, $A_A = 1.80 \text{ m}^2$: $U = 2.03 \text{ m/s}$ $U = 3.56 \text{ m/s}$	20 65
Yanma Gazlarına Etkiyen Kaldırma Kuvveti (denklem (3.43))	Yangın kompartımanından komşu kompartımana doğru	$T_{\text{yangın}} = 870^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{dışortam}} = 21^{\circ}\text{C}$: h = 1.5 m h = 3 m	13 26

3.4 Çeşitli Yönetmelik ve Standartlarda Yer Alan Gereksinimlerin Kıyaslanması

Bu bölümde ülkemizde yürürlükte olan Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY) [2], Avrupa Birliği standardı EN 12101-6 [3] ve Amerika Birleşik Devletleri'nde geçerliliği olan NFPA-92 [5] çeşitli konu başlıkları altında ele alınarak kıyaslanmaktadır. Bu kıyaslamanın amacı, basınçlandırılan merdiven ve merdiven basınçlandırma sistemlerinden istenilenlerin karşılaştırmalı olarak ele alınmasıdır. Bu bölümde, standartların ilgili maddeleri “(Madde 89(1))” şeklinde belirtilmektedir.

3.4.1 Basınçlandırılmış merdivenlerin tesis edilmesi gereken durumlar

BYKHY’de [2] binaların kullanım sınıflarına göre, hangi şartlar altında basınçlandırılmış merdivenlerin tesis edilmesi gerektiği Çizelge 3.6’da özetlenmektedir.

Çizelge 3.6 : BYKHY’e göre basınçlandırılmış merdivenlerin bulundurulmasının gerekliliği olduğu binalar.

Bina Kullanım Sınıfı	Şartlar
Konutlar hariç tüm binalarda	<u>Merdiven yuvası yüksekliği</u> 30.5m’den fazla ise Madde 89(1)
Konutlarda	<u>Yapı Yüksekliği⁽¹⁾</u> 51.5m’den fazla ise Madde 89(3)
Tüm binalarda – bodrum katlara hizmet veren merdivenler	Bodrum kat sayısı 4’ten fazla ise Madde 89(2)

¹ Yapı Yüksekliği: Bodrum katlar, asma katlar ve çatı arası piyesler dâhil olmak üzere, yapının inşa edilen bütün katlarının toplam yüksekliğidir.

Çizelge 3.6’ya ilave olarak, BYKHY’te yapı yüksekliği 30.5 m’den fazla ve 51.5 m’den az olan konutlarda birbirine alternatif, her ikisinde korunumlu ve en az birinde yangın güvenlik holü düzenlenmiş veya basınçlandırma uygulanmış 2 kaçış merdivenin yapılması mecburidir. Ayrıca yapı yüksekliği 51.5 m’den yüksek olan konutlarda birbirine alternatif ve yangın güvenlik holü olan ve basınçlandırılan en az 2 kaçış merdiveni yapılması şarttır.

EN 12101-6 standardının 4. bölümünde bina altı sınıfa ayırmakta ve her bir sınıf için merdiven basınçlandırma sistemi tanımlanmaktadır. Aynı zamanda EN 12101-6 standardının 6.bölümünde basınçlandırılması gereken yerler “*Spaces to be pressurized*” başlığı altında açıklanmaktadır ve burada sadece merdiven değil basınçlandırılması istenen lobi, asansör, vb. mekânlar ile hava tahliyesi yapılan mekânlar açıklanmaktadır. EN 12101-6 standardında merdiven basınçlandırma sistemlerinin zorunlu olduğu binalar/şartlar konusunda BYKHY’de olduğu gibi kesin bir tanımlama mevcut değildir. EN 12101-6’nın 6.bölümünün özeti Çizelge 3.7’de yer almaktadır.

NFPA 92 ‘de hangi merdivenlerin basınçlandırılması gerektiği ile ilgili bir tanımlama yapılmamıştır, bu değerlendirmenin her bir eyaletin yerel mevzuatına göre yapılacağı düşünülmektedir.

Çizelge 3.7 : EN 12101-6'ya göre basınçlandırma ve hava tahliyesi gereken durumlar.

	Şartlar ve Açıklamalar
Sadece merdivenlerin basınçlandırılması (Madde 6.1)	Merdivenlere doğrudan kullanım alanlarından veya basit bir lobiden ⁽¹⁾ geçerek ulaşılmalıdır.
Merdivenlerin ve lobilerin basınçlandırılması (Madde 6.2)	Eğer herhangi bir katta merdiven boşluğunu kullanım alanından ayıran lobi, basit lobi ⁽¹⁾ değilse, bu lobi merdivenlerden bağımsız olarak basınçlandırılmalıdır.
Merdivenlerin ve lobilerin basınçlandırılması, koridordan hava tahliyesi (Madde 6.3)	Korunan lobi, yatay kaçış yolunun bir parçasını oluşturan bir koridora açılıyorsa, bazı sistemlerde merdiveni ve lobiyi basınçlandırmak ve koridordan hava boşaltmak bir avantaj olabilir.
Merdivenler, lobi ve koridorların basınçlandırılması (Madde 6.4)	Lobi, korunan kaçış yolunun bir parçasını oluşturan bir koridora açılıyorsa, basınçlandırma sistemi koridoru içerecek ve duman kontrolünü yangın bölgesinin kapısına kadar götürecektir şekilde genişletilebilir. Ancak, koridorda çok sayıda kapı (veya başka kaçak yolları) varsa ihtiyaç duyulan hava beslemesi büyük olabilir. Tasarım hedefi merdiven boşluğundan, lobi ve koridor üzerinden, doğrudan veya kullanma alanından geçerek dış havaya hava akışının sağlanmasıdır.
Merdivenler ve asansör shaftının basınçlandırılması (Madde 6.5)	Asansör shaftının basınçlandırılması B sınıfı sistemler için gerekebilir. (B sınıfı sistemler, duman kontrol sisteminin kaçış yollarını ve yangınla mücadele ortamını sağlandığı sistemlerdir).
Merdivenler ve koridorların basınçlandırılması, kullanım alanlarından hava tahliyesi (Madde 6.6)	Herhangi bir katta merdivenler ile koridor, kullanım alanlarından kaçışı oluşturuyorsa, basınçlandırılmalıdır.
Merdivenlerin basınçlandırılması ve koridorlardan hava tahliyesi (Madde 6.7)	Kullanım alanlarından hava tahliyesi sağlanmıyorsa, merdivenlerin basınçlandırılması ve lobi/koridordan hava tahliyesi gereklidir.
Merdivenler, lobi ve asansör shaftının basınçlandırılması (Madde 6.8)	İtfaiye operasyonları sırasında kaçış merdivenlerine duman girmemesi için gerekir.

⁽¹⁾ Basit Lobi: asansör, düşey kanallar gibi binanın diğer katarından doğrudan duman yayılmasına neden olacak sızıntı alanlarına erişimi olmayan lobiler. Eğer lobi ile bağlantısı bulunan asansör boşluğu veya düşey kanal basınçlandırılıyorsa, bu lobi basit lobidir. Basit lobiler havalandırılmaz veya doğal olarak havalandırılır.

3.4.2 Minimum ve maksimum basınç farkları

Standartlarda merdivenlere dumanın girişini engellemek için, merdiven ile kat kullanım koridoru/lobi arasındaki minimum basınç farkı tanımlanmıştır. Aynı zamanda basınçlandırma sistemi çalışır durumda ve merdiven kapısı açık olduğunda, yangın katında merdiven kapısından geçen minimum hava hızı da standartlarda yer almaktadır.

Standartlarda, kapının iki tarafı arasında sağlanan basınç farkının üst limitini belirlemek için kapılar üzerine etkiyen kuvvet göz önüne alınır. Kapıyı açmak için uygulanması gereken kuvvet fazla olduğunda çok yaşlı kişilerin, belirli bir yaşın altındaki çocukların ya da bazı engellilerin kapıyı açamayacakları göz önüne alınmıştır. Kaçış yollarındaki kapılar her zaman çıkış yönüne doğru açılmaktadır. Bu nedenle basınçlandırılan merdivenlerin kapıları merdivenlere doğru açılmak zorundadır (merdivenden bina dışına tahliye katında ise kapı merdivenden dış ortama doğru açılır). Ayrıca kaçış merdiveni kapılarının uzun süre açık kalmasını engellemek için kapıların üzerine otomatik kapı kapatıcılar tesis edilmesi gerektiği hem ulusal hem de uluslararası standartlarda belirtilen temel bir gerekliliktir. Sistemin sağlaması gereken maksimum basınç farkını elde etmek için, standartlarda belirtilen kapıya etkiyen maksimum kuvvet değeri, kapı kapatıcının yarattığı kuvvet ve merdiven kapısının iki tarafı arasındaki basınç farkının yaratacağı kuvvet arasında momentum dengesi kurularak maksimum basınç farkı hesaplanır.

BYKHY’de minimum basınç farkı ve maksimum kapı açma kuvveti için aşağıdaki gereksinimler bulunmaktadır;

1. Tüm kapılar kapalı iken, basınçlandırılan merdiven yuvası ile bina kullanım alanları arasındaki basınç farkı en az 50 Pa olmalıdır (Madde 89(5)).
2. Açık kapı durumunda, basınç farkının en az 15 Pa olması gerekmektedir (Madde 89(5)).
3. Hem basınçlı havanın hem de otomatik kapı kapatıcının kapı üzerinde yarattığı kuvveti yenerek kapıyı açmak için kapı koluna uygulanması gereken kuvvetin 110 Newton değerini geçmemesi gerekir (Madde 89(7)).
4. Birbirini takip eden iki katın kapılarının ve merdiven tahliye kapılarının tam açık olmaları hâlinde, bir kapıdan geçen ortalama hızın en az 1 m/s olması gerekir (Madde 89(8)).

EN 12101-6 standardında binalar altı sınıfa ayrılmıştır. Minimum basınç farkı değerleri sınıftan sınıfa farklılık göstermektedir. Çizelge 3.8’de tanımlanan bina sınıflandırılması verilmektedir.

A sınıfı sistemler için, basınçlandırılmış merdiven ile lobi/koridor arasında açık bir kapı var ise, bu kapıdan geçen hava hızı 0.75 m/s’den az olmasına izin verilmemektedir. Basınçlandırılan merdiven ile lobi/koridor arasında kapalı bir

kapının iki tarafındaki basınç farkı $50 \text{ Pa} \pm \%10$ 'dan daha az olmasına izin verilmez (Madde 4.2).

Çizelge 3.8 : EN 12101-6'da yer alan bina sınıflandırması.

Sistem Sınıfı	Kullanım Stratejisi
A Sınıfı Sistem	Kaçış yolları için, yerinde savunma
B Sınıfı Sistem	Kaçış yolları ve yangınla mücadele için
C Sınıfı Sistem	Aynı anda tahliyeyi sağlayan kaçış yolları için
D Sınıfı Sistem	Kaçış yolları için, uyuma riski olan yerler
E Sınıfı Sistem	Kademeli tahliyeyi sağlayan kaçış yolları için
F Sınıfı Sistem	Yangınla mücadele sistemleri ve kaçış için

B sınıfı sistemler için, yangın merdiveninin açıldığı korunaklı lobi de tanımlanmıştır, bu lobiye acil durum asansörü de açılabilir fakat acil durum asansörünün bulunması mecburi değildir (Madde 4.3). B sınıfı sistemler için basınç farkı gereksinimleri Çizelge 3.9'da verilmektedir.

Çizelge 3.9 : EN 12101-6'da B sınıfı binalar için tanımlanan minimum basınç farkı değerleri [3].

	Minimum basınç farkı
Acil durum asansörü ile kat kullanım alanı	50 Pa
Merdiven ile kat kullanım alanı	50 Pa
Lobi ile kat kullanım alanı	45 Pa

Çizelge 3.9'da verilen gereksinimlerin sağlanması için merdiven, lobi ve acil durum asansörünün ayrı ayrı basınçlandırma sistemleri ile basınçlandırılması gerekebileceği vurgulanmaktadır. Ayrıca ardışık iki katta merdiven ile lobi ve lobi ile kat kullanım alanı arasındaki kapılar açık ve itfaiyenin merdivenlere ulaştığı katta merdiven kapıları açık olduğunda, lobi ile kat kullanım alanı arasındaki kapıdan geçen hızın 2 m/s 'den az olmaması gerektiği belirtilmektedir.

Binadaki tüm insanların aynı anda tahliyesini ifade eden C sınıfı sistemler için lobi sağlanması zorunlu değildir (Madde 4.4). Kat kullanım alanları ile basınçlandırılan merdiven arasındaki tüm kapılar kapalı iken, minimum basınç farkı değeri 50 Pa olarak belirtilmiştir. Merdiven tahliye kapısı açık, diğer tüm merdiven kapıları kapalı iken, sağlanması gereken minimum basınç farkı 10 Pa'dır. Bir katta merdiven ile kat

kullanım arasındaki kapı (lobi olması halinde, kapılar) açık iken açık kapıdan ölçülen hız değeri minimum 0.75 m/s'dir.

Otel, hostel gibi binalar D sınıfı sistemleri oluşturmaktadır. D sınıfı binalar için bir katta kat kullanım alanı ile basınçlandırılan merdiven arasındaki kapı/kapılar açık ve bina tahliye kapısı açık iken sağlanması gereken minimum hız değeri 0.75 m/s'dir (Madde 4.5). Merdiven tahliye kapısı ve bir katta kullanım alanı ile merdiven arasındaki kapı/kapılar açıkken, bir katta merdiven ile kat kullanım alanları arasındaki minimum basınç farkı 10 Pa olarak belirtilmiştir. Tüm kapılar kapalı iken gereken minimum basınç farkı ise 10 Pa'dır.

Kademeli kaçış planlarının uygulandığı binalar E sınıfı olarak nitelendirilmiştir. Minimum basınç farkı ve hız değeri için 3 katta kapıların (2 ardışık katta merdiven ile kat kullanım alanı arasındaki kapı/kapılar ve merdiven tahliye kapısı) açık olması durumu için tanımlanmıştır (Madde 4.6). Bu durumda gereken minimum basınç değeri 10 Pa, minimum hız değeri 0.75 m/s'dir. Tüm kapılar kapalı olduğunda, istenen minimum basınç 50 Pa'dır.

F sınıfı binalar ile yangın ile mücadelenin ve kaçışın sağlandığı sistemleri tanımlanmaktadır. Bu tip binalarda, merdiven ile acil durum asansörü birlikte bir lobiye açılmaktadır. Acil durum asansörünün sağlanmasının zorunlu olmadığı belirtilmektedir (Madde 4.7). İstenilen minimum basınç değerleri, B sınıfı sistemler için Çizelge 3.9'da belirtilen değerler ile aynıdır. Merdiven ile lobi arasındaki tüm kapılar kapalı, bir katta lobi ile kat kullanım alanı arasındaki kapı açık, itfaiyenin merdivene erişim sağladığı katta merdiven kapısı açık iken istenilen minimum hava hızı değeri 1 m/s'dir.

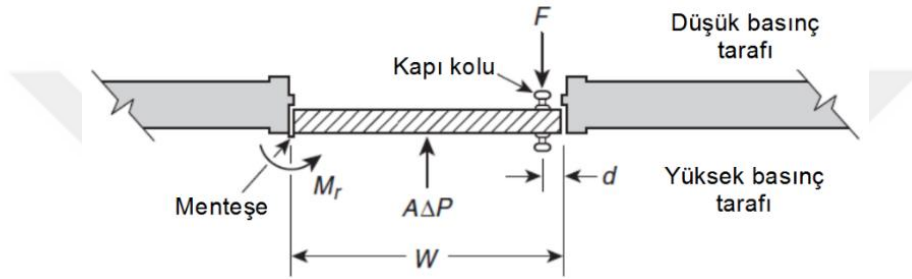
EN 12101-6 standardında tüm bina sınıfları için bir kapıyı açmak için kapı koluna uygulanması gereken maksimum kuvvetin 100 N değerini aşmaması gerektiği bildirilir (Madde 4.7.2.6).

NFPA 92'de sağlanması gereken minimum basınç farkı değerleri Çizelge 3.10'da yer almaktadır. Ayrıca minimum basınç farkının rüzgâr, baca etkisi veya sıcak dumana etkiyen kaldırma kuvvetleri tarafından yenilemeyecek büyüklükte olması gerektiği vurgulanmaktadır (Madde 4.4.2.1.4).

Çizelge 3.10 : NFPA 92’de yer alan minimum tasarım basınç farkı değerleri [5].

Bina tipi	Tavan yüksekliği (m)	Tasarım basınç farkı (Pa)
Sprinklerli Bina	Hepsi	12.5
Sprinklersiz Bina	2.745	25
Sprinklersiz Bina	4.575	35
Sprinklersiz Bina	6.495	45

NFPA 92’de, kapı açmak için gereken maksimum kuvvet 132 N olarak tanımlanmıştır. Bir merdiven kapısına etkiyen kuvvetler Şekil 3.10’da gösterilmektedir m(Madde A.4.4.2.2).



Şekil 3.10 : Merdiven kapısı üzerine etkiyen kuvvetler [5].

Kapı açmak için gerekli olan kuvvet denklem (3.44) ile hesaplanmaktadır (Madde A.4.4.2.2). Bu denklemden ΔP değeri çekilerek, maksimum basınç değeri elde edilir.

$$F = F_r + \frac{(WA)\Delta P}{2(W - d)} \quad (3.44)$$

Denklem (3.44)’te F toplam kapı açma kuvvetini, F_r kapı kapatıcı ve diğer sürtünmeleri yenmek için gereken kuvveti, W kapı genişliğini, A kapı alanını, ΔP kapının iki tarafı arasındaki basınç farkını ve d kapı kolu mesafesini (Şekil 3.10) ifade eder.

Denklem (3.44)’te yer alan hesaplama metodu, BYKHY için tanımlanan 110 N değeri için uygulandığında, elde edilen maksimum basınç farkı değerleri Çizelge 3.11’de özetlenmektedir. Bu çizelgede maksimum basınç farkı değerleri, farklı kapı kapatıcı kuvvetleri ve farklı kapı büyüklükleri için verilmektedir (d mesafesi 7.5 cm, kapı yüksekliği 2 m olarak alınmıştır).

Çizelge 3.11 : BYKHY’ye göre farklı kapı kapatıcı kuvvetleri ve kapı genişliklerine göre maksimum basınç farkı değerleri.

Kapı kapatıcı kuvveti (N)	Maksimum Basınç Farkı (Pa)				
	<i>Kapı genişliği (m)</i>				
	<i>0.8128</i>	<i>0.9144</i>	<i>1.016</i>	<i>1.1176</i>	<i>1.2192</i>
25	95	85	77	71	65
35	84	75	68	63	58
44	73	65	59	54	50
53	64	57	52	48	44
60	56	50	46	42	39

3.4.3 Sistem tasarımı

Merdiven basınçlandırma sistemi tasarımında en önemli hususlardan biri basınçlandırma debilerini belirlemektir. Genellikle standartlarda iki farklı senaryoya göre, tüm kapılar kapalı ve belirli kapılar açık senaryolarına göre, tasarım yapılması önerilmektedir.

BYKHY’de sistem tasarımı ile ilgili maddeler aşağıda yer almaktadır.

1. En az iki iç kapının ve bir adet dışarıya tahliye kapısının açık olacağı düşünülerek tasarım yapılır ve diğer kapalı kapılardaki sızıntı alanları tasarım hesabına ilave edilir. Bina kat sayısına göre açık iç kapı sayısı artırılır (Madde 89(9)).
2. Basınçlandırma havası, sızıntı alanlarından çevreye olan hava akışını karşılayacak mertebede olmalıdır (Madde 89(10)).

EN 12101-6 ‘ya göre iki adet tasarım hesabı yapılmalıdır, birinci hesapta tüm kapılar kapalı durumdadır, ikinci hesaplamada ise açık kapılar bulunmaktadır (Madde 15.2.9). Hangi kapıların açık konumda olduğu ise bina sınıflarına göre belirlenmektedir, açık durumda olan bu kapılar bir önceki bölüm olan “Minimum ve Maksimum Basınç Farkları” bölümünde açıklanmaktadır. EN 12101-6 standardında yer alan tasarım prosedürü Çizelge 3.12’de özetlenmektedir.

NFPA 92’de açık kapı senaryosunda kullanılacak açık kapı sayısına vurgu yapılmaktadır ve tasarımda kullanılacak açık kapı sayısının binadaki insan yoğunluğu ve basınçlandırma sistemi tipine bağlı olduğu belirtilmektedir. Bina tahliye stratejisinde aynı anda birkaç katın tahliyesi varsa veya merdivenlerden dış ortama açılan kapı sürekli açık ise, merdiven basınçlandırma sistemi bu durumu sağlayacak

şekilde tasarlanması gerektiği vurgulanmaktadır (Madde A.4.6.1). Eğer tasarımda birden fazla kapı açık durumda ise, bu kapılardan birinin dış ortama açılan kapı olması gerektiği belirtilmektedir. Ayrıca dış ortama açılan bir kapının sistem üzerindeki etkisinin, iç ortama açılan bir kapının etkisinden çok daha fazla olduğu, dış ortama açılan kapıdan çıkan hava debisinin 10 ile 30 kat fazla olduğu belirtilmektedir. NFPA 92 standardında hesaplama yöntemine dair bir bilgi bulunmamaktadır. NFPA'nın ASHRAE ve başka derneklerle birlikte hazırladığı *Handbook of Smoke Control Engineering* [11] isimli kitapta, tasarım hesaplamalarının nasıl yapılacağı konusu işlenmektedir.

Çizelge 3.12 : EN 120101-6'ya göre merdiven basınçlandırma sistemi tasarımında izlenmesi gereken prosedür.

İlgili Madde	Açıklama
(Madde 7.2.1)	Aşağıdaki akış yolları için <u>efektif sızıntı alanları</u> belirlenmelidir; Merdivenden kat kullanım alanlarına (lobi var ise merdivenden lobiye, lobiden kat kullanım alanlarına), Merdivenden ile dış ortam arasında, Kat kullanım alanları ile dış ortam arasında.
(Madde 7.2.2)	Kapalı kapıların etrafındaki açıklıklar nedeniyle merdiveni terk eden hava debisinin hesaplanması (tüm merdiven ve lobi kapıları için)
(Madde 7.2.3)	Tüm sızıntılardan geçen hava debilerinin toplanması ile teorik hava besleme debisi elde edilir. Toplam hava debisinin elde edilmesi için, teorik besleme debisi 1.5 ile çarpılır. Bu çarpımdaki amaç, sızıntı alanlarındaki belirsizlikleri de göz önüne almak içindir (Ayrıca kanal sızıntıları için %15 ilave edilir, Madde 15.2.12).
(Madde 7.2.4)	Açık kapılar senaryosu için sistem sınıfları dikkate açık durumda olması gereken kapılar belirlenir.
(Madde 7.2.5)	Açık kapı şartı için gereken hava debisi miktarı belirlenir ve kanal sızıntılarını da hesaba katmak için elde edilen değer % 15 artırılır.
(Madde 7.2.6)	Kapalı kapılar ve açık kapılar senaryolarında elde edilen hava debileri kıyaslanır ve büyük mertebede olan gerekli toplam hava debisi olarak belirlenir.
(Madde 7.2.7)	Aşırı basınç tahliye sistemleri için gereksinimler ortaya çıkarılır.
(Madde 7.2.8)	Aşırı basınç tahliye sistemi için hesaplamalar yapılır.

3.4.4 Hava besleme menfezleri

Standart ve kodlarda hangi durumlarda birden fazla noktadan merdivene hava beslemesi yapılması gerektiği belirtilmektedir.

BYKHY'de hava besleme menfezlerinin sayısı ve konumu hakkında için aşağıdaki gereksinimler yer almaktadır.

1. Merdiven yuvası yüksekliği 25 m'den fazla ise, merdiven yuvasına birden fazla noktadan üfleme yapılması gerekir. İki noktadan üfleme yapılıyorsa, üfleme yapılan noktalar arasındaki yüksekliğin en az merdiven yüksekliğinin yarısı kadar olması gerekir (Madde 89(12)).
2. Yapı yüksekliği 51.5 m'den yüksek ise, her katta veya en çok üç katta bir üfleme yapılması gerekir (Madde 89(12)).

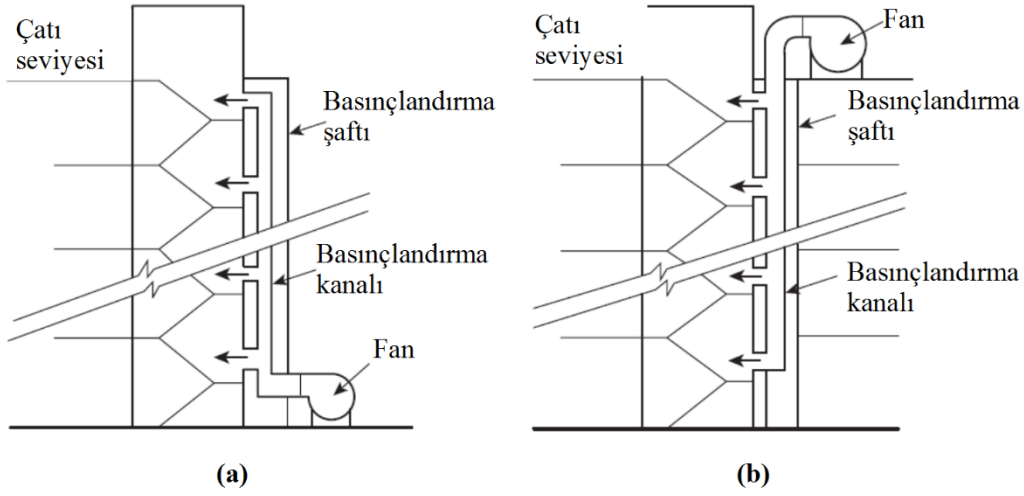
EN 12101-6'da 11 m'den daha az yükseklikteki binalarda, merdivene tek noktadan hava beslenmesi kabul edilebilmektedir. Eğer bina yüksekliği 11 m ya da daha fazla ise, merdivene hava besleyen menfezler, merdiven yüksekliği boyunca eş aralıklarla yerleştirilmesi, menfezler arasındaki azami mesafenin üç kat yüksekliğini aşmaması istenilmektedir. Merdivene hava beslenen noktanın yakınındaki kapı açık ise, besleme havasının kısa devre yaparak bu kapıdan çıkacağı ve yeterli basınçlandırma sağlanamayacağı belirtilmektedir. Bu sebeple tahliye katında, çıkış kapısının 3 m veya daha az uzaklığında menfez bulunmasına izin verilmemektedir(Madde 5.2).

NFPA 92'de merdiven basınçlandırma sistemleri *çoklu enjeksiyon sistemleri* ve *tekli enjeksiyon sistemleri* olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Madde 4.6.4). *Çoklu enjeksiyon sistemleri* için fanın yer seviyesinde olduğu sistemler Şekil 3.11-a'da, fanın çatı seviyesinde olduğu sistemler ise Şekil 3.11-b'de yer almaktadır.

NFPA 92'de yer alan menfezler ile ilgili maddeler aşağıda özetlenmektedir, bazı maddelerde fanın konumuna bağlı olarak değişiklik olduğu gözlenmiştir.

1. Fanın zemin seviyesinde yer aldığı *tekli enjeksiyon* sistemlerinin 30.5 m'den yüksek binalarda tesisi için tasarım analizinin yapılması gerekmektedir (Madde 4.6.4.1.2). *Tekli enjeksiyon sistemlerinin*, enjeksiyon noktasına yakın konumdaki bir kaç kapının açık olması halinde başarısız olabileceği vurgulanmaktadır (Madde A.4.6.4.1.2).
2. *Çoklu enjeksiyon sistemlerinde*, üç kattan fazla mesafede bir üfleme yapıldığında, tasarım analizi yapılmalı ve basınçlandırma havasının açık kapılardan merdiveni terk etmesi nedeniyle basınç farkı seviyesinin minimum tasarım seviyesinin altına düşmediğinden emin olunmalıdır (Madde 4.6.4.2).
3. *Çoklu enjeksiyon sistemlerinde* ayrı bir kanal shaftı oluşturmak yerine, besleme kanalları merdiven shaftı içerisine de konumlandırılabilir ancak besleme

kanallarının merdiven temiz genişliğini daraltmadığına ve kaçışa engel teşkil etmediğine dikkat edilmelidir (Madde 4.6.4).



Şekil 3.11 : Çoklu enjeksiyon sistemleri: (a) fan zemin seviyesinde. (b) fan çatı seviyesinde [5].

3.4.5 Aşırı basınç tahliyesi

BYKHY’de merdiven içerisinde oluşabilecek aşırı basınçları bertaraf etmek için, aşırı basınç tahliye damperi ve frekans kontrollü fan gibi sistemlerin kurulması gerektiği belirtilmiştir (Madde 89-11).

EN 12101-6’da aşırı basınç tahliyesi konusuna bir bölüm (Madde 5.4) ayrılmıştır. Tahliye menfezleri için iki farklı seçenek önerilmektedir; birinci seçenekte karşı ağırlıklı açılan bir kapaklı tahliye menfezi önerilirken, diğer seçenek ise basınç algılayıcılar ile kontrol edilen bir sistemdir (Madde 5.4.1). Aşırı basınç tahliye menfezinin büyüklüğünün, seçili kapılar açık senaryosu için gereken hava debisinden tüm kapılar kapalı senaryosu için gereken hava debisinin çıkarılması ile elde edilecek debiyi boşaltacak şekilde belirlenmesi gerektiği belirtilmektedir (Madde 5.4.2.3).

EN 12101-6’da aşırı basınç tahliye menfezlerinden kullanım alanlarının içerisine korunaklı olmayan bir akış yolu ile hava tahliyesi yapılmasına izin verilmemektedir. Bunun nedeni ise merdiven hacmi içerisine yangın ve duman girişine sebebiyet verecek zafiyet oluşturması olarak bildirilmektedir. Menfezlerden aşağıdaki ortamlara hava tahliyesi yapılabileceği vurgulanmaktadır (Madde 5.4.2.2);

1. Doğrudan veya hava kanalları ile dış havaya,

2. F sınıfı sistemler için, tahliye sistemleri kullanım alanlarına boşaltım yapıyorsa, yangına dayanıklı bariyerin delinmesi prEN 13501-3'e göre sınıflandırılan ve otomatik olarak kapanan bir yangın damperi ile korunmalı ve sadece bir sıcaklık algılama cihazı ile çalıştırılmalıdır.

Ayrıca EN 12101-6'da Bir kapının açılmasından veya kapanmasından sonra 3 s içinde standart gereksiniminin %90'ını karşılanmadıkça, frekans kontrollü fan veya basınç sensörlerinin kontrol ettiği damperlerin kullanılamaz olduğu belirtilmektedir (Madde 5.4.2.5).

NFPA 92'de aşırı basınç tahliye sistemleri için özel bir bölüm bulunmamakla birlikte, *Ek-F Merdiven basınçlandırma Sistem Tipleri (Annex-F Types of Stairwell Pressurization Systems)* bölümü içerisinde aşırı basınç tahliye menfezleri frekans konvertörlü fanlar ile birlikte ele alınmaktadır. Bu bölümde merdiven basınçlandırma sistemleri 4 tipe ayrılmıştır. Aşağıda açıklamaları yapılan bu tipler, kompanse edilmemiş sistem, kompanse edilmiş sistem, kompanse edilmiş sistem – hava debisi değişimli, kompanse edilmiş sistem – aşırı basınç tahliye menfezinden oluşmaktadır. Bu sistemler NFPA 92'de aşağıdaki şekilde açıklanmaktadır.

Kompanse edilmemiş sistemde, basınçlandırma havası merdivene tek hız kademeli fan ile verilir ve tüm kapılar kapalı iken ve seçili kapılar açık iken farklı basınç farkları elde edilir (Madde F1)

Kompanse edilmiş sistemde, hava debisi ayarlanarak ya da fazla basınca neden olan hava merdivenden atılarak farklı şartlar altında, farklı debi değerlerinde hava merdivene beslenir (Madde F2).

Kompanse edilmiş sistem – hava debisi değişimli sistemlerde merdivenlere sağlanan hava debisi, bypass damperi ile ayarlanır (Şekil 3.12). Merdiven ile bina arasındaki basınç farkı statik basınç sensörü ile bir ya da daha fazla katta kontrol edilir. Aynı etki fan hızını değiştirerek, fan giriş ağzına damper (*inlet vanes*) tesis ederek, fan kanadı açısını değiştirerek ya da birden fazla fan monte edilip, çalışan fan sayısı ayarlayarak da sağlanmasına izin verilir (Madde F3).

monte edilmiş aksiyal fanların 30.5 m yüksekliğe kadar *tekli enjeksiyon sistemlerinde* kullanımına izin verilmektedir (Madde 4.6.3). Bu tip sistemlerde rüzgâr siperliği olmadan kullanıma izin verilememektedir (Madde A.4.6.3.1). Merkezkaç fan ve hat üzerinde aksiyal fanların (in-line axial fan) *tekli ve çoklu enjeksiyon sistemlerinde* kullanımına izin verilmektedir (Madde 4.6.3).

3.4.7 Basınçlandırma havası temini

BYKHY'ye göre, basınçlandırma havasının doğrudan dışarıdan alınması ve egzoz çıkış noktalarından en az 5 m uzakta olması gerekir (Madde 89(12)) ve hava emişine algılayıcı konularak, duman algılanması halinde fan otomatik olarak durdurulur (Madde 89(13)).

EN 12101-6'da hava emiş ağzının, herhangi bir potansiyel yangın tehlikesinden uzakta konumlandırılması gerektiği ve yükselen dumanın etkilerinden korunmak için hava emiş ağzlarının zemin seviyesinde veya zemin seviyesi yakınına yerleştirilmesi gerektiği bildirilmiştir. Eğer zemin seviyesine yerleşim mümkün değil ise, çatı seviyesine de yerleşim yapılabileceği belirtilmektedir (Madde 11.8.2.4). Eğer hava emiş ağzı çatı seviyesinde bulunuyorsa, emiş kanalına veya besleme kanalının hemen başlangıcına bir adet duman dedektörü sağlanması gerektiği ve duman algılandığı zaman basınçlandırma sisteminin otomatik olarak kapatılması gerektiği bildirilmiştir (Madde 11.8.2.6). Ayrıca hava emişi çatı seviyesinden sağlanıyor ise, iki adet hava emiş ağzı bulunması ve bu ağzlar birbirinden uzakta konumlanmalı ve farklı yönlere bakması gerekmektedir. Her iki ağzın da gerekli hava debisinin tamamını sağlayacak şekilde boyutlandırılması ve her ikisine de duman damperi yerleştirilmesi gerekmektedir (Madde 11.8.2.7). Bu ağzlar, duman egzoz çıkışlarından en az 1 m aşağıda ve en az 5 m yatay uzaklıkta bulunmalıdır. Tüm damperlerde itfaiyenin kullanımı için manuel çalıştırma imkânı bulunmalıdır.

NFPA 92'de hava emişinden merdivenlere duman girmesini engellemek için, hava emişini binanın tüm egzozlarından ve yangın anında binadan duman çıkışına neden olacak açıklıklardan ayrı yere yerleştirilmesi gerektiği bildirilmektedir (Madde 4.6.2). Sıcak dumanın yükseleceği ve besleme havasının alındığı yerin kritik açıklıkların aşağısına yerleştirilmesi konusunda dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Madde 4.6.2).

3.4.8 Sistemin devreye girmesi ve kontrolü

BYKHY’de yangın algılama ve uyarı sistemleri tarafından basınçlandırma sisteminin otomatik olarak çalışması gerektiği bildirilir (Madde 89(14)). Aynı zamanda basınçlandırma fanının manuel olarak çalıştırılıp durdurulabilmesi için bir açma anahtarının bulunması gerektiği belirtilmektedir (Madde 89(15)). Basınçlandırma Havaasının Temini bölümünde belirtildiği gibi, BYKHY’ye göre, hava emişinde duman algılanması halinde fanların otomatik olarak durdurulması gerekmektedir (Madde 89(13)). Basınçlandırma sistemleri ile ilgili arıza ve konum değiştirme sinyallerinin yangın kontrol panelinde ayrı bir bölgesel durum ve arıza göstergeleri ile izlenmesi ve kontrol edilmesi gerektiği bildirilmektedir. Basınçlandırma sistemlerinin el ile kontrolleri ayrı bir kontrol panelinden yapılabileceği gibi yukarıda belirtilen izleme panelleri ile birleştirilerek yangın alarm sistemi bünyesinde de gerçekleştirilmesine izin verilir (Madde 80(1)). Yangın kontrol panellerinin ise binanın tercihen zemin katında veya kolay ulaşılabilir bir bölümünde bulunması ve sürekli olarak görevli personel bulunan bir yere tesis edilmesi gerektiği bildirilmektedir (Madde 77(1)).

EN 12101-6’da da duman dedektörlerinden gelecek algılama ile basınçlandırma sisteminin devreye girmesi gerektiği bildirilmektedir (Madde 11.4.1). Duman algılandıktan sonra sistemin 60 saniye içinde devreye girmesi zorunludur (Madde 11.4.2.3). Kaçış ve yangınla mücadele olmak üzere iki işlevli sistemlerde, iki işlev arasında manuel geçiş sağlayan anahtarların itfaiye erişimi seviyesinde ve/veya acil durum asansörü hemen yanında olması gerektiği ve yangınla mücadele modunun, kaçış moduna hiçbir zararı olmaması gerektiği bildirilmektedir (Madde 11.4.2.4). Diğer sistemlerde, basınçlandırma sistemi manuel kontrol düğmeleri iki farklı yerde olması gerektiği bildirilmektedir. Bu konumlar; bina hizmetleri kumanda odası (eğer ayrı bir yerdeyse basınçlandırma sistemleri kumanda odası) ve bina girişinde yerel yönetim ile anlaşılan bir yerdir (Madde 11.4.2.5).

NFPA 92’de bir adet duman dedektöründen gelen algılama ile merdivenlere hava beslemesinin gerektiği belirtilmektedir (Madde 6.4.6.2.1). Ayrıca hava emişine duman dedektörü yerleştirilmesi gerektiği ve burada duman algılanması halinde fan(lar)ın kapatılması gerektiği belirtilmektedir (Madde 6.4.6.2.2). Bu standartta duman kontrol cihazlarının izlendiği ve manuel olarak kontrol edilebildiği panel *itfaiye duman kontrol istasyonu* olarak tanımlanmıştır. Merdiven basınçlandırma sistemlerinin manuel olarak itfaiye duman kontrol istasyonundan açılıp kapatılabilmesi istenmektedir.

Duman dedektöründen gelen sinyal nedeniyle basınçlandırma sistemi kapatılırsa, itfaiye duman kontrol istasyonunda bulunan bir anahtar ile basınçlandırma sisteminin yeniden devreye alınması da NFPA 92’de yer alan başka bir gereksinimdir (Madde 6.4.6.4). Otomatik, manuel ya da itfaiye kontrol istasyonundan gelen sinyalden sonra 10 saniye içinde duman kontrol sistemlerinin çalışması gerekir (Madde 6.4.5.3).

3.4.9 Korunan lobiler

BYKHY’de basınçlandırılan kaçış merdivenlerine açılan lobilere *yangın güvenlik holü* ismi verilmiştir, bu lobilerin amacı, kaçış merdivenlerine dumanın geçişinin engellenmesi, söndürme ve kurtarma elemanlarınca kullanılması ve gerektiğinde engellilerin ve yaralıların bekletilmesi şeklinde açıklanmaktadır (Madde 34(1)). BYKHY’de yüksekliği 51.5 m’den fazla olan binalarda kaçış merdivenlerine girişte yangın güvenlik holünün tesis edilmesi mecburidir (Madde 34(7)). *Yangın güvenlik holünün* taban alanı 3 m²’den az, 6 m²’den fazla olmasına izin verilmemektedir ayrıca kaçış yönündeki boyutun 1.8 m’den az olmaması gerektiği belirtilmektedir (Madde 34(3)). Yangın güvenlik hollerinin duvarlarının ve kapılarının sırasıyla en az 120 dakika ve 90 dakika yangına dayanıklı olması gerektiği (Madde 34-2) ve kullanıma uygun şekilde boş bırakılması gerektiği (Madde 34-8) vurgulanmaktadır. Yangın güvenlik hollerinin basınçlandırılması ile ilgili herhangi bir zorunluluk bulunmamaktadır.

EN 12101-6’da çeşitli bina sınıfları için korunaklı lobi tanımlanmıştır. Bu lobilere basınçlandırmanın da sağlanması gerekmektedir. Bu standartta hem binadan insanların tahliyesinin yapıldığı hem de yangın ile mücadele edildiği veya yangın ile mücadelenin olduğu bina sınıfları için (B ve F sınıfı) basınçlandırılan lobi gereksinimi bulunmaktadır. Lobi ile kat kullanım alanları arasındaki minimum basınç farkının 45 Pa olması gerektiği belirtilmektedir (Madde 4.3 ve 4.7). Diğer bina sınıflarında istenilirse lobi bulunabilir, zorunluluk içeren ifadelerle rastlanmamıştır. Merdiven, lobi ve başka basınçlandırılan hacımların basınçlandırma kanallarının ayrı olması gerektiği fakat bunların ortak bir sistemden gelen hava ile beslenebileceği belirtilmektedir (Madde 5.2.2.1). Ayrıca her bir lobide hava besleme menfezi sağlanması gerektiği belirtilmiştir.

NFPA 92’ye göre binada bulunan insanların binadan tahliye edilmeden önce yeterli sürede dumandan korumaları için *sığınak alanları (smoke refuge areas)*

sağlanabilmektedir. *Sığınak alanlarının* basınçlandırılan merdivenlere açılmasına ve merdivenlere girişin basınçlandırılmayan lobiler üzerinden yapılmasına izin verilmektedir (Madde A.4.10.2). Ancak basınçlandırılmayan lobilerin kullanıldığı binalarda, seri bağlı iki kapının hava akışına direnç kazandırdığı ve merdiven basınçlandırma için gereken hava debisi gereksiniminde azalmaya neden olacağı bildirilmektedir. Başka bir sistem olarak hem merdivenin hem de lobinin basınçlandırıldığı durumlar da NFPA 92’de kısaca değinilmiştir (Madde A.4.10.2). Bu sistemde, merdiven basınçlandırma sistemlerinin etkinliğini arttırdığı belirtilmektedir.



4. SAHA TESTLERİ VE SONUÇLARI

4.1 Saha Testlerinin Gerçekleştirildiği Binanın ve Merdivenin Özellikleri

Saha testleri 2015 yılı Mart – Mayıs ayları arasında İstanbul Levent’te bulunan Özdilek Center’da yapılmıştır. Özdilek Center, iki kule, alış-veriş merkezi ve otoparktan oluşmaktadır (Şekil 4.1). Binanın dış yüzeyi cam giydirme cephe şeklindedir. Kulelerden biri otel olarak diğeri ofis olarak kullanılmaktadır. Şekil 4.1’de sağ, arka tarafta yer alan kule, “River Plaza” ismi ile anılmakta ve ofis amacıyla kullanılmaktadır. Saha testleri bu kulede yapılmıştır.

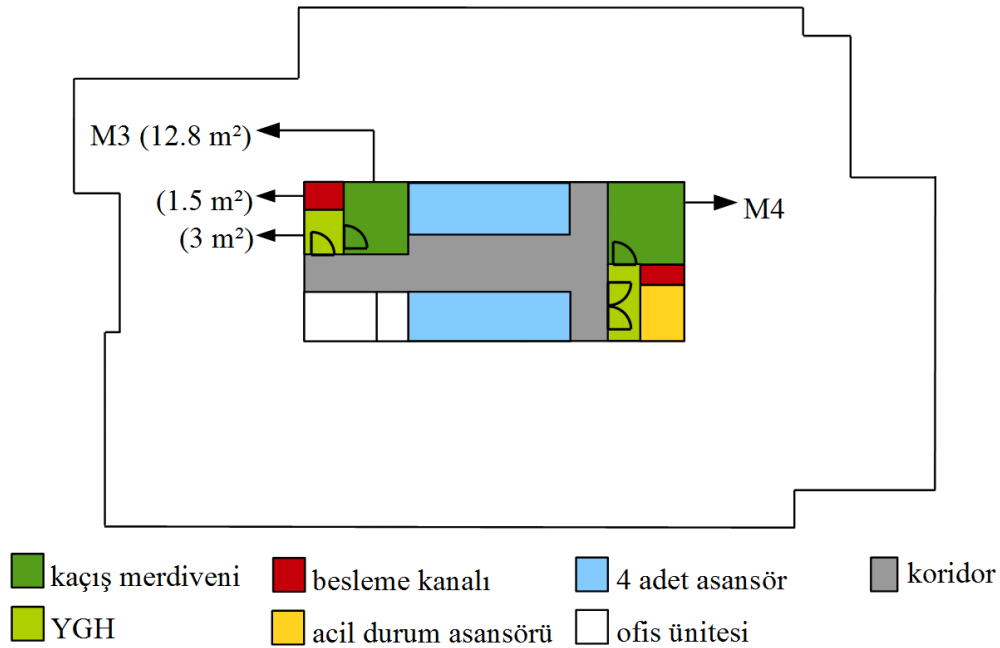


Şekil 4.1 : Özdilek Center.

Ofis kulesinin katları brüt olarak 1300 m² ve net olarak 1000 m²’dir. Kule yüksekliği yaklaşık olarak 163 m’dir. Ofis kule 4 adet bodrum kat, zemin kat ve 35 adet normal kattan oluşmaktadır. Testlerin yapıldığı sırada, katların yaklaşık %75’i kiralanmamış durumda olduğu bildirilmiştir.

Kule binasında M3 ve M4 olmak üzere iki adet kaçış merdiveni bulunmaktadır ve bu iki merdiven, kulede bulunan 40 kata hizmet vermektedir. Her katta koridordan her iki merdivene de ulaşım Yangın Güvenlik Holü (YGH) üzerinden gerçekleşmektedir. Kaçış merdivenleri ve YGH'leri, Şekil 4.2'de sırasıyla koyu yeşil ve açık yeşil renk ile gösterilmiştir. Her iki merdivene de ayrı birer basınçlandırma kanalı ile taze hava sağlanmaktadır. Kat planında mavi renk ile gösterilen asansörler bodrum katlar hariç tüm katlara hizmet vermektedir. Bunların dışında, katlarda mekanik ve elektrik shaftlar da bulunmaktadır ancak bu shaftların konumları tesisat katlara göre değişebildiği için Şekil 4.2'de gösterilmemektedir.

M4 kaçış merdivenine açılan YGH aynı zamanda acil durum asansörüne de hizmet vermektedir. Acil durum asansörünün bulunduğu shaftta sıcaklık farkı nedeniyle baca etkisi, asansör hareketi nedeniyle asansör piston etkisi oluşmaktadır. Bu etkilerin YGH'deki basınç üzerinde oluşturacağı etkilerden kurtulmak için testler diğer merdivende (M3) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.2 : Kule binası karakteristik kat planı.

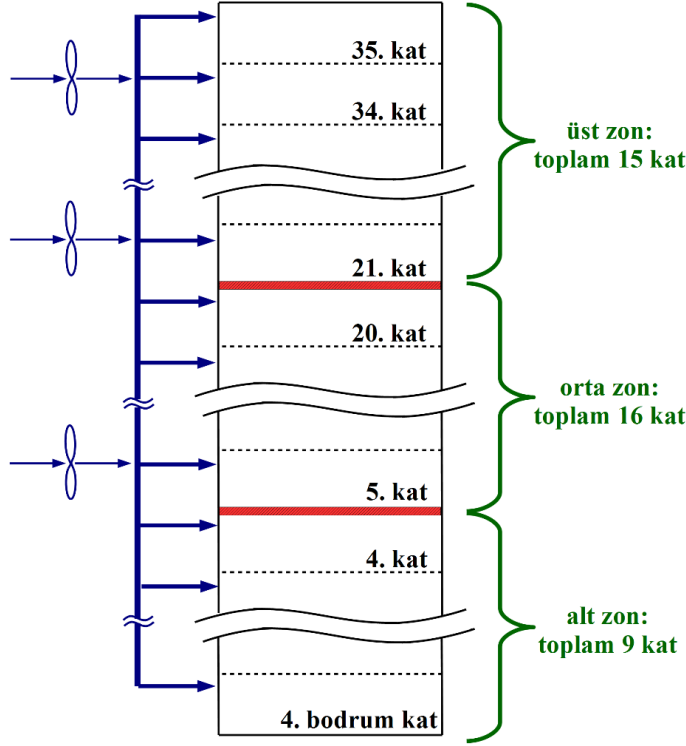
M3 merdiveni 12.84 m² taban alanına sahiptir. YGH ve basınçlandırma shaftı taban alanları sırasıyla 3 m² ve 1.5 m²'dir. Merdivene her katta bulunan menfezler aracılığıyla basınçlandırma havası sağlanmaktadır, menfezlerin alanı 0.228 m²'dir. Merdiven düşeyde 3 adet basınçlandırma zonuna ayrılmıştır. Bu zonlar üst, orta ve alt zon olarak isimlendirilmiştir. Şekil 4.3'te zonlara ayırmanın nasıl gerçekleştirildiği

gösterilmektedir. Zonları ayıran duvarlar üzerinde, zonlar arası geçişi sağlamak için kapı bulunmaktadır. Şekil 4.3'te zonları ayıran duvarlarda çeşitli açıklıklar olduğu görülmektedir ancak basınçlandırma sistemi çalıştırılarak, zonlar arasındaki basınç farkı ölçülmüş ve açıklıkların etkisinin ihmal edilebilir olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.3 : Merdiveni üst ve orta zona ayıran duvarlar ve zonlar arasında geçişi sağlayan kapı: (a) üst zondan görünüm. (b) orta zondan görünüm.

Şekil 4.4'te gösterildiği gibi; alt zon 4.bodrum kat ve 4. kat arasındaki 9 kattan oluşmaktadır, orta zon 5. kat ve 20. kat arasında yer almakta ve toplamda 16 kattan oluşmaktadır. 21. – 35. katlar arasında yer alan üst zon ise toplam 15 kattan oluşmaktadır. Şekil 4.4'te mavi renk ile basınçlandırma fanları, basınçlandırma şaftı ve her kata açılan menfezler gösterilmektedir. Basınçlandırma şaftı inşai şafttan oluşmakta ve şaft içerisinde herhangi bir kanal bulunmamaktadır. Bu sebeple basınçlandırma şaftı aynı zamanda basınçlandırma kanalı olarak kullanılmaktadır. Basınçlandırma şaftı kendi içinde zonlara bölünmemiş olup her üç merdiven basınçlandırma zonuna aynı anda hizmet verebilen tek bir zondan oluşmaktadır.



Şekil 4.4 : River Plaza M3 merdiveni zonlara ayırma, besleme fanları ve basınçlandırma şaftı şematik görünümü.

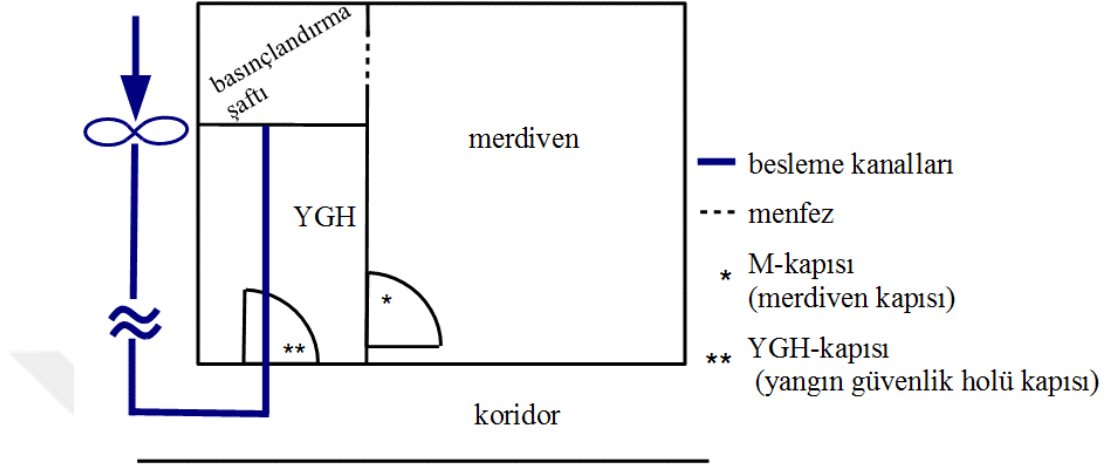
Basınçlandırma havasını sağlamak üzere üç farklı fan kullanılmaktadır. Fanlar tesisat katları olan 5., 21., ve 34. katlarda yer almaktadır. Her bir fanın sağladığı maksimum debi değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Fanların her birinin devir sayısının ve dolayısıyla sağladığı debinin kontrolü frekans konvertörleri ile yapılmaktadır. Testler sırasında frekans konvertörleri devre dışı bırakılarak ayarlanabilen sabit bir debide hava beslemesi sağlanmıştır.

Çizelge 4.1 : Merdivenlere hizmet veren fanların bulunduğu katlar ve fan etiket değerleri.

Fan Kodu	Fanın Bulunduğu Kat	Fanın Etiket Değeri
MBF-OF-01	5. kat	32000 m ³ /h (@950 Pa)
MBF-OF-03	21. kat	34000 m ³ /h (@1060 Pa)
MBF-OF-05	34. kat	33000 m ³ /h (@830 Pa)

Tesisat katlarında bulunan fanlardan, basınçlandırma şaftına havanın iletimi basınçlandırma kanalları vasıtası ile yapılmaktadır (Şekil 4.5). Tesisat katlarında yer alan basınçlandırma kanalların bağlantı noktalarında küçük sızıntılar olduğu tespit edilmiştir. Basınçlandırma kanallarının basınçlandırma şaftı ile bağlantısı tesisat katlarında, Şekil 4.5’te gösterildiği gibi YGH içerisinden geçirilerek yapılmaktadır.

Sahada yapılan ön incelemelerde her üç tesisat katında da, fanın şaftla bağlandığı noktada sızıntılar nedeniyle basınçlandırma havasının bir bölümünün YGH'ye kaçtığı gözlenmiştir. Bu bağlantı kaçakları nedeniyle, fanlardan gelen havanın tamamının merdivenleri basınçlandırmak için kullanılmadığı ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.5 : Tesisat katında basınçlandırma havasını ileten kanalların basınçlandırma şaftı ile bağlantısı.

Şekil 4.5'te görüldüğü gibi koridordan YGH'ye açılan kapıya "YGH-kapısı", YGH'den merdivene açılan kapıya "M-kapısı" ismi verilmiştir. Bu çalışmanın geri kalanında bu kapılar, bu isimler ile anılacaktır.

Yangın modunda, her bir fan, frekans konvertörü ile çalıştırılmaktadır. Frekans konvertörleri ise iki adet basınç sensörü ile kontrol edilmektedir. Yangın anında, sensörlerden herhangi biri 15 Pa değerinin altında ölçüm yaparsa, frekans konvertörü vasıtası ile fanın devir sayısı arttırılmak üzere programlanmıştır. Eğer sensörlerden herhangi biri 80 Pa değerinin üzerinde ölçüm yaparsa, fanların devir sayısı azaltılacaktır. Nadir bir durum olmakla birlikte, eğer fanlardan birisi 15 Pa'ın üzerinde ölçüm yaparken diğer fan 80 Pa'ın altında bir değer gösterirse, düşük ölçümün daha kritik olduğu kabul edilip, ilgili fanın devir sayısı artırılacaktır.

Merdiven ile dış ortam arasında herhangi bir aşırı basınç tahliye sistemi bulunmamaktadır. Bu çalışmaya esas teşkil eden saha testleri tamamlandıktan sonraki bir tarihte, zon ayırım duvarları üzerine aşırı basınç tahliye menfezleri monte edilmiştir. Her bir zon ayırımına farklı yönlerde açılan, iki adet menfez yerleştirilmiştir. Bu sayede örneğin, üst zonda aşırı basınç oluştuğunda üst zondan orta zona hava iletilecek, orta zonda aşırı basınç oluştuğunda fazla hava üst ve alt zonlara tahliye edilecektir.

4.2 Test Prosedürü

Saha testlerinin planlandığı safhada, dış ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızının testler üzerinde kontrol edilemeyen etkiler yaratacağı göz önüne alınmıştır. Bu nedenle sonuçları birbiri ile kıyaslanacak testlerin aynı gün içerisinde tamamlanması sağlanmış ve incelenen her parametre ile ilişkili ayrı bir test grubu oluşturulmuştur.

Binada bulunan insanların test düzeneğine olası müdahalelerinin engellenmesi için testlere ofis binasında mesai saatlerinden sonra, saat 19:00'da başlanmış ve gece saatlerinde çalışılmıştır. Bir adet test yaklaşık olarak bir buçuk saatte tamamlanmıştır. Her bir test grubunda yer alan 4 adet test aynı gece içerisinde tamamlanmıştır.

Test grupları oluşturulurken, kontrol edilebilen parametreler dikkate alınmıştır. Kontrol edilebilen parametreler aşağıda listelenmektedir;

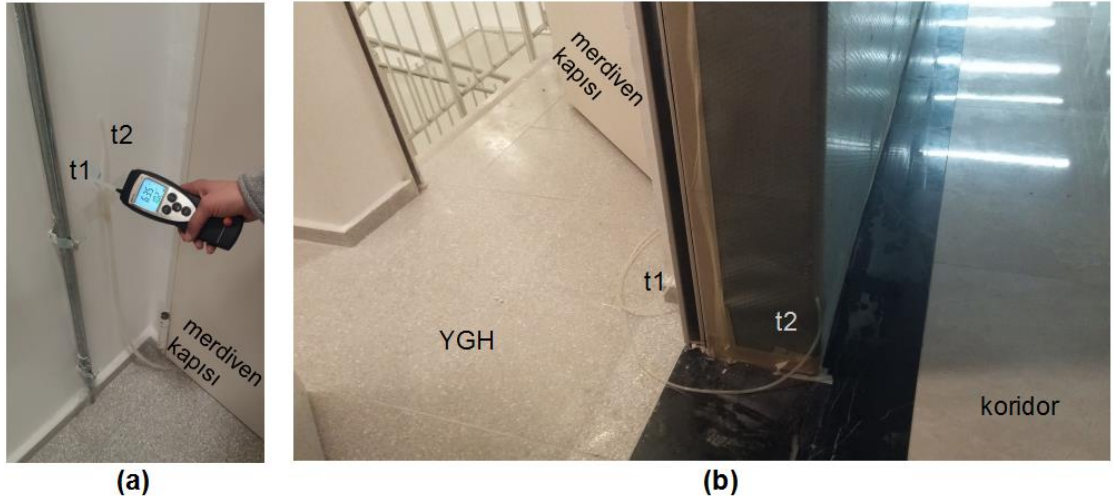
1. Frekans konvertörü set değeri,
2. Zonları ayıran kapıların açık/kapalı olması,
3. M-kapılarının açık/kapalı olması,
4. YGH-kapılarının açık/kapalı olması.

Bu çalışma kapsamında toplam üç adet test grubu oluşturulmuştur. Her bir test grubu dört adet testten oluşmakta ve her birinde farklı bir etki araştırılmaktadır. Birinci test grubunda yangının hangi katta çıktığına bağlı olarak hangi kattaki kapıların açık olmasının basınç dağılımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İkinci test grubu ve üçüncü test grubunda ise sırasıyla YGH'nin ve merdiveni düşey zonlara ayırmanın basınçlandırma sistemi etkinliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Belirlenen parametrelerin etkileri iki durum gözönüne alınarak incelenmiştir. Birinci durumda, tüm katlarda merdiven ve koridor arasındaki kapılar kapalıdır ve *tüm kapılar kapalı durumu* ismiyle anılmaktadır. İkinci durumda ise merdivenden bina dışına tahliye yapılan kattaki kapılar ile seçilen bir başka kattaki kapılar açık bırakılmıştır ve bu duruma *kritik kapılar açık durumu* ismi verilmiştir.

Tüm kapılar kapalı durumunda, tüm frekans konvertörleri 20 Hertz değerine, *kritik kapılar açık durumunda* ise 40 Hertz değerine sabitlenmiştir. Böylelikle farklı test gruplarında aynı miktarda hava debisinin merdivene beslenmesi ve kıyaslama yapabilmek için uygun ortam yaratılması hedeflenmiştir.

Testler sırasında merdiven içerisinde aşağı doğru inilerek her katta merdiven-koridor ve merdiven-YGH arasındaki basınç farkı ölçülmüştür. Binanın 40 katlı olduğu göz önüne alındığında, bu ölçümleri kolaylaştırmak için her kata plastik borular döşenmiştir. Dış çapı 6 mm, iç çapı 4 mm olan esnek plastik borulardan yaklaşık olarak 160 m alınmıştır ve testlerin ön hazırlık safhasında her kata iki adet plastik boru döşenmiştir. Şekil 4.6-a’da gösterildiği gibi, iki adet borunun bir ucu merdiven içerisine ana sahanlığa sabitlenmiş ve borular M-kapısının altından geçirilmiştir. “t1” kodlu borunun diğer ucu YGH içerisinde sabitlenmiştir (Şekil 4.6-b). “t2” kodlu borunun diğer ucu ise YGH-kapısının altından da geçirilerek koridor hacmi içerisinde yükseltilerek sabitlenmiştir. Her katta t1 borusunun merdiven içerisinde kalan ucu mavi etiket ile işaretlenerek olası bir karışıklığın önüne geçilmiştir. Üçüncü bodrum katı hariç, tüm kapı altındaki boşluklar, boruların geçebileceği yüksekliktedir. Üçüncü bodrum katında M-kapısının alt boşluğu boru geçişini karşılayacak yükseklikte olmadığı için bu katta ölçüm yapılamamıştır. Saha testlerinin yapıldığı günlerde, öncelikli olarak merdiven boyunca yukarıdan aşağıya inilerek tüm boruların eksiksiz olduğu, sabitlenen uçlarının açık olduğu ve boruların sıkışma yapıp yapmadığı kontrol edilmiştir.



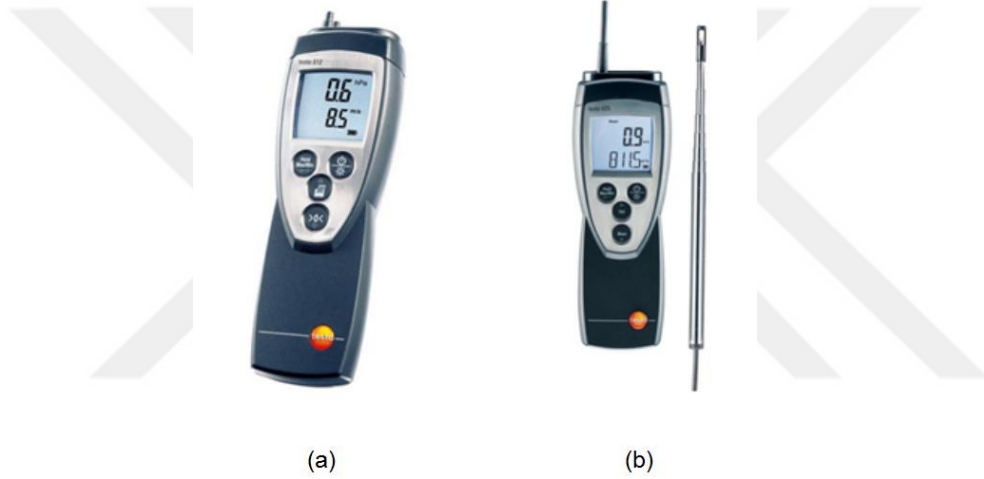
Şekil 4.6 : Merdiven-YGH ve merdiven-koridor arasında boru yerleşimi ve basınç farkı ölçümü: (a) merdiven içerisinden ölçüm yapımı, (b) boruların yerleşimi.

Kritik kapılar açık durumu testlerinde YGH-kapısı açıklığından kızgın tel anemometresi ile hız ölçümü yapılmıştır. Kapı açıklığı göz kararı 15 parçaya ayrılmış ve her bir parçanın merkezi civarında bir noktadan ölçüm alınmıştır. Kaydedilen 15 adet ölçümün ortalaması alınarak kapı açıklığındaki ortalama hava hızı elde edilmiştir.

Her bir test grubu için dış ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı değeri ölçülmüştür. Merdivenin tahliye ettiği sokak seviyesinde ölçüm yapılmış ve ölçülen en yüksek hız değeri kaydedilmiştir.

4.2.1 Ölçüm aletleri ve kalibrasyon

Basınç farkı ölçümleri için testo® 512 model basınç transdüseri kullanılmıştır (Şekil 4.7-a), bu cihaz 0 – 200 Pa aralığında 0.1 Pa hassasiyetle ölçüm yapmaktadır. Hava hızı ölçümleri için testo® 425 model kızgın tel anemometresi (Şekil 4.7-b) kullanılmış olup cihazın ölçüm aralığı 0 – 20 m/s ve hassasiyeti ise 0.03 m/s'dir. Bu cihaz ile aynı zamanda sıcaklık ölçümleri de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7 : Ölçme aletleri: (a) testo 512 fark basınç transdüseri, (b) testo 425 hız ölçer.

Her iki cihazın kalibrasyonu için İTÜ Makina Fakültesi Akışkanlar Laboratuvarı'nda yer alan daralan kesit içinde yerleştirilmiş pitot-statik tüpü (Şekil 4.8-a) ve eğik manometre (Şekil 4.8-b) kullanılarak yapılmıştır. Daralan kesit içerisine gönderilen havanın debisi, fan devir sayısının değiştirilmesiyle farklı değerler almaktadır. Ayrıca pitot tüpü de daralan kesit içerisinde düşey yönde hareket edebilmektedir.

Basınç transdüseri kalibrasyonu için, pitot-statik tüpü, plastik borular ve T bağlantıları ile eğik manometre ve basınç transdüserine aynı anda bağlanmıştır ve farklı basınç farkı değerleri için eğik manometre ve basınç transdüserinden elde edilen ölçümler kıyaslanmıştır. Basınç transdüserinin doğruluk değeri %0.04 olarak elde edilmiştir.

Kızgın tel anemometresinin kalibrasyonu için, pitot-statik tüpünün ölçüm yaptığı uç ve kızgın tel anemometresinin ucu, daralan kesitin çıkışında aynı hizada sabitlenmiştir.

Daralan kesite hava besleyen fanın devir sayısı değiştirilerek farklı hızlarda hava akışı sağlanmıştır. Pitot-statik tüpünün bağlı olduğu eğik manometre ve kızgın tel anemometresinin yaptığı ölçümler kıyaslanarak, anemometrenin doğruluğu %0.1 olarak elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.8 : Kalibrasyonda kullanılan gereçler: (a) daralan kesitli kanal, (b) eğik manometre.

Sahada yapılan ölçümlerde hız anemometresinin açısal veya konumsal olarak yanlış hizalanması, göstergesinde gözlemlenen salınımlar vb. sebebiyle, cihazın kalibrasyonu ile elde edilen doğruluk değerleri sahada yapılan ölçümlerin doğruluğunu tam olarak karşılayamamaktadır. Sahada sürekli rejimde tekrarlanan hız ölçümleri yapılması sonucunda, debi ölçümleri için ölçme hatalarının %5'ten fazla olmadığı düşünülmektedir. Basınç farkı ölçümlerinde sadece cihaz göstergesindeki salınım nedeniyle ölçme hatası oluşmaktadır. Bu hatalar sürekli rejimde yaklaşık olarak ± 1 Pa değişkenlik göstermiştir. Sonuç olarak ortalama 20 Pa değerinde basınç ölçümleri için bağıl hata değerinin %5'ten fazla olmadığı düşünülmektedir.

4.3 Birinci test grubu: kritik kat (KK) test grubu

Çeşitli kaynaklarda, merdiven basınçlandırma sistemi tasarımı yapılırken tasarım yangın katında, bu kata komşu katlarda ve tahliye katında merdiven-koridor arasındaki kapıların açık olduğu durumun dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir. Ancak tasarımda seçilecek yangın katının binanın hangi katlarında olması gerektiği konusunda bir bilgi bulunmamaktadır. Bu sebeple merdiven ile koridor arasındaki kapıların açık olduğu kritik katın belirlenmesi amacıyla bir grup test yapılmıştır.

Birinci gruptaki testlerin kodlaması yapılırken Kritik Kat test grubunda olduğunu ifade etmek için KK ön eki verilmiştir. Bu test grubunu oluşturan tüm testlerde tahliye katında merdiven-koridor arasındaki kapılar (M-kapısı ve YGH-kapısı) açık tutulmuştur. KK-6, KK-22, KK-33 testlerinde tahliye katına ilave olarak sırasıyla 6. kat, 22. kat ve 33. katta merdiven-koridor arasındaki kapılar açık bırakılmıştır. KK testinde ise sadece tahliye katındaki kapılar açıktır. Bu dört test için hazırlanan düzenekler Çizelge 4.2’de verilmektedir.

Dört adet testin hepsinde frekans konvertörleri 40 Hertz değerinde sabitlenmiş ve zon ayırım kapıları kapalı durumdadır. Birinci grup saha testlerinde ölçülen dış ortam sıcaklığı 7°C, ölçülen en yüksek rüzgâr hızı 0.5 m/s’dir.

Çizelge 4.2 : Birinci test grubu parametreleri.

<u>KK Testi</u> - Tahliye katında kapılar⁽¹⁾ açık - Diğer tüm kapılar⁽¹⁾ kapalı - Tüm basınçlandırma fanlarının frekans konvertörleri 40 Hz değerine sabitlenmiş - Zon ayırım kapıları kapalı	<u>KK-6 Testi</u> - Tahliye katında kapılar⁽¹⁾ açık - 6. katta kapılar⁽¹⁾ açık - Tüm basınçlandırma fanlarının frekans konvertörleri 40 Hz değerine sabitlenmiş - Zon ayırım kapıları kapalı
<u>KK-22 Testi</u> - Tahliye katında kapılar⁽¹⁾ açık - 22. katta kapılar⁽¹⁾ açık - Tüm basınçlandırma fanlarının frekans konvertörleri 40 Hz değerine sabitlenmiş - Zon ayırım kapıları kapalı	<u>KK-33 Testi</u> - Tahliye katında kapılar⁽¹⁾ açık - 33. katta kapılar⁽¹⁾ açık - Tüm basınçlandırma fanlarının frekans konvertörleri 40 Hz değerine sabitlenmiş - Zon ayırım kapıları kapalı

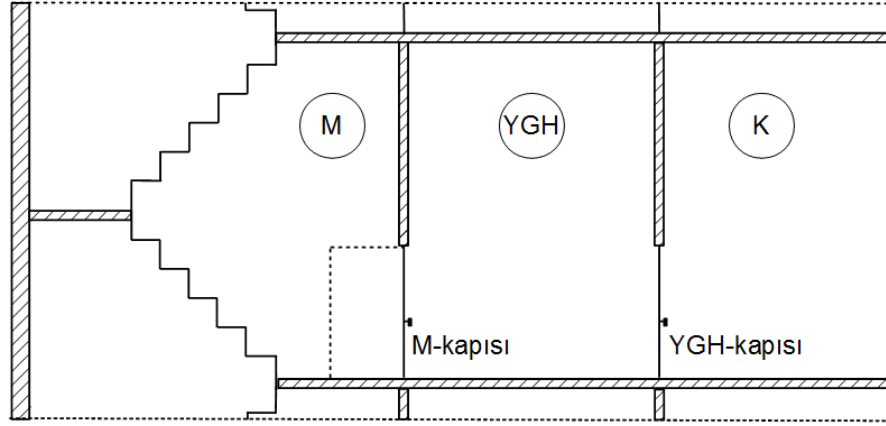
⁽¹⁾ “Kapılar” ifadesi ile M-kapısı ve YGH-kapısı birlikte ifade edilmektedir.

4.4 İkinci test grubu: YGH etkisi test grubu

Ülkemizde yapı yüksekliği 51.5 m’yi geçen binalarda yapılması zorunlu olan yangın güvenlik holünün (YGH) etkileri bu test grubunda araştırılmıştır. YGH’nin etkisini araştırmak için YGH’nin olduğu ve olmadığı durumların kıyaslanması yapılmıştır. YGH’nin olmadığı durumu temsil edebilmek için Şekil 4.9’da kesik çizgiler ile gösterilen M-kapısı açık bırakılmıştır. YGH’lerin merdiven hacmine ilave edildiği bu testlerde, koridor ile merdiven arasında sadece YGH-kapısı bulunmaktadır.

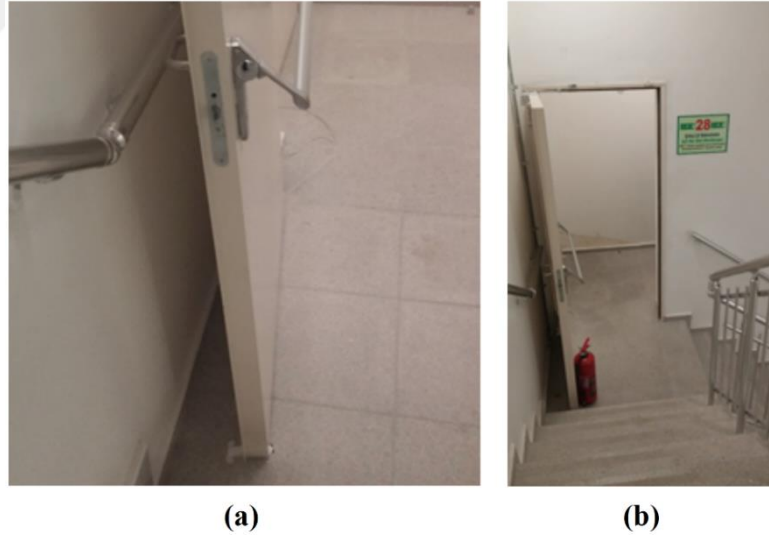
YGH’nin olmadığı durumun temsili için bir başka seçenek M-kapısı yerine YGH-kapısının açık bırakılmasıdır. Bu seçenek ile YGH hacmi, koridor hacmine katılacak ve merdiven ile koridor arasında sadece M-kapısı kalacaktır. Ancak testler sırasında

bina koridorlarında bulunması muhtemel olan görevlilerin bu kapıları kapatma olasılığı dikkate alınarak M-kapısının açık bırakılması tercih edilmiştir.



Şekil 4.9 : Merdiven, YGH ve koridorun şematik gösterimi.

Binada bulunan 40 katın tamamında M-kapısının açık bırakılması sağlanmıştır, bunun için tüm M-kapılarının altına takozlar sıkıştırılmıştır (Şekil 4.10-a). Bazı katlarda, kapı altı boşluk yüksekliğinin uygun olmaması sebebiyle kapı önüne ağırlık yerleştirilerek kapının açık durumda kalması sağlanmıştır (Şekil 4.10-b).



Şekil 4.10 : M-kapılarının açık bırakılması: (a) takoz ile, (b) ağırlık ile.

YGH etkisini incelemek için *tüm kapılar kapalı durumu* için iki adet ve *kritik kapılar açık durumu* için iki adet olmak üzere toplam dört adet test yapılmıştır. Yapılan dört testin ikisinde YGH bulunurken, diğer iki testte YGH yoktur. Bu gruptaki dört test için tasarım yangın katı 32. kat olarak belirlenmiştir.

Her bir teste isim verilirken testin ait olduğu duruma ve YGH'nin olup olmamasına göre kodlama yapılmıştır. Testlerin isimlerinde etkin parametrenin ismi küçük

karakterle, parametrenin durumu ise büyük karakterle yazılmıştır. Örneğin kkA-yghY isimli test, kritik kapılar Açık - yangın güvenlik holü Yok anlamına gelmektedir. İsimlendirmede belirli bir rutini tekrarlamak için, *tüm kapılar kapalı durumu*, kkK (kritik kapılar Kapalı) ifadesi ile anılmıştır. Çizelge 4.3'te dört adet testin ismi, etkin parametrelere göre verilmektedir.

Çizelge 4.3 : YGH etkisi test grubunda her bir teste, etkin parametrelere göre verilen isim.

	Tüm kapılar kapalı durumu	Kritik kapılar açık durumu
YGH var	kkK-yghV testi	kkA-yghV testi
YGH yok	kkK-yghY testi	kkA-yghY testi

kkK-yghY testinde YGH'nin olmadığı durumu temsil etmek için, tüm katlarda M-kapıları açık durumdadır. Testin isimlendirmesi nedeniyle YGH-kapılarının ve M-kapılarının tamamının kapalı olduğu algılanabilir, ancak “tüm kapılar kapalı” ifadesi ile anlatılmak istenilen tüm katlarda merdiven-koridor arasında kapalı bir kapı bulunmasıdır.

Bu grupta yer alan her bir testin tüm parametreleri Çizelge 4.4'te verilmektedir. Tüm testlerde zon ayırım kapıları kapalıdır. *Tüm kapılar kapalı durumunda* üç ayrı basınçlandırma fanının da frekans konvertörü 20 Hertz değerine sabitlenmiştir. *Kritik kapılar açık durumunda* ise frekans konvertörleri 40 Hertz değerine ayarlanmıştır. İkinci grup saha testlerinde ölçülen dış ortam sıcaklığı 13°C, ölçülen en yüksek rüzgâr hızı değeri 7 m/s'dir.

Çizelge 4.4 : İkinci test grubu parametreleri.

<u>kkK-yghV Testi</u> - 40 katta da YHG-kapısı kapalı (<i>tüm kapılar kapalı durumu</i>) - 40 katta da M-kapısı kapalı (YGH var) - Tüm frekans konvertörleri 20 Hz değerinde - Zon ayırım kapıları kapalı	<u>kkA-yghV Testi</u> - Tahliye katında ve 32. katta M-kapısı ile YGH-kapısı açık (<i>kritik kapılar açık durumu</i>) - Diğer tüm M-kapısı kapalı (YGH var) - Diğer tüm YGH kapısı kapalı - Tüm frekans konvertörleri 40 Hz. değerinde - Zon ayırım kapıları kapalı
<u>kkK-yghY Testi</u> - 40 katta da YHG-kapısı kapalı (<i>tüm kapılar kapalı durumu</i>) - 40 katta da M-kapısı açık (YGH yok) - Tüm frekans konvertörleri 20 Hz değerinde - Zon ayırım kapıları kapalı	<u>kkA-yghY Testi</u> - Tahliye katında ve 32. katta M-kapısı ile YGH-kapısı açık (<i>kritik kapılar açık durumu</i>) - Diğer tüm M-kapısı açık (YGH yok) - Diğer tüm YGH kapısı kapalı - Tüm frekans konvertörleri 40 Hz. değerinde - Zon ayırım kapıları kapalı

4.5 Üçüncü test grubu: düşey zonlama test grubu

Düşey zonlamanın etkisinin araştırıldığı bu testlerde merdivende zon ayırım kapılarının (Şekil 4.3) açık olduğu, merdivenin tek bir basınçlandırma zonundan oluştuğu durum ile merdivende bulunan iki adet zon ayırım kapısının kapalı olduğu ve merdivenin üç adet basınçlandırma zonuna bölündüğü durum kıyaslanmıştır.

İkinci grup testlerde olduğu gibi, bu test grubunda da iki farklı durum ele alınmış ve her bir durum için iki adet test yapılmıştır. Bir durumun ilk testinde merdiven üç adet zondan oluşurken, ikincisinde merdiven tek bir basınçlandırma zonundan oluşmaktadır. Düşey zonlamanın etkisinin araştırıldığı bu test grubunda, etkin parametrelere göre her bir teste verilen isim Çizelge 4.5'te verilmektedir.

Çizelge 4.5 : Düşey zonlamanın etkisinin incelendiği test grubunda her bir teste, etkin parametrelere göre verilen isim.

	Tüm kapılar kapalı durumu	Kritik kapılar açık durumu
Tek zon	kkK-z1 testi	kkA-z1 testi
Üç zon	kkK-z3 testi	kkA-z3 testi

Test isimlerindeki ilk ifade olan kkK ve kkA yangın senaryosuna göre belirlenen durumu işaret etmektedir; kkA ifadesi kritik kapılar Açık durumunu ifade etmektedir, kkK ise kritik kapılar Kapalı (tüm kapılar kapalı) anlamına gelmektedir. Test isimlerindeki ikinci ifade olan z1 ve z3, merdiven zon sayısını belirtir. Merdivenin tek bir zondan ibaret olduğu durum z1 ile, merdivenin üç adet basınçlandırma zonundan oluştuğu durum z3 ile ifade edilmektedir.

Bu gruptaki her bir testin tüm parametreleri Çizelge 4.6'da verilmektedir. Tüm katlarda merdiven önünde YGH'nin mevcut olduğu bu testlerde, üç basınçlandırma fanının da frekans konvertörü *tüm kapılar kapalı durumu* için 40 Hertz değerine, *kritik kapılar açık durumu* için ise 20 Hertz değerine sabitlenmiştir. Üçüncü grup saha testlerinde ölçülen dış ortam sıcaklığı 17°C, ölçülen en yüksek rüzgâr hızı değeri 5 m/s'dir.

Çizelge 4.6 : Üçüncü test grubu parametreleri.

<u>kkK-z1 Testi</u> - Tüm katlarda M-kapısı ve YGH-kapısı kapalı (<i>tüm kapılar kapalı durumu</i>) - Tüm zon ayırım kapıları açık - Frekans konvertörü 20 Hz değerinde	<u>kkA-z1 Testi</u> - 32. kat ve tahliye katı hariç tüm katlarda M-kapısı ve YGH-kapısı kapalı (<i>kritik kapılar açık durumu</i>) - Tüm zon ayırım kapıları açık - Frekans konvertörü 40 Hz değerinde
<u>kkK-z3 Testi</u> - Tüm katlarda M-kapısı ve YGH-kapısı kapalı (<i>tüm kapılar kapalı durumu</i>) - Tüm zon ayırım kapıları kapalı - Frekans konvertörü 20 Hz değerinde	<u>kkA-z3 Testi</u> - 32. kat ve tahliye katı hariç tüm katlarda M-kapısı ve YGH-kapısı kapalı (<i>kritik kapılar açık durumu</i>) - Tüm zon ayırım kapıları kapalı - Frekans konvertörü 40 Hz değerinde

4.6 Basınçlandırma hava debisinin elde edilmesi

Merdivene beslenen hava debisi iki farklı yöntem ile elde edilmiştir ve elde edilen değerler kıyaslanmıştır. Bu yöntemler “korunum yöntemi”, ve “hız ölçümü yöntemi” olarak isimlendirilmiştir.

Korunum yöntemi ile debinin elde edilmesi, kütle korunumu ilkesine dayanmaktadır; merdiveni terk eden hava debisinin, merdivene sağlanan debi değerine eşit olacağı ilkesi kullanılmıştır. Merdiveni terk eden hava debisi, testte yapılan ölçümler kullanılarak elde edilmiştir. Korunum yöntemi ile debinin elde edilmesi, her bir test için ayrı ayrı tekrarlanmıştır.

Hız ölçümü yönteminde ise basınçlandırma fanlarının giriş ağızlarında hız ölçümleri yapılarak debi elde edilmiştir. Bu yöntem ile iki adet debi değeri ölçülmüştür; testler sırasında fanların frekans konvertörlerinin sabitlendiği iki değer için (20 Hz ve 40 Hz) iki ayrı ölçüm yapılmıştır.

Kanal bağlantılarındaki sızıntılar nedeniyle fanlardan gelen hava debisinin tamamının merdivene iletilemeyeceği standartlarda da dikkate alınan bir husustur. Bu sebeple, hız ölçümü yöntemi ile elde edilen debi değerinin, korunum yöntemi ile elde edilen değerlerden fazla olması beklenmektedir.

4.6.1 Korunum yöntemi ile debinin belirlenmesi

Merdiveni terk eden hava miktarı merdiven-koridor arası basınç farkı ölçümleri ile YGH-kapısı açıklığında yapılan hız ölçümleri kullanılarak yapılmıştır. *Tüm kapılar kapalı durumu* testlerinde hava merdiveni sadece sızıntılar yoluyla terk etmektedir bu

nedenle debi hesabı için sadece basınç farkı ölçümleri kullanılmıştır. *Kritik kapılar açık durumu* testlerinde ise hava merdiveni sızıntıların yanında, açık kapılar vasıtasıyla da terk etmektedir, bu nedenle bu testler için basınç farkı ölçümleri yanı sıra hız ölçümleri de kullanılmıştır.

Merdivendeki duvar sızıntıları ihmal edilmektedir çünkü sahada yapılan incelemelerde merdiven yuvası duvarlarının bütünlüğünü bozacak hiçbir durumun (tesisat geçişi, çatlaklar vb.) olmadığı gözlenmiştir. Ayrıca merdiven yuvası duvarlarının yönetmelik gereğince yangına 2 saat dayanıklı olarak imal edildiği bildirilmiştir. Merdivenden olan sızıntıların sadece kapıların etrafındaki açıklıklar nedeniyle olduğu kabul edilmiştir.

Tüm kapılar kapalı durumu için, basınçlandırma havası debisi, orifis denklemi olan denklem (4.1) kullanılarak elde edilmiştir. Bu denklemdeki basınç farkı (Δp) için merdiven-koridor arasındaki basınç farkı kullanılmış olup, A_e efektif sızıntı alanını ifade etmektedir.

$$\dot{V} = 0.839 A_e \sqrt{\Delta p} \quad (4.1)$$

Bir adet kapının sızıntı alanı 0.01 m^2 olarak kabul edilmiştir. Hobson ve Stewart'ın çalışması [78] ile EN 12101-6'da [3] tek kanatlı kapıların sızıntı alanı olarak 0.01 m^2 kullanılması önerilmektedir. YGH'nin mevcut olduğu testlerde, M-kapısı ve YGH-kapısı hava akışına karşı seri bağlı halde bulunmaktadır (Şekil 4.5). Bu durumda seri bağlı kapalı kapılar için sızıntı alanı hesabı yapılarak efektif sızıntı alanı, A_e , denklem (4.2) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklemdeki A_1 ve A_2 sırasıyla M-kapısı sızıntı alanını ve YGH-kapısı sızıntı alanını ifade etmektedir. Bu iki değer de 0.01 m^2 olarak kabul edilmiş ve A_e değeri 0.00707 m^2 olarak hesaplanmıştır. YGH'nin mevcut olmadığı durumunun temsil edildiği testlerde ise, merdiven-koridor arasındaki sızıntı alanı sadece bir kapının sızıntılarından oluşmakta ve A_e 0.01 m^2 değerine eşittir.

$$A_e = \left(\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} \right)^{-1/2} \quad (4.2)$$

Denklem (4.1) ile bir katta merdivenden koridora doğru yönelen havanın debisi hesaplanmaktadır. *Tüm kapılar kapalı durumunda* merdiveni terk eden toplam hava debisi, 40 katın her birinden olan sızıntıların debisinin toplamına eşittir. (denklem (4.3)).

$$\dot{V}_{t,kkK} = \sum_{n=1}^{40} (0.839 A_e \sqrt{\Delta p})_n \quad (4.3)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan $\dot{V}_{t,kkK}$, tüm kapılar kapalı durumu için merdiveni terk eden toplam debiyi ifade etmektedir.

Kritik kapılar açık durumunda ise kapalı kapıların olduğu katlarda sızıntılar nedeniyle merdiven dışına çıkan hava debisine ve açık kapılardan çıkan debinin ilave edilmesi gerekmektedir. Bir kapıdan geçen hacımsal debi ($\dot{V}$); ölçülen ortalama hız değeri (V_{ort}) ve kapı açıklığının (A) çarpımı ile elde edilir (denklem (4.4)).

$$\dot{V} = AV_{ort} \quad (4.4)$$

Kritik kapılar açık durumunda merdiven ile koridor arasında iki adet kapı açık durumdadır ve bu nedenle merdiveni terk eden toplam debi, denklem (4.5) ile hesaplanır. Bu denklemdeki $\dot{V}_{ak1}$ ve $\dot{V}_{ak2}$ ifadeleri sırasıyla, birinci ve ikinci açık kapıdan çıkan hava debisini temsil etmektedir. Denklemde yer alan üçüncü terim ise kapalı duran kapıların sızıntılarından merdiveni terk eden hava miktarını belirtir (bu denklemde yer alan $\dot{V}_{t,kkA}$, *kritik kapılar açık durumu* için merdiveni terk eden toplam debiyi ifade etmektedir).

$$\dot{V}_{t,kkA} = \dot{V}_{ak1} + \dot{V}_{ak2} + \sum_{n=1}^{38} (0.839 A_e \sqrt{\Delta p})_n \quad (4.5)$$

4.6.2 Hız ölçümü yöntemi ile debinin elde edilmesi

Bu yöntemde üç adet fanın sağladığı debi değerinin doğrudan elde edilmesi amaçlanmıştır. Öncelikle fandan basınçlandırma şaftına hava ileten kanallar içerisinde hız ölçümü yapmak göz önüne alınmıştır. Kanallardan ölçüm yapılabilmesi için fan, dirsek, kesit değişimi gibi akışı bozan elemanlardan sonra kanal çapının on katı uzunluğunda düz kanal gelmesi gerekmektedir. Ancak tesisat daireleri içerisinde bu şartları sağlayan düz kanal bulunmamaktadır. Şekil 4.11’de 34. katta yer alan tesisat dairesindeki basınçlandırma fanı ve basınçlandırma kanallarının bulunduğu yer gösterilmektedir. Basınçlandırma fanının mavi ok ile belirtildiği bu şekilde, kanallardan ölçüm yapmaya uygun bir yer olmadığı görülmektedir. 21. kat ve 5. katta yer alan tesisat dairelerinde de aynı durum gözlenmiştir.



Şekil 4.11 : 34.kattaki tesisat daireesinde basınçlandırma fanı ve basınçlandırma kanalları.

Basınçlandırma fanlarının emiş ağzında, Şekil 4.12’de gösterildiği gibi testo® 425 ölçüm cihazı kullanılarak hız ölçümü yapılmıştır. Kesit alanı yatayda yedi parçaya, düşeyde üç parçaya ayrılarak toplamda yirmibir hücreye bölünmüş ve her bir hücrenin merkezinden ölçüm almaya gayret edilmiştir. Ölçme işlemi her bir fan için tekrarlanmış ve merdivene beslenen debi üç ölçümün toplanmasıyla elde edilmiştir. Testler sırasında frekans konvertörleri 40 Hertz ya da 20 Hertz değerine sabitlendiği için, sadece bu frekans konvertörü değerleri için ölçüm yapılmıştır.



Şekil 4.12 : Ölçme yöntemi için fan emiş ağzında hız ölçümleri.

4.7 Saha Testlerinin Sonuçları

Bu bölümde öncelikle debi hesaplamalarına yer verilmektedir. Daha sonra sırasıyla her bir test grubunun sonuçları incelenmektedir. Test gruplarının sonuçları yapılan basınç farkı ölçümleri kullanılarak incelenmektedir.

4.7.1 Debi ölçüm değerleri

Sahada yapılan tüm testlerde, frekans konvertörlerinin üçü de yapılacak teste göre 20 Hz ya da 40 Hz değerine sabitlendiği için, farklı günlerde yapılan testlerde merdivene sağlanan debi miktarı aynıdır. Bu sayede her bir test için korunum yöntemi ile elde edilen debi değeri birbiri ile kıyaslanabilmektedir. Ayrıca bu yöntem ile elde edilen değerler, hız ölçümü yöntemi ile elde edilen debi değerleri ile kıyaslanmaktadır.

Çizelge 4.7’de her bir test için korunum yöntemi ile elde edilen değerler yer almaktadır. Çizelgede üst satırlarda frekans konvertörünün 20 Hz değerine sabitlendiği testler, alt satırlarda ise frekans konvertörünün 40 Hz değerine sabitlendiği testler yer almaktadır. Çizelgenin birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü sütununda sırasıyla ilgili test ismi, tüm kapalı kapılardan sızan debi, testte açık kapı bulunuyorsa bu kapılardan geçen debiler yer almaktadır. Toplam debi değeri ise en son sütundadır.

Çizelge 4.7 : Bu çalışmada yapılan testlerin herbiri için hesaplanan debi değerleri.

TEST	Kapalı kapılardan sızan hava debisi (m ³ /h)	Birinci açık kapıdan çıkan debi (m ³ /h)	İkinci açık kapıdan çıkan debi (m ³ /h)	Toplam debi (m ³ /h)
Frekans konvertörleri 20 Hertz değerine sabitlenmiş testler				
kkK-yghV	7559	-	-	7559
kkK-yghY	7191	-	-	7191
kkK-z3	7468	-	-	7468
kkK-z1	7541	-	-	7541
Frekans konvertörleri 40 Hertz değerine sabitlenmiş testler				
KK-33	4398	15624	15955	35977
KK-22	4229	16147	17899	38275
KK-4	4778	11678	19594	36050
KK	8560	19954	-	28514
kkA-yghV	4425	17832	18221	40478
kkA-yghY	5213	15254	16402	36869
kkA-z3	4411	17520	14784	36715
kkA-z1	4048	15245	18192	37485

Frekans konvertörlerinin 20 Hertz değerine sabitlendiği testlerde elde edilen debi değerinin ortalaması 7440 m³/h ve bu ortalama göre yüzde fark en fazla %3.4'tür. Frekans konvertörlerinin 40 Hertz değerine sabitlendiği testler için ortalama debi değeri 36295 m³/h'tir. Ortalama debi değerine göre hesaplanan en fazla yüzde fark, KK testinde görülmektedir ve bu değer %21'dir.

Korunum yöntemi ile debi hesabı için iki adet belirsizlik analizi yapılmıştır. Tüm kapılar kapalı durumu için kkK-yghV testi sonuçları kullanılarak yapılan belirsizlik analizinde belirsizlik %5.5 olarak hesaplanmıştır. kkA-yghV testi sonuçları kullanılarak kritik kapılar açık durumu için belirsizlik analizi yapılmış ve belirsizliğin %14 olduğu elde edilmiştir. Belirsizlik hesaplamaları için kullanılan denklemler ve değerler EK-A'da yer almaktadır.

Hız ölçümü yöntemi ile elde edilen debi değerleri Çizelge 4.8'de yer almaktadır. Frekans konvertörü 20 Hz değerine sabitlendiğinde, merdivenlere beslenen toplam debinin 19085 m³/s olduğu elde edilirken, frekans konvertörü 40 Hz değerine sabitlendiğinde aynı değer, 41282 m³/s olarak elde edilmiştir. Bu yöntem ile debi ölçümünün belirsizliği %4.7 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.8 : Frekans konvertörünün farklı set değerleri için ölçülen debi değerleri.

Frekans konvertörü set değeri	Birinci fandan ölçülen debi (m ³ /h)	İkinci fandan ölçülen debi (m ³ /h)	Üçüncü fandan ölçülen debi (m ³ /h)	Toplam debi (m ³ /h)
20 Hertz	6510	5693	6882	19085
40 Hertz	14587	12358	14337	41282

Frekans konvertörlerinin 40 Hz değerine sabitlendiği testleri için, korunum yöntemiyle elde edilen değerlerin ortalaması 36295 m³/s iken, hız ölçümü yöntemiyle elde edilen değer 41382 m³/s'dir. Bu iki değer arasındaki yüzde fark, %12.8'dir. Hız ölçümü yöntemiyle elde edilen değer daha büyük olması beklenen bir sonuçtur, çünkü fanlardan besleme şaftına kadar birçok sızıntı olduğu saha testleri sırasında da gözlenmiştir. EN 12101-6 standardında, açık kapı senaryosu için merdivene beslenmesi gereken hava debisi hesabında, elde edilen değer 1.15 değeriyle çarpılması gerektiği, bu çarpanın kanal kayıplarını karşılamak için verildiği belirtilmektedir [3].

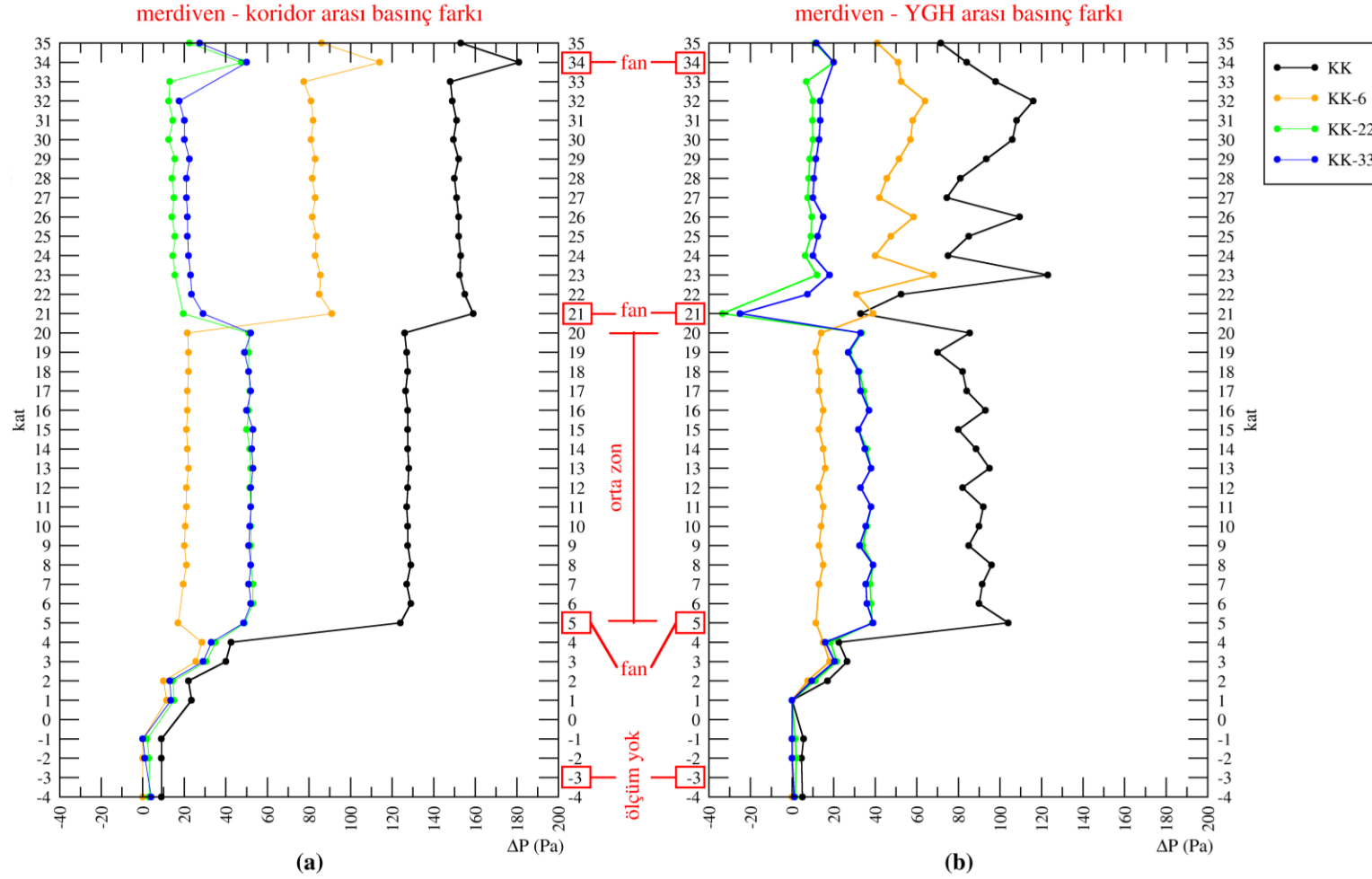
Frekans konvertörlerinin 20 Hz değerine sabitlendiği testler için, korunum yöntemiyle elde edilen değerlerin ortalaması 7440 m³/s iken, hız ölçümü yöntemi ile elde edilen

değer $19085 \text{ m}^3/\text{s}$ 'tir. Bu iki değer arasındaki yüzde fark, %61'dir. Yukarıda anlatıldığı gibi bu farkın %15'lik bölümü kanal sızıntılarından kaynaklanmaktadır. Açık kapıların bulunduğu testlerde, havanın büyük bir bölümü açık kapılar yolu ile merdiveni terk ederken, tüm kapıların kapalı olduğu testlerde sadece sızıntılar yolu ile hava merdiveni terk etmekte ve sızıntı alanlarının büyüklüğü önem kazanmaktadır. Bu çalışmada duvar sızıntıları ihmal edilip, kapalı bir kapının sızıntı alanı 0.01 m^2 olarak kabul edilmiştir. Yukarıda belirtilen % 61 'lik farkın büyük kısmının bu kabulden kaynaklandığı düşünülmektedir. EN 12101-6 standardında tüm kapıların kapalı olduğu senaryo için basınçlandırma debisi hesabında, elde edilen debi değerinin 1.15 çarpanı ile çarpılarak kanal sızıntılarının karşılanması gereksiniminin, tanımlanamayan sızıntılar için %50 oranında artırım tanımlanmıştır [3]. Bu durumda kanal sızıntıları ve tanımlanamayan sızıntılar için toplam efektif artırım değeri $1.15 \times 1.5 = 1.725$ olup, iki ölçüm arasındaki %61'lik farkın açıklanmasında tanımlanamayan sızıntıların neden etkili olduğu açıklanmaktadır.

4.7.2 KK test grubu sonuçları

Üçüncü bölümde ayrıntısıyla anlatıldığı gibi, birinci test grubu 4 adet testten oluşmaktadır, KK testinde sadece tahliye katında merdiven-koridor arasındaki kapılar açıktır. KK-6, KK-22 ve KK-33 testlerinde tahliye katındaki kapılara ilave olarak sırasıyla 6. kat kapıları, 22. kat kapıları ve 33. kat kapıları açıktır. Tahliye katı, merdivenin alt zonunda yer alırken 6. kat orta zondadır, 22. ve 33. katlar ise üst zondadır. Birinci test grubunda yapılan tüm ölçümler EK-B'de Çizelge B.1 ve Çizelge B.2'de verilmektedir.

Şekil 4.13'te her bir testte ölçülen basınç farkı değerleri yer almaktadır. Şeklin sol tarafında merdiven-koridor arasındaki, sağ tarafta ise merdiven-YGH arasındaki basınç farkı değerleri yer almaktadır. Test sonuçlarının daha kolay yorumlanması için, iki grafiğin arasında fanın bulunduğu katlar belirtilmiş, ayrıca merdiven zonlarının daha iyi anlaşılması için orta zonun sınırları (5. kat ve 20. kat) şekil üzerinde gösterilmiştir. Merdivende 3. bodrum katta M-kapısı altı boşluğu plastik boruların geçebileceği yükseklikte olmadığı için ölçüm alınamamıştır. Bu durum da şekil üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 4.13 : KK test grubunda ölçülen basınç farkı değerlerinin katlara göre dağılımı (KK testi: tahliye katı kapıları açık, KK-6 testi: tahliye katı ve 6. kat kapıları açık, KK-22 testi: tahliye katı ve 22. kat kapıları açık, KK-33 testi: tahliye katı ve 33. kat kapıları açık).

Şekil 4.13'e ilk bakışta, merdiven-koridor arasındaki basınç farkı değişimi kattan kata daha az farklılık gösterirken, merdiven-YGH grafiğinde kattan kata sıçramalar olduğu göze çarpmaktadır. Bu duruma yangın güvenlik hollerinin birbirleri ile bağlantısı olmayan, yalıtımlı hacımlar olması neden olmaktadır. Farklı katlardaki koridorlar asansör kuyuları ve elektrik/mechanik şaftlar ile birbirlerine bağıntılıdır. Bu şaftlar aracılığıyla kat koridorları arasında hava akışı ve basınç dengelemesi gerçekleşmekte ve ardışık katlarda merdiven yuvası ile kat koridoru arasındaki basınç farkının birbirine eşdeğer olduğu düşünülmektedir.

Farklı katlardaki YGH'ler arasında herhangi bir düşey boşluk bulunmadığı için, her bir YGH'nin basıncı, bulunduğu katta merdiven-YGH arasında yer alan M-kapısı sızıntısı ve YGH-koridor arasında yer alan YGH-kapısı sızıntısı ile ilişkilidir. Örneğin bir katta M-kapısı sızıntısı fazla ve YGH-kapısı sızıntısı düşük ise, bu kattaki YGH'nin basıncı komşu kattaki YGH'nin basıncından fazla olacaktır.

Fanın bulunduğu katlarda, fandan gelen havanın basınçlandırma şaftı ile bağlantısının YGH içinde yapılması ve bu bağlantı noktasında sızıntılar bulunması nedeniyle, YGH basıncının merdiven basıncından daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bu durum Şekil 4.13'te merdiven-YGH arası basınç farkı grafiğinde 21. katta basıncın ani olarak düşmesi, KK-22 ve KK-33 testlerinde negatif değerler okunması şeklinde ortaya çıkmaktadır.

Şekil 4.13'te Merdiven-koridor arası basınç farkı grafiği üzerinden KK-22 ve KK-33 eğrileri kıyaslandığında üst zonda açılan kapının, zonun alt noktasında veya üst noktasına yakın olması arasında önemli bir fark olmadığı görülmektedir. Her iki testte de üst zonda basınç 20 Pa mertebelerinde iken, orta ve alt zonlarda sırasıyla ortalama 50 Pa ve 15 Pa seviyelerindedir.

Açık kapının üst zonda veya orta zonda olması arasındaki farkın incelenmesi ise KK-33 (veya KK-22) testi ile KK-6 testinin kıyaslanması ile yapılabilir. KK-6 testinde basınç farkı değerleri KK-33 (veya KK-22) testlerine göre üst zonda daha fazla iken, orta zonda azalmıştır. KK-6 testinde üst zonda basınç farkı değeri 85 Pa mertebelerinde iken orta zonda 20 Pa mertebelerindedir. Merdivene hizmet veren üç fandan ikisinin bağlantısı üst zonda yapıldığı için, KK-6 testlerinde üst zonda basınç farkının daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. KK-6 testinde de alt zonda basınç farkı değerlerinin ortalaması 15 Pa mertebelerindedir.

KK testinde sadece alt zondaki tahliye kapısı açık olduğu için, üst ve orta zonlardaki basınç farkı değerleri oldukça fazladır; bu değerler sırasıyla 150 Pa ve 125 Pa mertebelerindedir. Yangın anında, frekans konvertörleri 40 Hertz değerinde sabit durmayacak, sensörlerden gelen ölçüm neticesinde daha düşük mertebelere inecek ve böylece üst ve orta zonlarda daha düşük basınçlandırma olacaktır. İki adet fanın bağlantısının üst zonda yapılması nedeniyle üst zondaki basınç farkı değerlerinin daha fazla olduğu düşünülmektedir. Alt zondaki basınç farkı değerinin ortalaması 20 Pa mertebelerindedir. Diğer testlere göre merdivenden dışarıya sadece bir kapı açıldığı için basınç farkı değerleri alt zonda daha yüksek değerlere çıkmaktadır.

Basınç farkı mertebeleri ifadesi, ilgili zondaki ortalama değere göredir. Alt zonda, tahliye katının aşağısında yer alan bodrum katlarda, basınç farkı değerleri KK-33, KK-22 ve KK-6 testleri için 0 Pa, KK testinde ise 10 Pa mertebesindeir. Bodrum katlara basınçlandırma havasının ulaşamadığı görülmektedir.

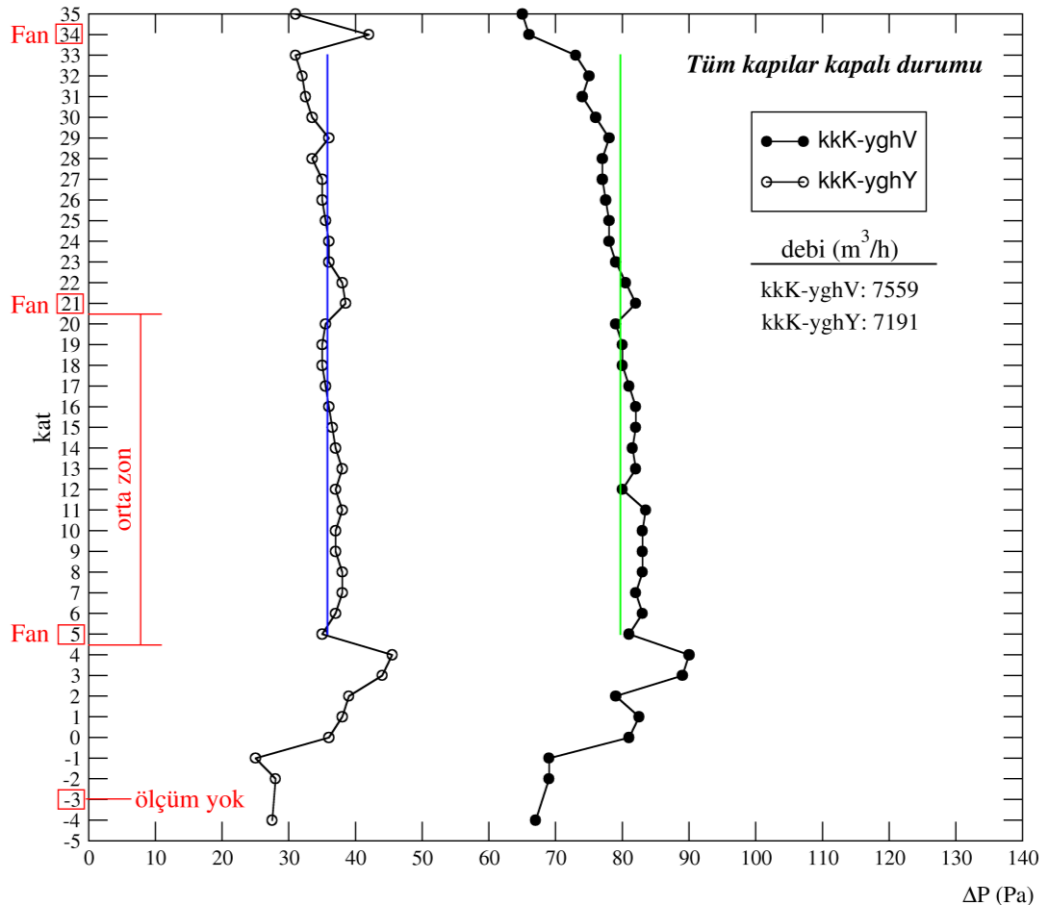
4.7.3 YGH etkisi test grubu sonuçları

YGH'nin basınçlandırılan merdivenlere etkisinin incelendiği bu test grubunda her testte merdiven-koridor ve merdiven-YGH arası basınç farkı değerleri kaydedilmiştir. Birinci grup testlerde olduğu gibi, Merdiven-YGH arası basınç farkı değerleri kattan kata sıçramalar göstermektedir.

YGH'nin etkisinin araştırıldığı bu test grubunda, merdiven-koridor arası basınç farkı değerleri değerlendirme için daha sağlıklı bir veri sağlamakta, bu nedenle sonuçların tartışmasında sadece merdiven-koridor arasındaki basınç farkı değerleri kullanılmaktadır. İkinci test grubunda yapılan tüm ölçümler EK-B'de, Çizelge B.3 ve Çizelge B.4'te verilmektedir.

Şekil 4.14'de *Tüm kapılar kapalı durumu* için elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Bu grafikte fanların bulunduğu katlar ve ölçüm yapmanın mümkün olmadığı 3. bodrum katı y-ekseni üzerinde kırmızı kutucuklar ile işaretlenmiştir. Her bir test için hesaplanan debi değeri grafik üzerinde yer almaktadır. Ayrıca bina zonlarının grafik üzerinde gösterilmesi amacıyla yine y-ekseni üzerinde orta zon belirtilmektedir. Grafikteki içi dolu daire ile işaretlenen eğri YGH'nin bulunduğu test olan kkK-yghV testidir (**k**ritik **k**apılar **K**apalı, **y**angın **g**üvenlik **h**olü **V**ar). İçi boş daire ile işaretlenen eğri ise yangın güvenlik holünün olmadığı testi (kkK-yghY) göstermektedir.

Grafiğe ilk bakışta, iki testte de ölçülen basınç farkı değerlerinin aynı karakteristiğe sahip olduğu, sadece birbirlerinden bir miktar ötelenmiş olduğu göze çarpmaktadır. İki eğrinin de özellikle 5-33 katları arasında kalan kısmının düşey bir doğruya yakın olduğu göze çarpmakta, ancak bu durum belirtilen katlar arasında merdivende basıncın sabit kaldığı anlamına gelmemektedir. Hidrostatik kuvvetler nedeniyle üst katlara çıktıkça merdivendeki ve koridorlardaki mutlak basınç değeri azalmaktadır, şekilde gösterilen ölçümler ise basınç farkı olup, azalan iki değer arasındaki farkın yaklaşık sabit olduğu veya çok az bir eğimle azaldığı anlamına gelmektedir.



Şekil 4.14 : İkinci test grubunda, tüm kapılar kapalı durumda, yangın güvenlik holünün bulunduğu ve bulunmadığı testlerde merdiven-koridor arasındaki basınç farkı ölçümleri (kkK-yghV: kritik kapılar kapalı – yangın güvenlik holü var, kkK-yghY : kritik kapılar kapalı – yangın güvenlik holü yok).

YGH'nin bulunduğu testte (kkK-yghV), 5. ve 33. katlar arasındaki ortalama basınç farkı 79.7 Pa'dır. Bu aralıktaki en düşük ve en yüksek basınç farkı değerleri 73 Pa ve 83.5 Pa'dır. Şekil 4.14'deki yeşil çizgi ile 79.7 Pa olan ortalama değer belirtilmektedir. Aynı şekilde, YGH'nin olmadığı testte (kkK-yghY) 5. ve 33. katlar arasındaki

ortalama basınç farkı 35.8 Pa (en düşük 31 Pa, en yüksek 38 Pa)'dır ve bu ortalama değer mavi çizgi ile belirtilmektedir.

YGH'nin bulunduğu testin ortalama değeri, YGH'nin bulunmadığı testin ortalama değerinden 2.2 kat büyüktür; bu durum merdivenlerin girişinde YGH yer aldığı anda, merdiven-koridor arasındaki basınç farkının yaklaşık olarak iki katına çıktığını göstermektedir.

YGH'nin bulunduğu durumda merdiven-koridor arası basınç farkının iki katına çıkması, matematiksel olarak desteklenebilmektedir. Her iki testte de, fanların frekans konvertörü aynı set değerinde çalıştığından, herhangi bir katta merdivene eşit miktarda taze hava beslenmektedir. Merdiven-koridor arasında kapı(lar)ın kapalı olduğu bir kat için bu ifade denklem (4.6) ile verilmektedir (aşağıdaki denklemlerde, test isimlerinde sadeleştirme sağlamak adına kritik kapıların kapalı olduğunu ifade eden kkK kısaltması kaldırılmıştır).

$$\dot{V}_{yghV} = \dot{V}_{yghY} \quad (4.6)$$

Sıklığı fazla olan merdiven duvarlarından olan sızıntılar ihmal edildiğinde, merdivenden koridora kapı sızıntıları ile hava geçişi olmaktadır. Bir kapının sızıntı alanı A ile ifade edilirse, birbiri ile seri bağlı iki kapının sızıntı alanı denklem (3.4) kullanılarak $0.707A$ olarak elde edilir. Yani, yghY testinde bir kattaki sızıntı alanı A iken, yghV testinde bu değer $0.707A$ 'dır. Denklem (3.8)'de verilen orifis denklemi ile denklem (4.6)'da yerine konularak aşağıdaki denklem elde edilir.

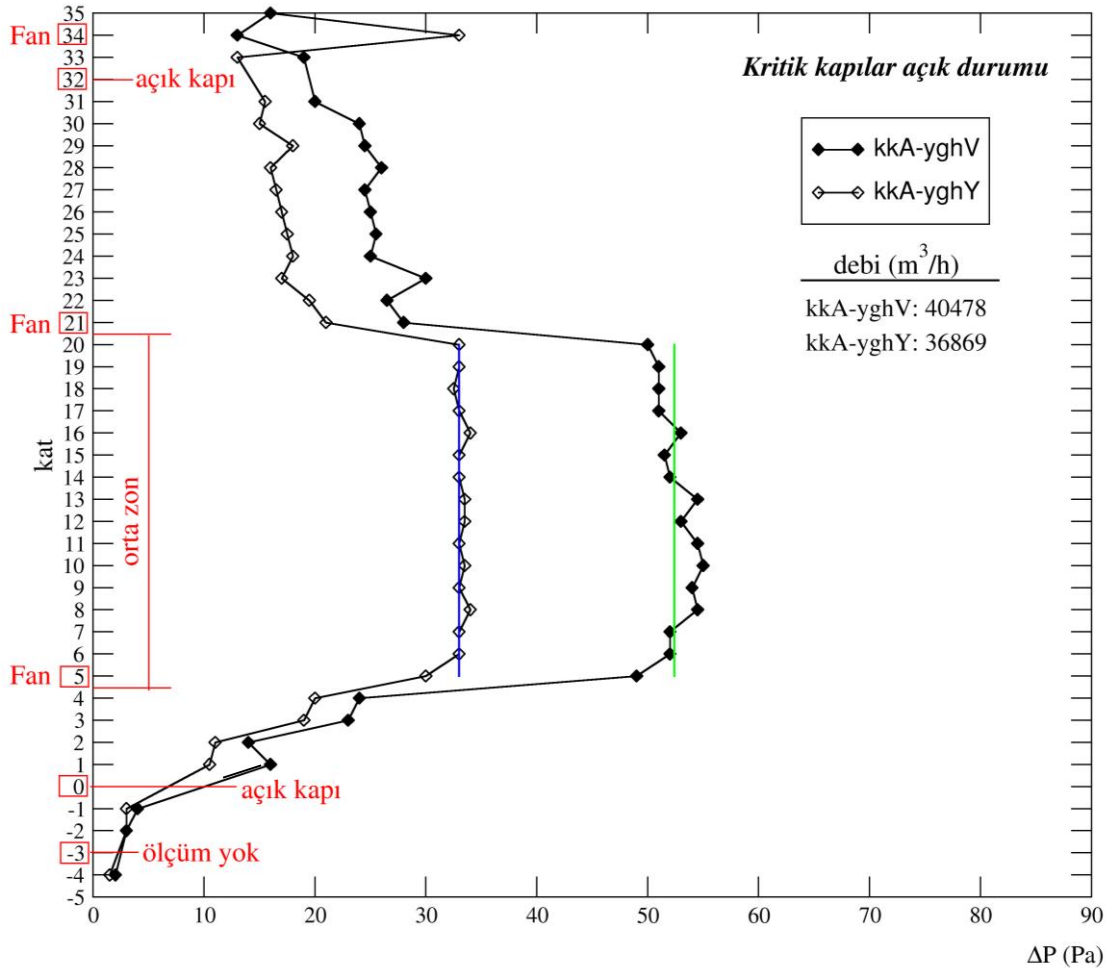
$$0.839 \cdot 0.707 \cdot A \cdot \sqrt{\Delta p_{yghV}} = 0.839 \cdot A \cdot \sqrt{\Delta p_{yghY}} \quad (4.7)$$

Gerekli sadeleştirmeler yapıldığında,

$$\Delta p_{yghV} = 2 \cdot \Delta p_{yghY} \quad (4.8)$$

elde edilir ve bu denklem, bir katta YGH bulunduğu merdiven-koridor arası basınç farkı değerinin, YGH bulunmadığı durumdaki merdiven-koridor arası basınç farkı değerinin iki katı olduğunu ifade eder. YGH 'nin bulunması, merdiven-koridor arasındaki basınç farkını iki katına çıkardığı deneysel ve matematiksel olarak elde edilmiştir. Bu sonuca göre, YGH bulunması merdivene duman girişini engellemede yarar sağlamaktadır.

Şekil 4.15'te aynı kıyaslama *kritik kapılar açık durumu* için yapılmaktadır. Grafik üzerinde açık kapıların bulunduğu katlar belirtilmektedir. Üst zonda yer alan 32. katta ve alt zonda yer alan tahliye katında merdiven-koridor arasındaki kapılar açık bırakılmıştır, bu nedenle her iki testte üst ve alt zonda ölçülen basınç farkı değerleri birbirine yakındır. Orta zonda ise, *tüm kapılar kapalı durumunda* elde edilen sonuca benzer bir sonuç ortaya çıkmıştır. Kritik kapılar açık-YGH var testinde (kkA-yghV) orta zon için ortalama basınç farkı değeri 52.4 Pa'dır (en düşük: 49 Pa, en yüksek: 54.5 Pa). YGH'nin bulunmadığı testte (kkA-yghY) ise orta zonun ortalama basınç farkı değeri 33 Pa'dır (en düşük: 30 Pa, en yüksek: 34 Pa). Bu iki ortalama değer Şekil 4.15 üzerinde mavi (33 Pa) ve yeşil (52.4 Pa) renkli düşey çizgiler ile belirtilmiştir. İki ortalama değer arasındaki oran 1.3'tür.



Şekil 4.15 : İkinci test grubunda, kritik kapılar açık durumda, yangın güvenlik holünün bulunduğu ve bulunmadığı testlerde merdiven-koridor arasındaki basınç farkı ölçümleri (kkA-yghV: kritik kapılar açık – yangın güvenlik holü var, kkA-yghY: kritik kapılar açık – yangın güvenlik holü yok).

Her iki testte de alt zonda standartlarda istenen minimum basınç farkı değerinin altında değerler elde edilmiştir. Tahliye (0) katında yer alan merdiven tahliye kapısından merdiveni terk eden debinin çok fazla olduğu bu nedenle de bodrum katlarında yeterince basınçlandırma sağlanamadığı düşünülmektedir. Binada oluşabilecek bir yangın durumunda, bu testlerde yapıldığı gibi frekans konvertörü set değeri sabit bir değerde olmayacak, sensörlerden gelen ölçümlere göre göre set değeri değişecektir ve daha fazla miktarda hava merdivene beslenecektir. Gerçek bir yangın durumunda bodrum katlarda ölçülen yetersiz basınç farkı durumunun meydana gelmeyeceği düşünülmektedir. Ayrıca gerçek bir yangın durumunda, bu testlerde yapıldığı gibi birden fazla katta aynı anda M-kapısı ve YGH-kapısının açık olması ihtimali daha düşüktür.

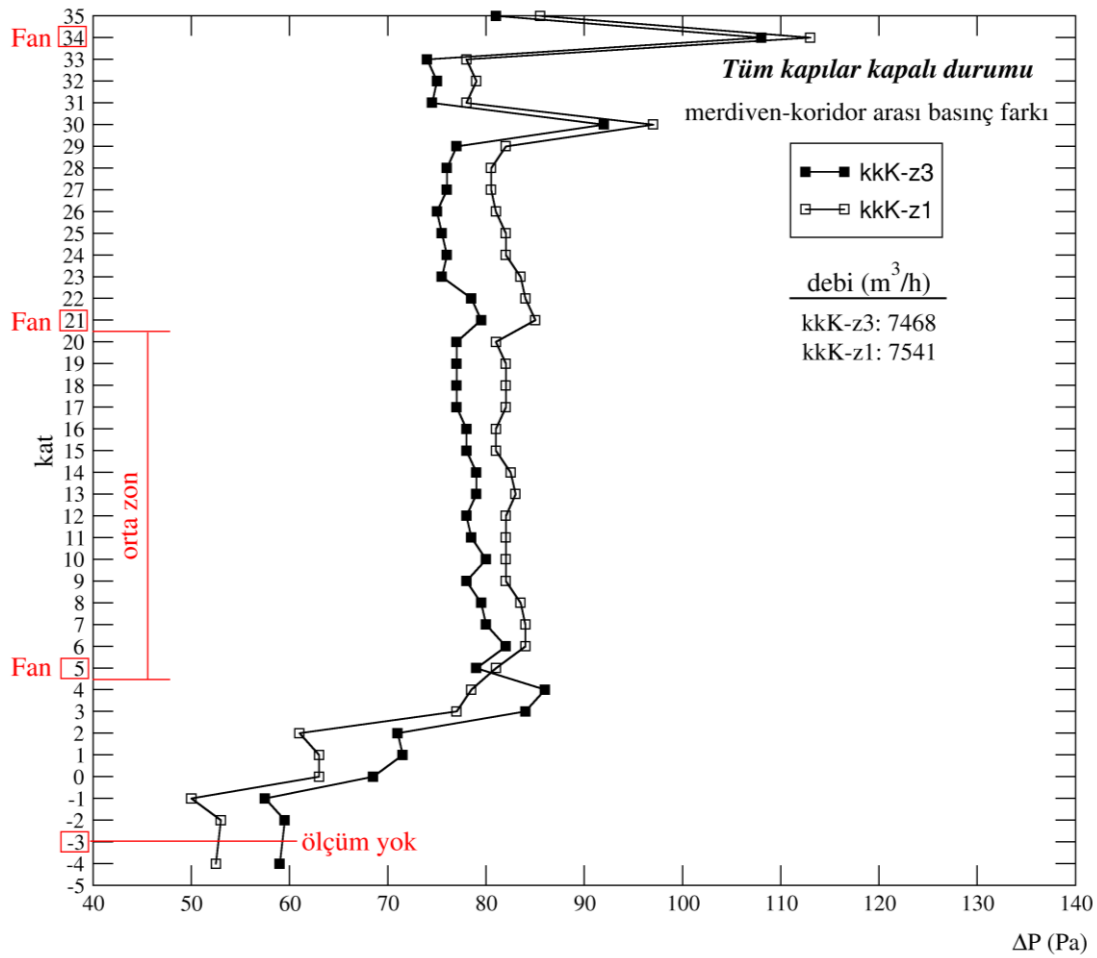
4.7.4 Düşey zonlamanın etkisi test grubu sonuçları

Çok yüksek binalarda kaçış merdiveninin birden fazla zona bölünmesi, merdiven yuvası boyunca homojen basınç dağılımı sağlanmasını kolaylaştırmak amacıyla yapılır. Bu test grubunun gerçekleştirildiği günde, dış ortam sıcaklığı 17°C, iç ortam sıcaklığı ise 21°C şeklinde ölçülmüştür. Üçüncü test grubunda yapılan tüm ölçümler EK-B'de Çizelge B.5 ve Çizelge B.6'da verilmektedir.

Şekil 4.16'da tüm *kapılar kapalı durumu* için, merdivenin tek zondan olduğu test (kkK-z1) ile üç zondan olduğu test (kkK-z3) kıyaslanmakta ve bu kıyaslama merdiven-koridor arası basınç farkı üzerinden yapılmaktadır. Şekil üzerinde, fanların bulunduğu katlar, ölçümün alınamadığı kat, orta zon sınırları ve test sırasında merdivene verilen toplam debi (korunum yöntemi ile hesaplanan debi) değerleri bulunmaktadır.

Şekil 4.16'ya ilk bakışta, iki testin sonuçlarının aynı karakteristikte ve değerlerin hemen hemen aynı mertebelerde olduğu göze çarpmaktadır. İç ve dış ortam sıcaklık farklarının az olması ve deney sürelerinin uzun olması nedeniyle, merdiven içerisindeki hava sıcaklığının düştüğü ve bu nedenle baca etkisinin az olduğu düşünülmektedir. kkK-z3 testinde, üst ve orta zonlardaki basınç farkı, kkK-z1 testine göre daha düşük değerlerdedir. kkK-z3 testinde üst zonda ortalama basınç farkı 76 Pa iken, kkK-z1 testinde bu değer 81.3 Pa'dır (ortalama alınırken, sıçrama yapan değerler hesaplama dâhil edilmemiştir). Orta zon için ortalama basınç farkı değeri kkK-z3 ve kkK-z1 testleri için sırasıyla 78.6 Pa ve 82.2 Pa'dır.

Alt zona gelindiğinde ise kkK-z3 tesinde okunan basınç farkı değerleri kkK-z1 testinde okunan değerlere göre daha yüksektir. Merdivenin üç zondan oluştuğu durumda alt zondaki havanın yukarı katlara serbestçe hareket edemediği ve bu nedenle alt zonda okunan basınç farkı değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Alt zonu iki farklı ortam olarak ele almak daha doğru bir yaklaşım olmaktadır. Tahliye (0) katında alt zonun ikiye ayrıldığı, bu katının üzerindeki katlarda basınç farkının, alt tarafa göre daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Alt zon, tahliye katının üstü ve aşağısı olmak üzere ikiye ayrıldığında, kkK-z3 testi için üst ve alt taraflar için ortalama değer sırasıyla 76.2 Pa ve 58.7 Pa; kkK-z1 için bu değerler sırasıyla 68.5 Pa ve 51.8 Pa'dır.



Şekil 4.16 : Üçüncü test grubunda, tüm kapılar kapalı durumda, merdivenin tek ve üç zondan oluştuğu testlerde merdiven-koridor arasındaki basınç farkı ölçümleri (kkK-z3: kritik kapılar kapalı – üç zon, kkK-z1: kritik kapılar kapalı – bir zon).

Şekil 4.17’de tek zon ve üç zon testleri kıyaslaması *kritik kapılar açık durumu* ve merdiven-koridor arası basınç farkı kullanılarak yapılmaktadır. Her iki testte de üst zon ve alt zonda birer katta merdiven ile koridor arasındaki kapılar açıktır. Üst zon ortalama basınç farkı değerleri kkA-z3 testi için 20.2 Pa, kkA-z1 testi için 26.5 Pa’dır.

Y-axis: kat (floor)

X-axis: ΔP (Pa)

Legend:

- kkA-z3 (solid line with black triangles)
- kkA-z1 (solid line with open triangles)

debi (m^3/h)

kkA-z3: 36715

kkA-z1: 37485

Labels:

- açık kapı (open door)
- ölçüm yok (no measurement)
- Kritik kapılar açık durumu (critical doors open situation)
- merdiven-koridor arası basınç farkı (pressure difference between stairs and corridor)
- orta zon (middle zone)

Merdivenin üç zondan oluştuğu testte orta zondaki hava, bariyerler nedeniyle üst zon veya alt zona doğru hareket edemediği için orta zondaki basınç farkı seviyesini arttırmaktadır. kkA-z1 testinde orta zon ve üst zondaki basınç farkı değerleri birbirine eşit mertebededir. Merdivende kapalı kapılarda istenilen 50 Pa değerinin daha fazla katta gerçekleştirilmesi için zonlamanın faydalı olduğu sonucuna varılmıştır.

87



5. CFD MODELLEME ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARI

CFD modelleme için, yangın araştırmalarında sıklıkla kullanılan FDS programı tercih edilmiştir. FDS, Amerikan NIST (National Institute of Standards and Technology) tarafından geliştirilmiş olup, ücretsiz kullanılabilir. FDS, türbülanslı akışı LES (Large Eddy Simulation) modelleme ile çözmektedir. FDS programı düşük Mach sayılarındaki akışlar için özelleşmiş olup bu yazılım ile zamana bağlı çözüm elde edilmektedir.

Bu çalışmada Özdilek River Plaza M3 merdiveninde yapılan kkA-yghY testinin FDS kullanılarak CFD modeli hazırlanmıştır. Elde edilen modelleme sonuçları, test ile örtüşmektedir. CFD modelleme ile test sırasında incelenemeyen parametrelerin etkileri incelenmiştir.

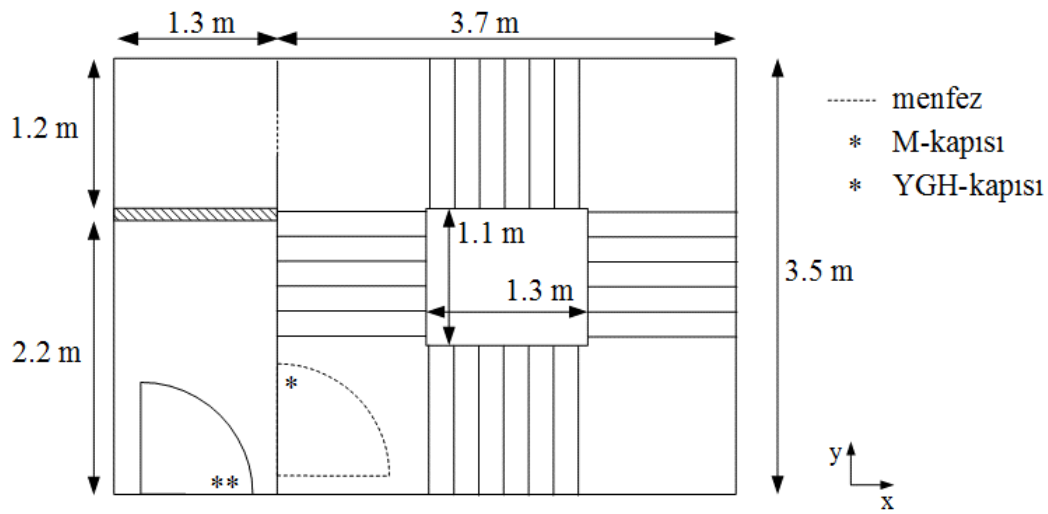
Bu bölümde öncelikle M3 merdiveninde yapılan kkA-yghY testinin modellemesi yer almakta, modellemede yapılan kabuller ve basitleştirmeler açıklanmaktadır. Model sonuçlarının grid yapısından bağımsızlığının araştırılması, hazırlanan model sonuçlarının test sonuçları ile kıyaslanması ve merdiven sıcaklığının zamana göre değişimi takip eden alt başlıklarda ele alınmaktadır.

5.1 Özdilek M3 merdiveni modeli

Ticari bir kar amacı gütmeyen ve akademik çalışmalarda yaygın olarak tercih edilen FDS programının bir arayüzü bulunmamaktadır. Bir metin belgesine FDS programınca tanımlanmış kodlar kullanılarak model geometrisi, ilk koşullar ve sınır koşulları, modelleme parametreleri ve istenilen çıktılar tanıtılmaktadır. Modelleme çalışmalarında “Dell Precision T 5610” isimli iş istasyonu kullanılmıştır. Bu iş istasyonunda 24 çekirdek ve 32 gigabyte önbellek (ram) bulunmakta ve Ubuntu 14.04 LTS işletim sistemi kuruludur. Bu çalışma kapsamında yapılan modellemelerde FDS 6.2.0 versiyonu kullanılmıştır.

5.1.1 Model geometrisi ve sınır koşulları

Oluşturulan model tüm binayı kapsamamakta, sadece merdiven yuvası, YGH ve basınçlandırma şaftını temsil eden üç hacimden oluşmaktadır. Aslına sadık olarak hazırlanan model geometrisi ve boyutları Şekil 5.1’de verilmektedir. FDS programı tarafından model sınırlarının dışı, çevre ortam olarak kabul edilmektedir. 40 katlı olarak hazırlanan modelde, bir kat yüksekliği 4 m olarak kabul edilmiştir ve toplam yükseklik 160 m’dir.



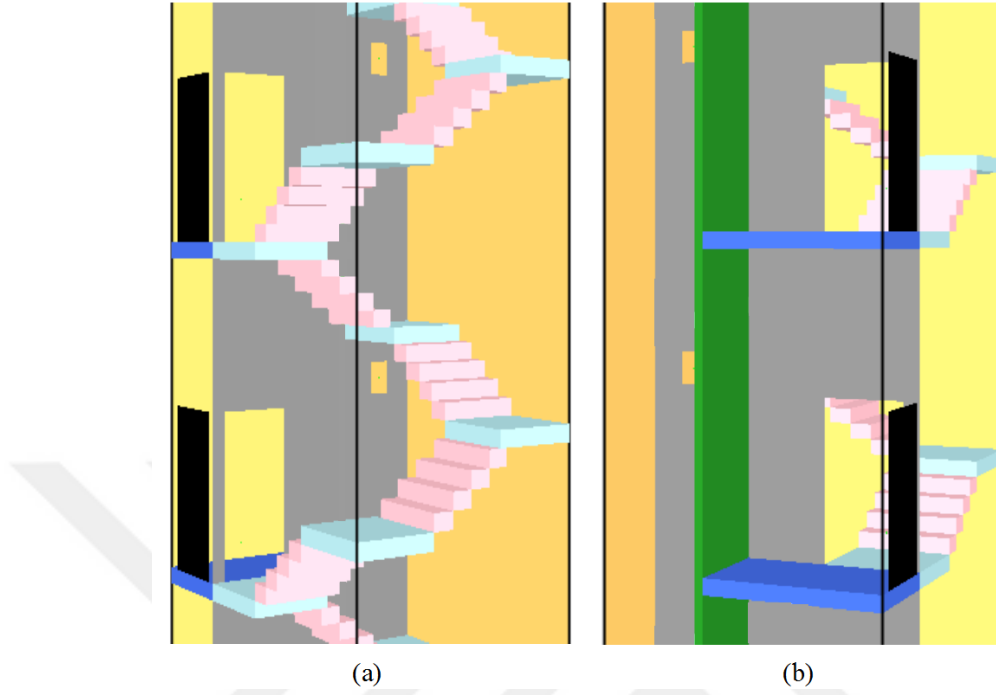
Şekil 5.1 : Modelin üstten görünüşü.

Şekil 5.2-a’da hazırlanan modelin merdiven tarafının görünüşü yer almaktadır. Şekilde merdiven hacmi gri renkli duvar ile basınçlandırma şaftı ve YGH hacimlerinden ayırmaktadır. Merdiven ve YGH sahanlıkları sırasıyla açık mavi ve koyu mavi renk ile gösterilmektedir. Şekil 5.2-b’de ise modelin YGH ve basınçlandırma şaftı tarafından görünüşü verilmektedir, basınçlandırma şaftı ve YGH hacimleri yeşil renkli duvar ile birbirinden ayrılmaktadır (şekilde sarı ve turuncu renk ile model sınırları gösterilmektedir).

kkA-yghY testinde merdiven ile YGH arasındaki M-kapısı açık durumdadır, açık durumda M-kapısını modelleyebilmek için her katta merdiven ve YGH hacimleri arasında kapı genişliği boyutunda (1m x 2m) açıklıklar yaratılmıştır. Bu açıklıklar Şekil 5.2’de gösterildiği gibi gri duvar üzerinde, açık mavi ve koyu mavi sahanlıklar arasında yer almaktadır.

Model üzerinde YGH-kapıları siyah alanlar ile belirtilmiştir (Şekil 5.2). FDS programı belirlenen bir yüzey üzerinde sızıntı alanı tanımlamaya olanak vermektedir. Bu sayede

1m x 2m boyutlarındaki YGH-kapısı yüzeyinde 0.01 m² boyutunda sızıntı alanı tanımlanmıştır. Modellemede sadece YGH-kapısından sızıntı olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 5.2 : Model geometrisi: (a) merdiven tarafının görünüşü, (b) basınçlandırma şaftı ve YGH tarafının görünüşü.

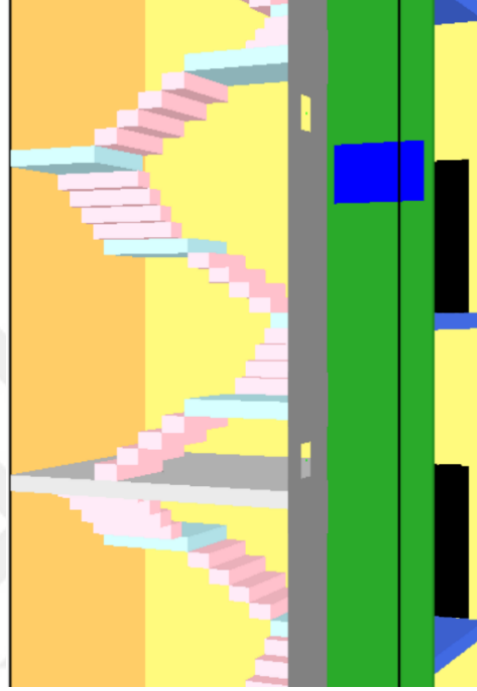
kkA-yghY testinde kritik kapılar açık olduğu için, model üzerinde kritik katlarda (32. kat ve tahliye katı) YGH hacmi ile dış ortam arasında, 1m x 2m boyutunda açıklıklar yaratılmıştır (açık olan bu kapıların modellenmesi, açık durumda olan M-kapısı modellenmesi ile aynı şekilde yapılmıştır).

Her katta merdivenlere taze hava beslendiği için, basınçlandırma şaftı ile merdiven hacimleri arasında menfezleri temsilen 0.3 m x 0.4 m boyutlarında açıklıklar yaratılmıştır (Bu açıklıklar Şekil 5.2’de gri duvar üzerindeki küçük boşluklar ile gösterilmektedir).

Şekil 5.3’te modelin diğer bir görünüşü yer almaktadır, bu görünüşte 20 ve 21. kat arasındaki zon ayırma duvarı ve basınçlandırma şaftına taze hava beslemesi gösterilmektedir. Saha testinde olduğu gibi modelde de merdiven yuvası üçe bölünmüştür, zon ayrımları Şekil 5.3’te açık gri renk ile gösterilen düz bir duvar ile yapılmıştır.

Basınçlandırma şaftına taze hava beslemesi için basınçlandırma şaftı duvarı (yeşil duvar) üzerine mavi yüzeyler tanımlanmış (Şekil 5.3) ve bu yüzeylerden

basınçlandırma şaftına doğru yönelen hacimsel debi değeri girilmiştir. Basınçlandırma şaftına hava beslemesi 5, 21 ve 34. katlarda yapılmaktadır ve kkA-yghY testinde merdivene beslenen toplam hava debisi 11244 m³/h olarak elde edilmiştir. Modelde üç adet besleme noktası özdeş olarak kabul edilmiş ve bir adet hava besleme yüzeyine toplam debinin üçte biri miktarda debi değeri tanımlanmıştır.



Şekil 5.3 : Model üzerinde 21 ve 22 katlar arasındaki yer alan zonlara ayrımı ve basınçlandırma şaftına hava besleyen yüzeyin görünüşü.

5.2 Grid Yapısından Bağımsızlığın Araştırılması

CFD çalışmalarında yapılması gereken bir uygulama elde edilen sayısal sonuçların, grid yapısından bağımsız olduğunun ispatlanmasıdır. FDS programı genellikle içerisinde yangın olan modeller için kullanılmakta ve literatürde FDS ile yapılan çalışmalarda grid yapısında yer alan hücrelerin boyutunun modeldeki yangından çıkan enerjiye göre belirlendiği ifade edilmektedir. Ancak bu çalışmada yangın modellemesi yapılmadığı için, farklı büyüklüklerde gridler(hücreler) kullanılarak farklı grid ağları oluşturulmuş ve sonuçların grid büyüklüğüne bağlı olmadığı bir modelin yaratılması hedeflenmiştir.

FDS programı, grid ağını oluşturan her bir elemanın en, boy ve yüksekliği birbirine eşit mertebede ve dikdörtgen prizma şeklinde oluşturulmasına izin vermektedir. Bu sebeple oluşturulan her bir grid yapısında yer alan elemanların en, boy ve yükseklik

oranları eşdeğerdir. Bu çalışmada dört farklı grid yapısı oluşturulmuştur, birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü grid yapılarındaki elemanların boyutları ise sırasıyla 0.4 m, 0.2 m, 0.1 m, 0.05 m'dir. Bu dört model dokümanın geri kalanında grid-0.4, grid-0.3, grid-0.2, grid-0.1 ve grid-0.05 olarak anılmaktadır.

kkA-yghY testinin yapıldığı gün, testlere başlanmadan önce merdiven iç ortam sıcaklığı 20°C, dış ortam sıcaklığı 13°C olarak ölçülmüştür. Grid yapısından bağımsızlığın araştırıldığı aşamada, çözüm sürelerini kısaltmak ve sistemdeki sürekliliğin kısa sürede sağlanması için başlangıç anında merdiven iç ortam sıcaklığının, dış ortam sıcaklığına eşit olduğu kabul edilmiş ve ikisi de 13°C olarak seçilmiştir. İç ortam sıcaklığını dış ortam sıcaklığına eş kabul etmek, küçük bir hatayı da beraberinde getirmektedir ancak çözüm sürelerini kısaltmak için bu hata göze alınmıştır.

FDS programı LES çözümü yaptığı için sonuçlar zamana bağlıdır, araştırılan durum ise sürekli rejimdedir. Modellerde sürekli rejimin sağlandığından emin olmak için tüm grid modellerinde (grid-0.05, grid-0.1, grid-0.2 ve grid-0.4) 1000 saniye için çözüm yapılmıştır. Kıyaslama parametresi olarak merdiven-dış ortam arasındaki basınç farkı seçilmiştir ve tüm grid modelleri çözümlerinde her 10 s sonunda, her kat için merdiven-koridor arası basınç farkı sonuç çıktısı olarak kaydedilmiştir. EK-C'de her bir grid modelinde, her kat için merdiven-dış ortam arası basınç farkının zamana göre değişimi verilmektedir.

Sistemin sürekli rejime girdiği zaman aralığını bulmak için, 1000 saniyelik çözüm süresi, 100 saniyelik aralıklara bölünmüş ve her bir 100 saniyenin ortalaması alınmıştır. 900-1000 saniye aralığında sürekli rejim şartının sağlanmış olduğu elde edildiğinden, her bir 100 saniyelik ortalamanın, son 100 saniyelik ortalamaya göre değişim yüzdesi aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır. Bu işlem her bir modelin her bir katı için tekrarlanmıştır.

$$\text{değişim yüzdesi} = \frac{(\text{araştırılan 100 saniyelik ortalama}) - (\text{son 100 saniyelik ortalama})}{(\text{son 100 saniyelik ortalama})} \quad (5.1)$$

Hazırlanan değişim yüzdesi grafiklerinde, ilgili 100 saniye aralığı için hangi katta maksimum değer olduğu belirlenmiştir. Tüm grid modelleri için, her bir zaman aralığında gözlemlenen maksimum değişim yüzdesi değeri Çizelge 5.1'de yer almaktadır.

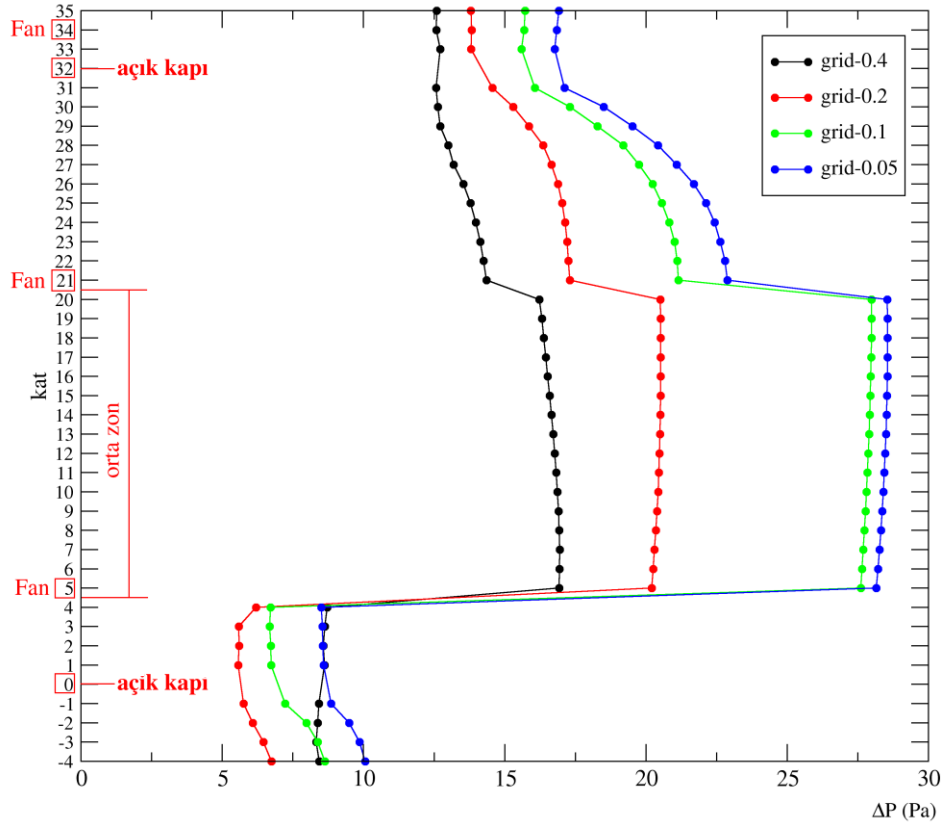
Çizelge 5.1’de, grid-0.4 ve grid-0.05 modellerinde 200-300 s aralığından itibaren değişim yüzdesinin %3’ün altına düştüğü görülmektedir. Grid-0.2 ve grid-0.1 modelleri için %3’ün altına düşüldüğü zaman aralığı 400-500 s aralığıdır. %3 değeri belirli bir kaynaktan elde edilmemiş olup, bu değer altında sistemin sürekli rejime girdiği kabulü yapılmıştır. Çalışmada kolaylık sağlaması açısından, tüm modellerde 400-500 s aralığından itibaren sistemin sürekli rejime girdiği kabul edilmiş ve 400-1000 s aralığındaki basınç farkı değerlerinin ortalaması alınmıştır.

Çizelge 5.1 : Her bir modelde, zaman aralıklarının, 900-1000 s zaman aralığına göre değişim yüzdesi.

Zaman aralığı (s)	900-1000 s aralığına göre değişim yüzdesi			
	grid-0.4	grid-0.2	grid-0.1	grid-0.05
0-100	15.7981	27.1324	30.8741	33.3049
100-200	0.7539	10.8497	11.9100	7.6291
200-300	2.3755	7.3914	5.5626	2.5875
300-400	1.1557	4.5160	3.2437	1.1219
400-500	0.7431	2.9142	2.4656	0.9907
500-600	1.1289	2.0867	2.7619	1.0947
600-700	1.6650	1.5580	2.5371	0.6461
700-800	0.8576	1.1990	1.1797	1.0271
800-900	1.2035	1.7681	1.3726	1.3129

Şekil 5.4’da grid araştırması için hazırlanan modellerin kıyaslaması verilmektedir. Bu grafik üzerinde grid-0.1 ile grid-0.05 modellerinin sonuçları arasındaki farkın az olduğu göze çarpmaktadır.

Yukarıdaki işleme benzer bir şekilde, her bir grid modelinin, bir sonraki grid modeli ile arasındaki değişim yüzdesi hesaplanmıştır ve bu işlem tüm katlar için tekrarlanmıştır. Grid-0.4 modeli ile grid-0.2 modeli arasındaki değişim yüzdesi, ortalama olarak %25 civarındadır. Grid-0.2 ile grid-0.1 modelleri arasındaki ortalama değişim yüzdesi %20’dir. Grid-0.1 ile grid-0.05 modelleri arasındaki ortalama değişim yüzdesi ise %8’dir. Grid-0.1 modelindeki ağ yapısı ile hazırlanan modelin sonuçlarının, ağ yapısından bağımsız olacağı sonucuna varılmıştır. Sayısal modelleme çalışmalarının geri kalan bölümünde hazırlanan modele 0.1 m boyutunda en, boy ve yükseklik oranına sahip elemanlardan oluşan ağ örgüsü kullanılmaktadır.



Şekil 5.4 : Farklı modellerin sonuçlarının kıyaslanması.

5.3 CFD Modelleme Çalışmalarının Sonuçları

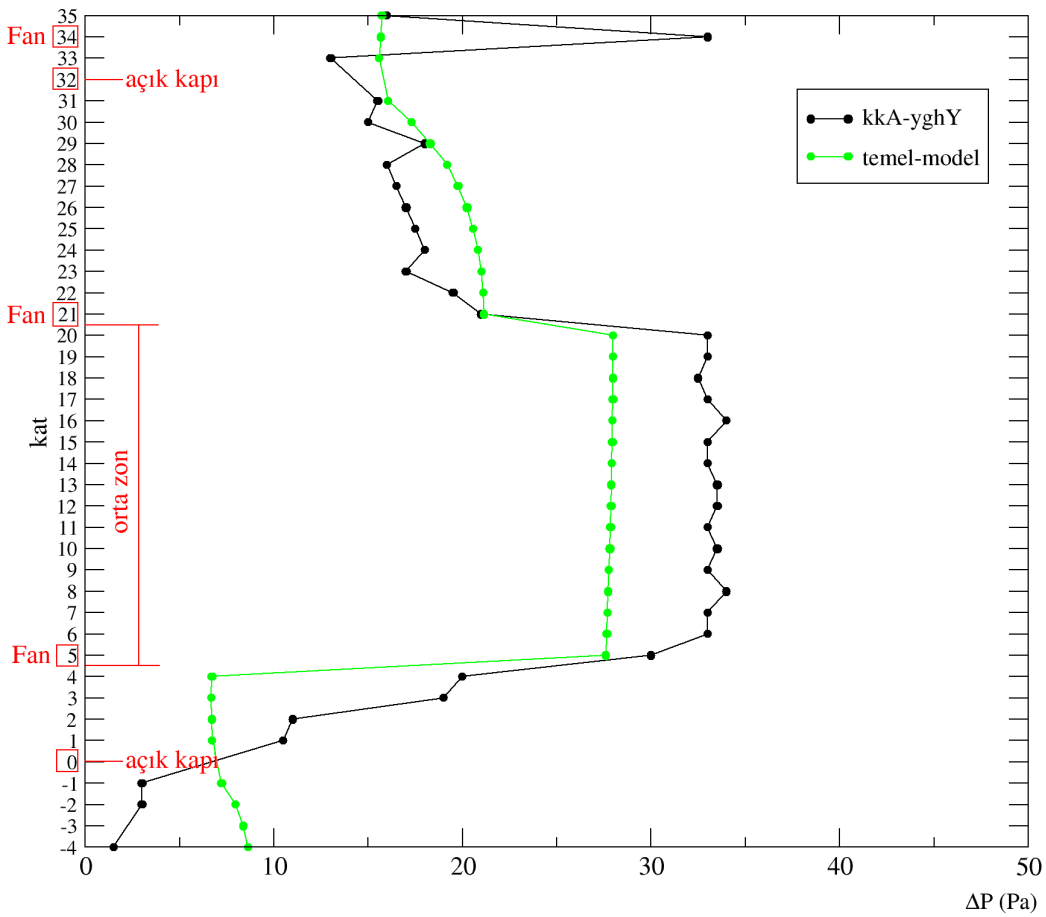
Sahada yapılan kkA-yghY testleri ile kıyaslama yapmak için temel-model ismi verilen bir model oluşturulmuştur. Bu modelin grid-0.1 modeli ile tek farkı, başlangıç anı için merdiven iç ortam sıcaklığının 20°C olarak tanımlanmış olmasıdır. Modellemede enerji denklemi çözüldüğü için, zamanın ilerlemesiyle merdiven içindeki sıcaklık düşmektedir. Temel-model ile 3600 saniyelik bir süre modellenmiş, bilgisayar ile 12 gün süresince çözüm yapılmıştır

YGH-etkisi test grubunun yapıldığı günde, kkA-yghY testi en son yapılan test olmuştur. Bir adet test yaklaşık olarak 1.5 saat sürdüğü ve merdiven içerisine koşullandırılmayan hava beslendiği için, bu test sırasında merdiven iç ortam sıcaklığının, dış ortam sıcaklığına yakın mertebede olacağı gözönüne alınmaktadır. Bu sebeple test ile temel-modelin kıyaslanmasında, modelin 3600 saniye sonunda verdiği sonuçlar kullanılmıştır.

Şekil 5.5'de, temel-model, kkA-yghY testi sonuçları kıyaslanmaktadır. Kıyaslamada model için merdiven-dış ortam arası basınç farkı, test için merdiven-koridor arası basınç farkı değerleri kullanılmıştır. Şekil 5.5 incelendiğinde alt zon hariç, diğer

zonlarda benzer karakteristikte basınç dağılımı elde edilmiştir. Üst zonda, her ikisinde de fanın bulunduğu 21 katından, kapının açık olduğu 32 katına kadar basınç farkının azaldığı gözlenmiştir. Testte lineer bir azalma gözlemlenirken, modellerde üstel bir azalma elde edilmiştir. Orta zonda, modelin ve testin eğri karakteristiği benzer olduğu gibi, aralarında ortalama 5 Pa değerinde bir fark bulunmaktadır.

Modellerde, binanın tümü yaratılamadığı için, merdiven oldukça ideal bir durumdadır ve tüm katlarda aynı sızıntı tanımlıdır. Gerçekte ise bodrum katların üzerinde podyum katlar yer almakta ve bu katlardaki sızıntılarının binanın geri kalanındaki sızıntılardan oldukça farklı olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple alt zonda model ile test arasında farklılıklar bulunduğu düşünülmektedir. FDS programı ile çok yüksek binalarda basınçlandırılan kaçış merdivenlerini modellemenin kabul edilebilir mertebede hata ile sonuçlar verdiği düşünülmektedir.



Şekil 5.5 : Model sonuçlarının test sonuçları ile kıyaslanması.

5.3.1 Baca Etkisinin Zamana Göre Değişimi

Baca etkisi, birçok kaynaktan merdiven basınçlandırma sistemlerine etkiyen en büyük kuvvet olarak ele alınmıştır ve çok yüksek binalarda baca etkisinin hava hareketi

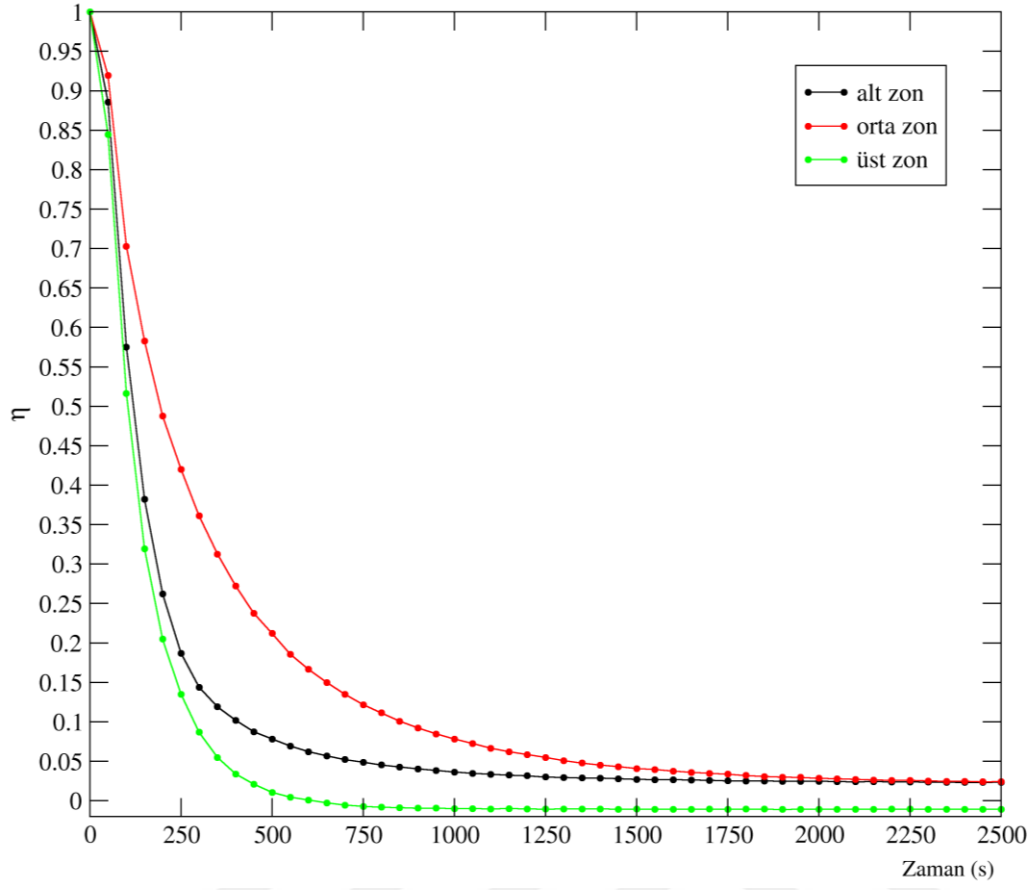
üzerine yaratacağı kuvvetin oldukça büyük olduğu matematiksel olarak ispatlanmıştır. Ancak Klote ve arkadaşlarının 2012 yılında yayınladığı *Handbook of smoke control engineering* kitabına [11] merdivene beslenen havanın koşullandırılmadığı ve merdivendeki hava sıcaklığının birkaç dakika içinde dış ortam sıcaklığına eşit olacağı belirtilmektedir.

Klote ve arkadaşları tasarım yapılırken, merdiven sıcaklığının bina sıcaklığına eşit kabul etmenin doğru bir yaklaşım olmayacağını, merdiven sıcaklığının denklem (5.2)'den elde edilmesi gerektiğini bildirmişlerdir [11]. Bu denklemde T_S , T_O ve T_B sırasıyla merdiven sıcaklığı, dış ortam sıcaklığı ve bina sıcaklığını ifade etmekte olup ve η boyutsuz ısı geçişi katsayısıdır.

$$T_S = T_O + \eta(T_B - T_O) \quad (5.2)$$

Handbook of smoke control engineering kitabına ısı geçişi katsayısı hakkında yeterli araştırma olmadığı belirtmiş 0.05 ile 0.15 arasında bir değer kabul edilebileceğini öngörmüşleridir [11]. Temel-model sonuçlarında çıktı olarak tüm katların sıcaklık değerleri de her bir 50 s sonunda kaydedilmiştir. Bu veriler kullanılarak her bir kat için, her bir 50 s sonunda ısı geçiş katsayısı (η) hesaplanmıştır. Alt zon, üst zon ve orta zonda yer alan katların ortalama η değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 5.6'da verilmektedir

Şekil 5.6 incelendiğinde, öncelikle üst zonda daha sonra sırasıyla alt ve orta zonda η değeri sıfır değerine yaklaşmaktadır. η değerinin 0.15'in altına inmesi ise alt, orta ve üst zonlarda sırasıyla 300, 650 ve 250 saniye sonunda gerçekleşmiştir. Bu sıralamaya açık kapıların ve fanların konumunun neden olduğu düşünülmektedir. Üst zonda iki katta (34. ve 21. katlarda) fan bulunmaktadır ve 32. kat kapısı açıktır, bu sebeple üst zonda daha fazla miktarda hava değişimi olmaktadır. Alt zonda yer alan tahliye (0) katında da kapı açık olduğu için, bu zonda da hava değişim miktarı fazladır. Diğer tesisat katı orta zonda yer alan 5. kattadır ancak bu zonda açık kapı olmadığı için, hava değişim miktarının az olduğu ve orta zondaki sıcaklığın dış ortam sıcaklığına düşmesi için gereken sürenin fazla olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.6 : Her bir zonda bulunan katların ortalama η değerlerinin zamana göre değişimi.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Birinci grup saha testlerinde tasarım yangın katının yeri araştırılmıştır. Aynı zon içinde bir kat yerine başka bir katın seçiminin basınç dağılımını çok değiştirmedeği görülmüştür. Tasarım yangın katının orta zon veya üst zonda yer alması arasında ise basınç dağılımı açısından farklılık mevcuttur. Aynı zon içerisindeki tüm katlarda merdiven ile kat koridoru arasındaki basınç farkı yaklaşık olarak sabit bir değerde elde edilmiş ancak açık kapı bulunmayan zonda ölçülen basınç farkı değerinin açık kapının olduğu diğer zondakinden daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Basınçlandırma debisi sabit tutularak yapılan birinci grup saha testlerinin sonuçlarına göre tasarım yangın katının üst zonda seçilmesi merdiven boyunca ortalama basınç farkı değerinin daha düşük çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenle ikinci ve üçüncü grup saha testlerinde tasarım yangın katını temsil eden açık iç kapının üst zondaki bir katta seçilmesi uygun görülmüştür. Yine birinci grup saha testlerinin sonuçlarına göre, üst zon boyunca hangi kapının açık olacağı basınç farkı dağılımına fazla etki etmediğinden, daha sonraki testlerde tasarım yangın katı olarak 32.kat seçilmiştir.

İkinci grup saha testlerinde, Türkiye’de yapı yüksekliği 51.5 m’yi geçen binalarda her katta merdiven girişinde bulunması zorunlu olan yangın güvenlik holünün etkisi araştırılmıştır. Basınçlandırma debisi sabit tutularak yapılan testlerde, YGH bulunduğu merdiven-koridor arasındaki basınç farkının iki katına çıktığı gözlenmiştir. Eğer bir zonun bir katında merdiven-koridor arası kapılar açık ise, YGH’nin bulunmasının etkisi bu zonda daha az olmakta ve bu zonda basınç farkı iki katına çıkmamaktadır. Fakat YGH bulunan binalarda koridordan merdivene erişmek için arka arkaya iki kapıdan geçilmesi gerektiğinden bu iki kapının aynı anda açık olma ihtimalinin az olduğu düşünülmektedir. Yangın güvenlik holünün merdiven-koridor arasındaki basınç farkını iki katına çıkarması, merdiven kapılarını açmak için uygulanması gereken kuvvetin artmasına ve bu kapıların açılmasının zorlaşmasına neden olabilmektedir. Bu sebeple BYKHY’de tanımlandığı gibi iki kapı arasındaki mesafe 1.8 m’den az olmamalıdır. Böylelikle katın ilk tahliye anındaki birkaç dakikalık yoğun kullanım süresi haricinde, aynı anda iki kapının açık olma ihtimali az

olacaktır. Ayrıca yüksek binalarda YGH tesis edilmesi, merdivenleri kullanacak güçte olmayan kişiler için bir sığınma alanı yaratmaktadır çünkü YGH içinde dolaylı yoldan basınçlandırma olmakta ve kattaki dumanın bu sığınma alanına girişi engellenmektedir.

Bu çalışma kapsamında yapılan saha testlerinde basınçlandırma fanları sabit devirde çalıştırıldıkları halde, basınçlandırma fanlarının devir sayısını ayarlayan frekans konvertörlerine bağlı fark basınç ölçer montajı ile ilgili bir yorum yapılması mümkündür. Ülkemizdeki çok yüksek bina merdiven basınçlandırma uygulamalarında, söz konusu basınç farkı ölçerler merdiven ile koridor arasındaki veya merdiven ile YGH arasındaki basınç farkını ölçmek üzere iki farklı şekilde yerleştirilebilmektedir. Bu çalışmada elde edilen saha testi sonuçlarına göre, yangın güvenlik holü ile merdiven yuvası arasındaki basınç farkının kattan kata çok farklı değerler alabildiği görülmüştür. Bu nedenle, basınç farkı ölçerlerin öncelikle merdiven yuvası ile kat koridoru arasındaki basıncı ölçecek şekilde monte edilmesi uygun olmaktadır. Bu çalışma kapsamında yapılan ikinci grup saha testi sonuçlarından hareket edildiğinde, basınç farkı ölçerin bir ucunun merdivene diğer ucunun ise yangın güvenlik holüne yerleştirildiği bir uygulamada, yukarıda önerilen montaj şekline kıyasla, basınçlandırma fanının devir sayısının artacağı ve merdiven ile kat koridoru arasındaki basınç farkı değerinin tüm kapılar kapalıyken yaklaşık iki katına, kritik kapılar açıkken ise yaklaşık 1.3 katına çıkacağı söylenebilir.

Üçüncü grup saha testlerinde merdiven yuvasını zonlara ayırmanın etkisi incelenmiştir. Merdiveni zonlara ayırma, baca etkisinin oluşturduğu olumsuz etkiye karşın merdiven yüksekliği boyunca istenilen limitler içinde basınçlandırmanın sağlanması için alınan bir tedbirdir. Bu grup testlerin yapıldığı tarihte iç ve dış ortam arasındaki sıcaklık farkı 3°C olması nedeniyle baca etkisi az olmasına rağmen, zonlara ayırmanın bodrum katlardaki basınçlandırma üzerinde pozitif etkisi olduğu gözlenmiştir. Yaklaşık olarak yüksekliği 100 m'yi geçen merdiven yuvalarında yapılması önerilen bu uygulamada, her birine ayrı birer basınçlandırma fanının hizmet verdiği basınçlandırma zonları, kendi içindeki basınç dağılımını diğer zonlardan bağımsız olarak sağlayabilmektedir. Zonlardan birinde bir kapı açıldığında sadece ilgili zonun basınçlandırma fanının devrinin ayarlanması yeterli olmaktadır. Saha testlerinin gerçekleştirildiği binada basınçlandırma şaftlarının zonlar arasında bölünme imkânı olmaması nedeniyle, üç ayrı basınç zonuna hizmet veren üç ayrı

basınçlandırma fanı, ortak bir basınçlandırma şaftını kullanmaktadır. Herbir basınçlandırma zonunun diğer zonlardan bağımsız olarak basınçlandırılabilmesi açısından, basınçlandırma şaftlarının zonlar arasında ayrılmasının daha yararlı olacağı düşünülmektedir.

Çok yüksek bir binada merdiven basınçlandırma sisteminin CFD ile modellenmesi de bu çalışmada yapılmıştır. FDS kullanılarak, ikinci grup testlerden birinin modellenmesi yapılmış ve modelleme ile elde edilen katlara göre basınç farkı değerleri, testte elde edilen değerler ile kıyaslanmıştır. Çok yüksek binalarda basınçlandırılan merdivenlerin FDS ile modellenmesinin kabul edilebilir mertebede yol gösterici olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen çözümler zamana bağlıdır ve saha testlerinde gerçekleştirilmesi oldukça güç olan baca etkisinin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Literatürde son yıllarda yapılan birkaç çalışmada basınçlandırma anında merdiven sıcaklığının giderek düştüğü, sistem tasarımı yapılırken bunun göz önüne alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Modelde, merdiven iç ortam sıcaklığı ile dış ortam sıcaklığı farkı 7°C'dir ve fanların çalışmaya başlamasından itibaren merdivende termodinamik dengenin sağlanması 10 dakikadan fazla sürede gerçekleşmiştir. Yangının çıktığı ilk dakikalardan itibaren çok kısa süre içerisinde basınçlandırma sisteminin devreye girmesi ve istenilen basınçlandırmayı sağlaması beklendiğinden, tasarımda merdiven iç ortam sıcaklığının bina iç ortam sıcaklığına eşit mertebelerde kabul edilmesinin yanlış bir yaklaşım olmadığı düşünülmektedir. Ancak yüksek binalarda kademeli tahliye planı uygulandığından, binanın tahliye edilmesi 10 dakikadan fazla sürecek ve ilerleyen aşamalarda itfaiye ekiplerinin aynı merdivenleri kullanarak söndürme ve kurtarma çalışmaları devam edecektir. Bu sebeple zamanla merdiven sıcaklığının dış ortam sıcaklığına eşitleneceği göz önüne alınmalıdır.

Sonuç olarak bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda aşağıda belirtilen sonuçlar tespit edilmiştir.

- 1- Aynı basınçlandırma zonu içerisindeki katlar arasında, yangın olan katın (merdiven ile koridor arasındaki kapıların açık olduğu katın) konumunun basınç dağılımını çok az değiştirdiği gözlenmiştir.
- 2- Basınçlandırma debisi sabit iken, merdiven girişinde yangın güvenlik holü bulunduğu, merdiven-koridor arasındaki basınç farkı tüm kapılar kapalıyken yaklaşık olarak iki katına çıkmakta, kritik kapılar açıkken ise yaklaşık %30 artmaktadır.

- 3- Katlarda bir yangın güvenlik holünden geçilerek ulaşılan merdivenler için, basınçlandırma fanının frekans konvertörüne sinyal gönderen basınç farkı ölçerler için uygun montaj şekli, sensörün bir ucunun merdiven yuvasına diğer ucunun ise kat koridoruna bağlanmasıdır. Basınç sensörünün merdiven yuvası ile YGH arasındaki basınç farkını ölçecek şekilde monte edildiği uygulamalarda, basınçlandırma fanının daha yüksek devirde çalışacağı bilinmekte ancak söz konusu basınç farkının kattan kata çok fazla değişebilmesi nedeniyle tavsiye edilmemektedir.
- 4- Merdiven yuvasını düşey zonlara ayrıldığında, herbir basınçlandırma zonunun diğer zonlardan bağımsız olarak basınçlandırılabilirdiği görülmüştür. Özellikle merdiven yüksekliği 100 m değerinin üzerine çıktığında, bağımsız basınçlandırma ihtiyacının artacağı düşünülmektedir.
- 5- Tasarımda kullanılan, merdiven sıcaklığının bina iç ortam sıcaklığına eşit mertebelerde kabul edilmesinin yanlış bir yaklaşım olmadığı görülmüştür. Ancak çok yüksek binalarda binada bulunan insanların tahliye edilmesi uzun zaman alacağından bu etkinin gözönüne alınması gerekir.

Bu çalışmada yapılan saha testleri ile belirli sayıda parametre ele alınabilmektedir. Çok yüksek binalardaki basınçlandırma sistemleriyle ilgili bundan sonra yapılabilecek çalışmalarda; merdiven basınçlandırma sistemlerinin daha detaylı incelenebilmesi için, merdivene değişken debide hava beslenmesi sırasında saha testleri yaparak, çeşitli parametrelerin etkilerinin zamana göre değişimi incelenebilir. Bu testler sırasında ölçümlerin de zamana bağlı olarak kaydedilmesi daha ayrıntılı değerlendirme yapılmasına olanak sağlayacaktır. Fanlardan gelen havanın basınçlandırma şaftına bağlandığı katlar ile zonlara ayırma katları arasındaki ilişkinin daha detaylı incelenmesi önerilmektedir. Bu inceleme için sayısal bir çalışma yapılması daha uygun olacaktır. Aynı zamanda basınçlandırma şaftının zonlara ayrılmasının basınç dağılımına etkisinin incelenmesi veya acil durum asansör kuyusunun merdiven basınçlandırma sistemine etkisi de ayrı birer araştırma konusu olarak ele alınabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Klote, J. H.** (1995). An overview of smoke control research, *ASHRAE Transactions*, 101(1), 979–990.
- [2] **12937 Sayılı Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik.** (2015). T. C. Resmi Gazete, 7401, 9 Temmuz 2015.
- [3] **BS EN** (2005). *Smoke and heat control systems. Specification for pressure differential systems* (BS EN 12101-6). London: BSI.
- [4] **BSI** (1998). *Fire precautions in the design, construction and use of buildings- Part 4: Code of practice for smoke control using pressure differentials* (BS 5588-4:1998). London: BSI.
- [5] **NFPA** (2012) *Standard for smoke control systems* (NFPA 92). Quincy, Massachusetts: NFPA.
- [6] **Lay, S.** (2014). Pressurization systems do not work & present a risk to life safety, *Case Studies in Fire Safety*, 1, 13–17.
- [7] **Ferreira, M. ve Cutonilli J.** (2008). Protecting the stair enclosure in tall buildings by stack effect, *CTBUH 8th Word Congress*, Dubai: March 3 – 5.
- [8] **Klote, J. H. ve Fothergill, J. W.** (1983). *Design of Smoke Control Systems for Buildings*. Atlanta, USA: Atlanta American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.
- [9] **Klote, J. H. ve Milke J. A.** (1992). *Design of Smoke Management Systems*. Atlanta, USA: ASHRAE.
- [10] **Klote, J. H. ve Milke J. A.** (2002). *Principles of Smoke Management*. Atlanta, USA: ASHRAE/SFPE.
- [11] **Klote, J. H., Ferreira, M. J., Kashef, A., Turnbull, P. G. ve Milke, J. A.** (2012). *Handbook of Smoke Control Engineering*. Atlanta, USA: ASHRAE.
- [12] **McGuire, J.** (1967). Smoke movement in buildings, *Fire Technology*, 3(3), 163–174.
- [13] **Tamura, G. T. ve Wilson, A.G.** (1967). Pressure differences caused by chimney effect in three buildings, *ASHRAE Transactions*, 73(2), II–1.
- [14] **Tamura, G. T.** (1969). Computer analysis of smoke movement in tall buildings, *ASHRAE Transactions*, 75(2), 81–92.
- [15] **Achakji, G.Y.** (1987). NRCC experimental fire tower for studies on smoke movement and smoke control in tall buildings (Internal Report No. 512). Canada : National Research Council Canada.
- [16] **Tamura, G. T. ve Klote, J. H.** (1989). Experimental fire tower studies on mechanical pressurization on control smoke movement caused by fire pressures, *Fire Safety Science*, 2, 761–769.

- [17] **Tamura, G. T. ve Klote, J. H.** (1990). Experimental fire tower studies on controlling smoke movement caused by stack and wind action, *Characterization and Toxicity of Smoke* (ASTM STP 1082), 165–177.
- [18] **Tamura, G. T. ve Manley, P. J.** (1985). Smoke movement studies in a 15-story hotel, *ASHRAE Transactions*, 91(2B), 1237–1253.
- [19] **Tamura, G. T. ve Wilson, A. G.** (1967). Building pressures caused by chimney action and mechanical ventilation, *ASHRAE Transactions*, 73(2), 1–12.
- [20] **Tamura, G.T., McGuire, J. ve Wilson, A.** (1970). Air-handling systems for control of smoke movement, *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Symposium Bulletin "Fire Hazards in Buildings"*, (pp 14-19). California, January 19-22.
- [21] **Klote, J. H. ve Tamura, G. T.** (1986). Elevator piston effect and the smoke problem, *Fire Safety Journal*, 11(2), 227–233.
- [22] **Mowrer, F. W.** (2009). Driving forces for smoke movement and management, *Fire Technology*, 45(2), 147–162.
- [23] **De Cicco, P. R., Cresci, R. J. ve Correale, W. H.** (1972). Report of Fire Tests, Analyses and Evaluation of Stair Pressurization and Exhaust in High-rise Office Buildings. Polytechnic Institute of Brooklyn, Center for Urban Environmental Studies: Baywood Publishing Company.
- [24] **Shaw, C. Y. ve Tamura, G. T.** (1976). Design of a stairshaft pressurization system for tall buildings, *ASHRAE Journal*, 18(2), 29–33.
- [25] **Tamura, G. T.** (1989). Stair pressurization systems for smoke control: design considerations, *ASHRAE Transactions*, 95(2), 184–192.
- [26] **Tamura, G. T.** (1991). Determination of critical air velocities to prevent smoke backflow at a stair door opening on the fire floor, *ASHRAE Transactions*, 97(2), 627–633.
- [27] **Tamura, G. T.** (1974). Experimental studies on pressurized escape routes, *ASHRAE Transactions*, 80(2), 224–237.
- [28] **Tamura, G. T. ve Shaw, C. Y.** (1976). Air leakage data for the design of elevator and stair shaft pressurization systems, *ASHRAE Transactions*, 82(2), 179–190.
- [29] **Tamura, G. T. ve Shaw, C. Y.** (1978). Experimental studies of mechanical venting for smoke control in tall office buildings, *ASHRAE Transactions*, 84(1), 54–71.
- [30] **Shaw, C. Y. ve Tamura, G. T.** (1976). Studies on exterior wall air tightness and air infiltration of tall buildings, *ASHRAE Transactions*, 82(1), 122–134.
- [31] **Shaw, C. Y., Reardon, J. T. ve Cheung, M. S.** (1993). Changes in air leakage levels of six Canadian office buildings, *ASHRAE Journal*, 35, 34–34.
- [32] **Tamura, G. T.** (1990). Field tests of stair pressurization systems with overpressure relief, *ASHRAE Transactions*, 96(1), 951–958.
- [33] **Tamura, G. T.** (1990). Fire tower tests of stair pressurization systems with overpressure relief, *ASHRAE Transactions*, 96(2), 373–383.

- [34] **Chow, W. K. ve Lam, L.W.** (1993). 3710 Evaluation of a Staircase Pressurization System, *ASHRAE Transactions-American Society of Heating Refrigerating Airconditioning Engin*, 99(2), 194–199.
- [35] **Bellido, C., Quiroz, A., Panizo, A., ve Torero, J. L.** (2009). Performance assessment of pressurized stairs in high rise buildings. *Fire technology*, 45(2), 189–200.
- [36] **He, Y.** (1999). Effect of Pressurisation and Smoke Management Systems on Fire Growth and Smoke Movement in a Multi-Storey Building, *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, 1(3), 148–155.
- [37] **Tamura, G. T.** (1978). Experimental studies on exterior wall venting for smoke control in tall office buildings, *ASHRAE Transactions*, 84(2), 204–215.
- [38] **Tamura, G. T.** (1992). Assessment of stair pressurization systems for smoke control, *ASHRAE Transactions*, 98(1), 1–7.
- [39] **Wang, Y. ve Gao, F.** (2004). Tests of Stairwell Pressurization Systems for Smoke Control in a High-Rise Building, *ASHRAE Transactions*, 110(1), 185–193.
- [40] **Kim, J. Y., Shin, H. J., Ahn, C. S., Kim, J. S. ve Joo, S. H.** (2014). Development of the separate air-supply type of pressurization smoke control system for the stairwells of high-rise buildings in Korea, *Open Journal of Fluid Dynamics*, 4(03), 251.
- [41] **Chung, K. C.** (1999). Evaluation of smoke exhaustion performance of a vestibule within tall buildings in Taiwan, *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, 1(2), 71–80.
- [42] **Klote, J. H.** (1993). Design of smoke control systems for areas of refuge (NISTIR 5132). Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, Fire Research Laboratory.
- [43] **Klote, J. H.** (2012). New handbook address smoke control challenges, *Consulting-Specifying Engineer*, 49(10), 32–35.
- [44] **Shi, W. X., Ji, J., Sun, J. H., Lo, S. M., Li, L. J. ve Yuan, X. Y.** (2014). Influence of staircase ventilation state on the airflow and heat transfer of the heated room on the middle floor of high rise building, *Applied Energy*, 119, 173-180.
- [45] **Klote, J. H. ve Forney, G. P.** (1993). Zone fire modeling with natural building flows and a zero order shaft model (NISTIR 5251). Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.
- [46] **Feustel, H. E.** (1999). COMIS—an international multizone air-flow and contaminant transport model. *Energy and Buildings*, 30(1), 3–18.
- [47] **Sander, D. ve Tamura, G. T.** (1978). Simulation of air movement in multi-storey buildings, *Proceedings 2nd Symposium on Use of Computers for Thermal Environmental Engineering* (pp. 165–171), Paris.
- [48] **Klote, J. H.** (1981). A computer program for analysis of pressurized stairwells and pressurized elevator shafts (NISTIR 80-2157). Washington: Center for Fire Research National Engineering Laboratory,

- [49] **Walton, G. N.** (1989). AIRNET: a computer program for building airflow network modeling. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.
- [50] **Walton, G. N. ve Dols, W. S.** (2005). *CONTAM user guide and program documentation*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.
- [51] **Jo, J. H., Lim, J. H., Song, S. Y., Yeo, M. S. ve Kim, K. W.** (2007). Characteristics of pressure distribution and solution to the problems caused by stack effect in high-rise residential buildings, *Building and Environment*, 42(1), 263–277.
- [52] **Klote, J. H.** (2004). Tenability and Open Doors in Pressurized Stairwells, *ASHRAE Transactions*, 110(1), 613–637
- [53] **Miller, R. S. ve Beasley, D.** (2008). *On Smoke Control by Pressurization in Stairwells and Elevator Shafts*. Retrieved from http://www.w.airplenum.com/smoke_control_by_pressurization_paper.pdf
- [54] **Miller, R. S. ve Beasley, D.** (2009). On stairwell and elevator shaft pressurization for smoke control in tall buildings, *Building and Environment*, 44(6), 1306–1317.
- [55] **Bowers, D. C., Ellison, J. R., Beasley, D. E. ve Miller, R. S.** (2010). Numerical study of elevator and stairwell pressurization systems using detailed building models, *8th international conference on performance-based codes and fire safety design methods, Society of Fire Protection Engineers*, (pp. 16–18). Sweden : Lund, June 16-18.
- [56] **Hadjisophocleous, G. ve Jia, Q.** (2009). Comparison of FDS prediction of smoke movement in a 10-storey building with experimental data, *Fire Technology*, 45(2), 163–177.
- [57] **Klote, J. H.** (2011). Stairwell Smoke Control by Ventilation, *ASHRAE Transactions*, 117(1), 478–485.
- [58] **Chow, W. K.** (1998). Numerical studies on recent large high-rise building fire, *Journal of Architectural Engineering*, 4(2), 65–74.
- [59] **Long-Fei, H. O. U., Ming, L. I., Wu-yuan, C. U. I. ve Yu-chen, L. I. U.** (2011). Numerical simulation and analysis of on-building high-rise building fires, *Procedia Engineering*, 11, 127–134.
- [60] **Mercier, G. P. ve Jaluria, Y.** (1999). Fire-induced flow of smoke and hot gases in open vertical enclosures, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 19(2), 77–84.
- [61] **Cao, L. ve Guo, Y.** (2003). Large eddy simulation of smoke movement in a shaft, *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, 5(4), 152–157.
- [62] **Xiao, G., Tu, J. ve Yeoh, G.** (2008). Numerical simulation of the migration of hot gases in open vertical shaft, *Applied Thermal Engineering*, 28(5), 478–487.

- [63] **Qin, T., Guo, Y. ve Lin, W.** (2003). Numerical simulation of layer effect in a stairwell, *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, 5(4), 108–113.
- [64] **Qin, T. X., Guo, Y. C., Chan, C. K., Lau, K. S. ve Lin, W. Y.** (2005). Numerical simulation of fire-induced flow through a stairwell, *Building and Environment*, 40(2), 183–194.
- [65] **Q., Hu, L. H., Li, Y. Z., Huo, R., Chow, W. K., Fong, N. K., ... ve Li, K. Y.** (2009). Studies on smoke movement in stairwell induced by an adjacent compartment fire, *Applied Thermal Engineering*, 29(13), 2757–2765.
- [66] **Black, W. Z.** (2009). Pressurization of floors to improve life safety during a high rise fire, *ASHRAE Transactions*, 115(2), 278–289.
- [67] **Black, W. Z.** (2009). Smoke movement in elevator shafts during a high-rise structural fire. *Fire Safety Journal*, 44(2), 168–182.
- [68] **Black, W. Z.** (2009). Use of air-handling equipment to manage smoke movement during a high-rise fire, *ASHRAE Transactions*, 115(1), 165–181.
- [69] **Black, W. Z.** (2010). COSMO—Software for designing smoke control systems in high-rise buildings, *Fire Safety Journal*, 45(6-8), 337–348.
- [70] **Black, W. Z.** (2011). Computer modeling of stairwell pressurization to control smoke movement during a high-rise fire, *ASHRAE Transactions*, 117(1), 786–800.
- [71] **Balik, G.** (2015). Basınçlandırma Sistemleri, *TTMD Duman Kontrolü ve Yangın Senaryoları* (pp. 17–31). Kapadokya, Ekim 15-18.
- [72] **DiNenno, P. J., Drysdale, D., Beyler, C. L., Walton, W. D., Custer, R. L. P., Hall, J. R. ve Watts, J. M.** (2008). *SFPE handbook of fire protection engineering*, Massachusetts: SFPE ve NFPA.
- [73] **Tennekes, H. ve Lumley, J. L.** (1972). *A first course in turbulence*. Massachusetts: MIT press.
- [74] **Kundu, P. K. ve Cohen, L. M.** (1990). *Fluid Mechanics*. California: Academic Press.
- [75] **Davidson, L.** (2001). *An introduction to turbulence models*. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology.
- [76] **Pope, S. B.** (2001). *Turbulent flows*. Cambridge University Press.
- [77] **McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C. ve Overholt, K.** (2013). *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model*. NIST special publication, 1018.
- [78] **Hobson, P. ve Stewart, L.** (1972). Pressurisation of escape routes in buildings. Borehamwood : Fire Research Station.
- [79] **Klote, J. H.** (1995). Design of smoke control systems for elevator fire evacuation including wind effects. *Proceedings of the Second Symposium on Elevators, Fire, and Accessibility* (pp. 59–77). , Baltimore, MD, April 19-21.



EKLER

EK A: Belirsizlik Analizinde Kullanılan Denklemler ve Değerler

EK B: Saha Testi Ölçümleri

EK C: Her Bir Grid Modelinde Her Katta Merdiven-Dış Ortam Arası Basınç Farkının
Zamana Göre Değişimi



EK A

Tüm kapılar kapalı durumu testleri için korunum yöntemiyle yapılan debi hesabının belirsizlik analizinde kullanılan denklemler ve değerler;

$$w_V = \sum_{i=1}^{40} \left(\sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial A} w_{A_e} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial (\Delta P)} w_{(\Delta P)} \right)^2} \right)_i \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{\partial V}{\partial A_e} = 0.839 \sqrt{\Delta P} \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{\partial V}{\partial (\Delta P)} = 0.4195 A_e \frac{1}{\sqrt{\Delta P}} \quad (\text{A.3})$$

$$A_e = 0.00707 \pm 0.0025 \text{ m}^2$$

$$\Delta P = P_{\text{ölçülen}} \pm 1 \text{ Pa}$$

Kritik kapılar açık durumu testleri için korunum yöntemiyle yapılan debi hesabının belirsizlik analizinde kullanılan denklemler ve değerler;

$$w_V = \left[\sum_{i=1}^{38} \left(\left(\frac{\partial V}{\partial A} w_{A_e} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial (\Delta P)} w_{(\Delta P)} \right)^2 \right)_i + \left(\frac{\partial V}{\partial V_1} w_{V_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial A_1} w_{A_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial V_2} w_{V_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial A_2} w_{A_2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{\partial V}{\partial A_e} = 0.839 \sqrt{\Delta P} \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{\partial V}{\partial (\Delta P)} = 0.4195 A \frac{1}{\sqrt{\Delta P}} \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{\partial V}{\partial V} = A \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{\partial V}{\partial A} = V \quad (\text{A.8})$$

$$A_e = 0.00707 \pm 0.0025 \text{ m}^2$$

$$\Delta P = P_{\text{ölçülen}} \pm 1 \text{ Pa}$$

$$V = V_{\text{ölçülen}} \pm 0.5 \text{ m/s}$$

$$A = 2 \pm 0.2 \text{ m}^2$$

EK B**Çizelge B.1 : Birinci grup saha testi basınç farkı ölçümleri (Pa).**

Kat No.	KK-33 Testi		KK-22 Testi		KK-6 Testi		KK Testi	
	M. - YGH	M. - Koridor	M. - YGH	M. - Koridor	M. - YGH	M. - Koridor	M. - YGH	M. - Koridor
35	11.7	27.4	11	22.5	41	86	71.5	153
34	20	50	20	47.5	51	114	84	181
33	Açık	Açık	6.9	13	52.5	77.5	98	148
32	13.5	17.5	10	12.5	64	81	116	149
31	13.5	20	9.8	14.5	58	82	108	151
30	13	20	10	12.5	57	81	106	149.5
29	11.5	22.5	8.5	15.5	51.5	83	93.5	152
28	10.5	21	8	14	45.5	81.5	81	150
27	10	21	7.5	15	42	83	74.5	151
26	15	21.5	9.5	14	58.5	81.5	109.5	152
25	12.3	21.5	9	15.5	47.5	83.5	85	152
24	10	22	6.3	14.5	40	83	75	153
23	18	23	12	15.5	68	85.5	123	152.5
22	7.4	23.5	Açık	Açık	31	85	52.5	155
21	-25	29	-33.5	19.5	39	91	33	159
20	33	52	33.5	51	14	21.5	85.5	126
19	27	49	27.5	51	11.5	22	70	127
18	32	51	32.5	51	13	22	82	127.5
17	33	52	34.5	51.5	13	21.5	84	126.5
16	37	50	37	51	15	21.5	93	127.5
15	32	53	32	50	13	21	80	127.5
14	35	52.5	36	51.5	15	21.5	88.5	127.5
13	38	53	38	52	16	22	95	128
12	33	52	33	51.5	13	21	82	127.5
11	38	52	38	52	15	21	92	127
10	35.5	51.5	36	52	14	20.5	90	127.5
9	32.5	51	34	52	13	20	85	127.5
8	39	52	39	52	15	21	96	129
7	35.5	51	37.5	53	13	19.5	91.5	127
6	36	52	38	53	Açık	Açık	90	129
5	39	48.5	38.5	49	11.5	17	104	124
4	16	33	18.5	35	15	28.5	22.5	42.5
3	20.5	29	21.5	30.5	18	25.5	26.5	40
2	9.5	13	11	14.5	7.5	10	17	22
1	0	13.5	0	15	0	11.5	0	23.5
0	Açık	Açık	Açık	Açık	Açık	Açık	Açık	Açık
-1	0	0	1.5	2	0	0	5.5	9
-2	0	1	2	3	0	0	4.5	9
-3	ö.e.	ö.e.	ö.e.	ö.e.	ö.e.	ö.e.	ö.e.	ö.e.
-4	1	4	1.5	3	0	0	5	9

Çizelge B.2 : Birinci grup saha testi açık kapılarda hız ölçümleri (m/s).

KK-33 Testi					
0 katı YGH-kapısı			33 katı YGH-kapısı		
2.3	2.9	1.6	2	2.72	2.83
2.64	2.68	2.3	2.47	2.22	2.34
2.39	2.8	1.39	2.12	2.03	2.18
2.19	2.8	0.74	1.7	2.01	2.38
2.43	2.8	0.59	1.8	2.37	2.07
KK-22 Testi					
0 katı YGH-kapısı			22 katı YGH-kapısı		
2	2.63	2.38	2.99	2.81	2.66
2.18	2.33	2.65	2.05	2.53	2.74
2.29	2.28	2.39	2.04	2.4	2.58
1.8	2.51	2.46	2.05	2.38	2.52
1.48	2.07	2.19	2.34	2.58	2.62
KK-22 Testi					
0 katı YGH-kapısı			6 katı YGH-kapısı		
1.2	2.15	2.47	3.09	2.83	2.66
0.5	1.79	2.19	2.93	2.58	2.92
0.6	1.9	2.2	2.78	2.71	2.87
1.56	1.64	1.76	2.76	2.35	2.92
1.1	1.53	1.74	1.7	3.02	2.7
KK Testi					
0 katı YGH-kapısı					
3.4	3.3		3.2		
3.11	3.22		3.4		
0.56	3.14		3.28		
2.2	2.7		3		
1.57	2.63		2.86		

Çizelge B.3 : İkinci grup saha testi basınç farkı ölçümleri (Pa).

Kat No.	kkK-yghV		kkK-yghY		kkA-yghV		kkA-yghY	
	M. - YGH	M. - Koridor	M. - YGH	M. - Koridor	M. - YGH	M. - Koridor	M. - YGH	M. - Koridor
35	23	65	-	31	5	16	-	16
34	24	66	-	42	5	13	-	33
33	49	73	-	31	12	19	-	13
32	56	75	-	32	Açık	Açık	-	Açık
31	52.5	74	-	32.5	14	20	-	15.5
30	53	76	-	33.5	17	24	-	15
29	47	78	-	36	12	24.5	-	18
28	42	77	-	33.5	14	26	-	16
27	38	77	-	35	13.5	24.5	-	16.5
26	56	77.5	-	35	16	25	-	17
25	45	78	-	35.5	17	25.5	-	17.5
24	36	78	-	36	13	25	-	18
23	62.5	79	-	36	23	30	-	17
22	30	80.5	-	38	10	26.5	-	19.5
21	15	82	-	38.5	-21	28	-	21
20	53	79	-	35.5	33	50	-	33
19	42	80	-	35	29	51	-	33
18	51.5	80	-	35	34	51	-	32.5
17	52	81	-	35.5	31.5	51	-	33
16	59	82	-	36	39	53	-	34
15	51	82	-	36.5	32.5	51.5	-	33
14	59	81.5	-	37	37	52	-	33
13	60	82	-	38	39	54.5	-	33.5
12	53	80	-	37	35	53	-	33.5
11	60	83.5	-	38	40	54.5	-	33
10	27	83	-	37	40.5	55	-	33.5
9	55	83	-	37	38	54	-	33
8	61	83	-	38	40.5	54.5	-	34
7	58.5	82	-	38	36.5	52	-	33
6	55.5	83	-	37	34.5	52	-	33
5	66	81	-	35	41.5	49	-	30
4	49.5	90	-	45.5	14.5	24	-	20
3	62	89	-	44	18.5	23	-	19
2	63	79	-	39	11.5	14	-	11
1	68	82.5	-	38	5	16	-	10.5
0	42	81	-	36	Açık	Açık	-	Açık
-1	48	69	-	25	2.5	4	-	3
-2	49	69	-	28	2	3	-	3
-3	ö.e.	ö.e.	ö.e.	ö.e.	ö.e.	ö.e.	ö.e.	ö.e.
-4	50	67	-	27.5	0	2	-	1.5

Çizelge B.4 : İkinci grup saha testi açık kapılarda hız ölçümleri (m/s).

kkA-yghV Testi					
0 katı YGH-kapısı			32 katı YGH-kapısı		
2.8	3.3	2.91	2.62	2.81	2.84
2.97	2.96	3.08	2.42	3.13	2.3
2.4	3	1	2.2	2.61	1.84
2.57	3	0.48	2.1	2.55	3.19
2.75	2.93	1	2	2.35	3
kkA-yghY Testi					
0 katı YGH-kapısı			32 katı YGH-kapısı		
2.5	2.8	2.5	2.7	2.7	2.6
2.09	2.5	1.9	2.24	2.65	2.4
2.14	2.41	2.5	2.38	2.35	2.42
1.98	2.62	0.7	2.52	2.71	1.08
2.2	2.54	0.4	1.57	2.95	0.9

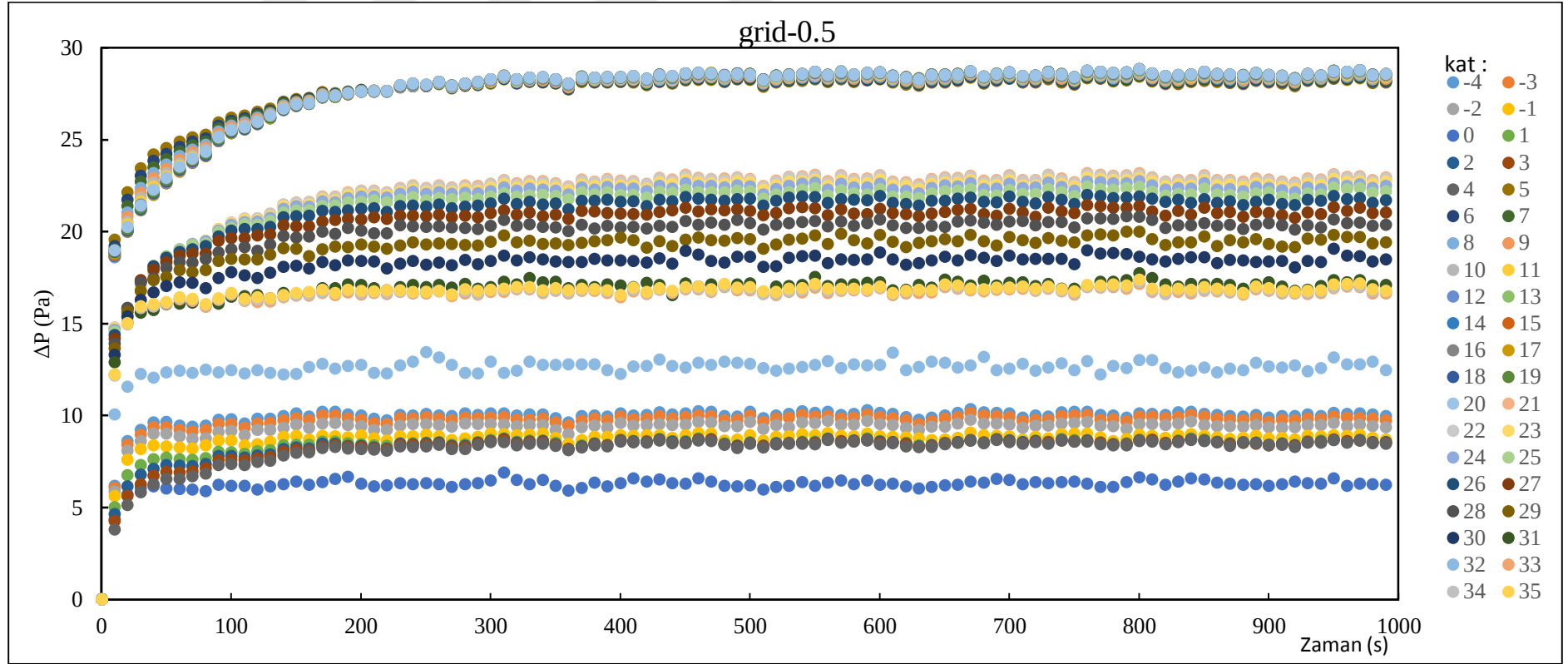
Çizelge B.5 : Üçüncü grup saha testi basınç farkı ölçümleri (Pa).

Kat No.	kkK-z3 Testi		kkK-z1 Testi		kkA-z3 Testi		kkA-z1 Testi	
	M. - YGH	M. - Koridor	M. - YGH	M. - Koridor	M. - YGH	M. - Koridor	M. - YGH	M. - Koridor
35	29.5	81	32	85.5	7.5	24.5	9.5	28.5
34	34	108	36	113	13	51	14	54
33	49	74	52	78	9	14	12	18
32	57	75	60.5	79	Açık	Açık	Açık	Açık
31	59	74.5	62	78	11.5	16	15.5	20
30	65	92	68.5	97	25	36.5	28	41
29	47	77	50	82	10	21	13	27
28	42	76	45	80.5	10	18	14	25
27	38	76	40	80.5	9.5	19	13	26
26	53.5	75	57	81	13.5	19.5	18.5	26
25	44	75.5	47	82	12.5	20.5	16	27.5
24	33.5	76	36	82	8	20.5	12	28
23	61	75.5	66	83.5	17	22	23	29
22	28	78.5	30	84	8	22.5	11	31
21	14	79.5	16	85	-28	24.5	-12	33
20	52.5	77	54.5	81	34	50	20.5	30
19	41.5	77	45	82	28	51	16.5	31
18	51	77	52	82	32.5	50	20	31
17	51	77	54.5	82	31.5	50	19.5	31
16	57	78	60	81	37	50.5	24	33
15	49	78	52	81	31.5	50.5	20.5	32
14	49.5	79	52	82.5	34	51	20	30
13	58.5	79	62	83	37	51	22.5	31
12	51	78	53	82	31	50	19	31
11	57	78.5	59	82	36	50	23	32
10	56	80	57	82	35	49	22	31
9	23	78	55	82	32	50.5	21	31
8	59	79.5	61.5	83.5	37	50	24	33
7	57	80	60	84	36	50	21.5	32.5
6	54	82	57	84	34	49.5	22	32
5	63	79	64	81	35	40	24	29.5
4	47	86	42.5	78.5	14	27	15.5	28
3	58	84	53	77	18	26	17.5	25
2	57	71	48	61	11.5	14	9	11.5
1	60.5	71.5	53	63	12	14.5	10	12.5
0	37.5	68.5	34	63	Açık	Açık	Açık	Açık
-1	40.5	57.5	35	50	2.5	4	1	2.5
-2	40.5	59.5	36	53	3.5	5.5	2.5	3.5
-3	ö.e.	ö.e.	ö.e.	ö.e.	ö.e.	ö.e.	ö.e.	ö.e.
-4	39.5	59	35.5	52.5	3	6	1.5	4

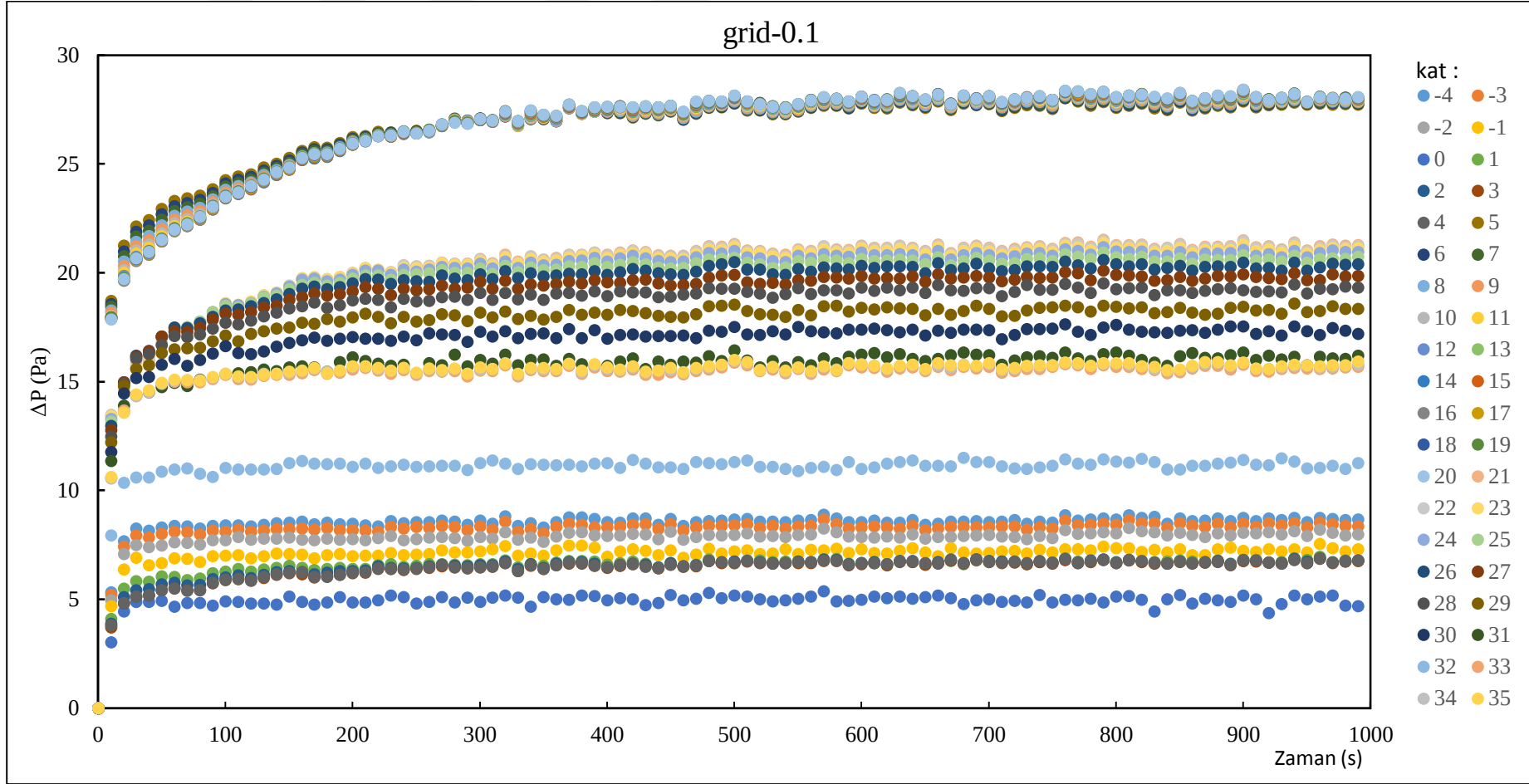
Çizelge B.6 : Üçüncü grup saha testi açık kapılarda hız ölçümleri (m/s).

kkA-z3 Testi					
0 katı YGH-kapısı			katı YGH-kapısı		
2.6	3.3	3.2	2.7	3	2.3
2.5	2.8	2.8	2	2.7	0.7
3	2.7	0.5	2.5	3	1
2.7	3.1	1	1.8	3	0.5
2.7	3.1	0.5	2.1	2.5	1
kkA-z1 Testi					
0 katı YGH-kapısı			katı YGH-kapısı		
2.3	2.5	2.28	3	3.4	2.4
2.1	2.74	2	2.9	3.2	2.5
2.37	2.8	0.8	2.8	3.2	0.6
2.44	2.75	1.14	2.9	3.5	1
2.38	2.66	0.5	2.5	3.5	0.5

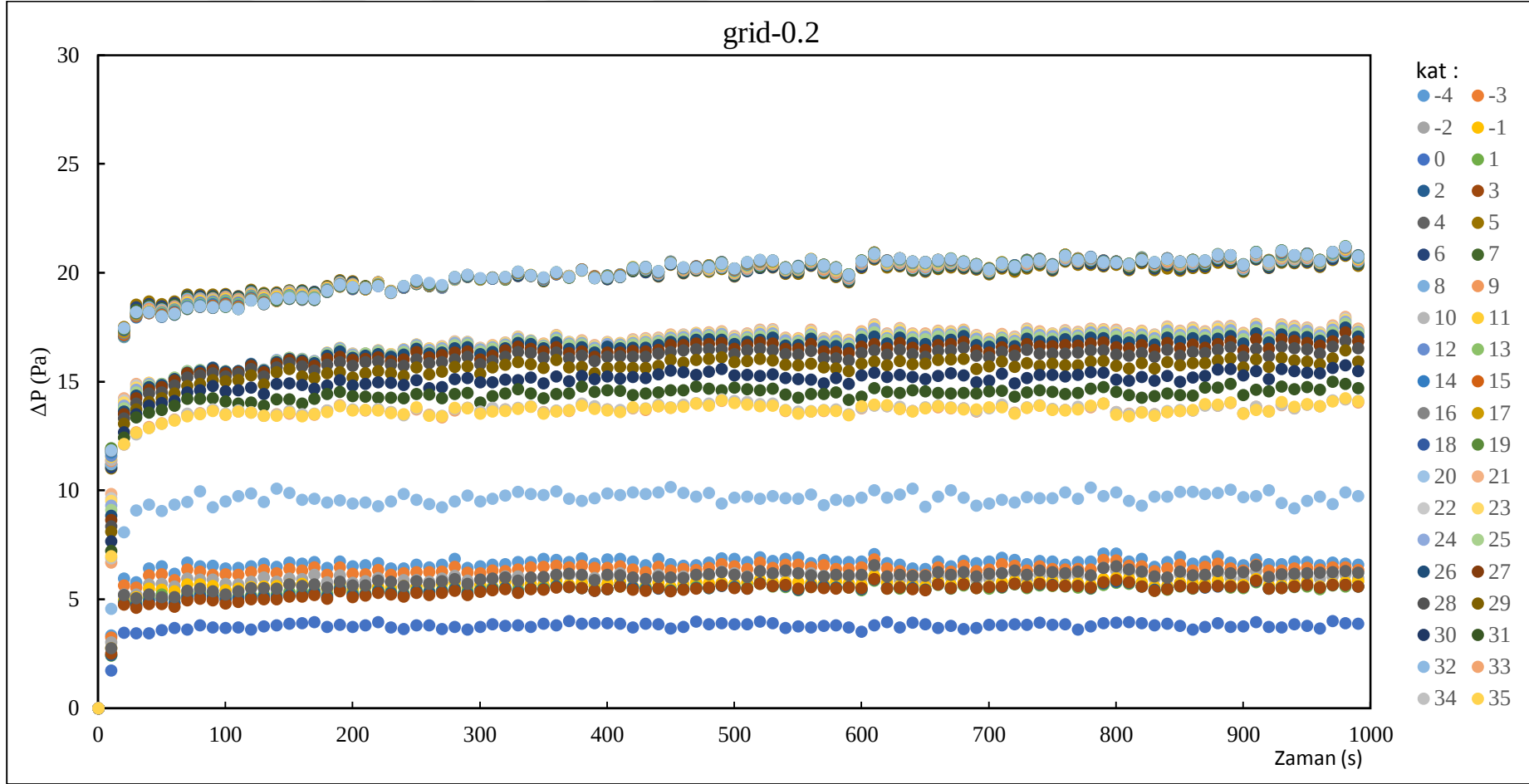
EK-C



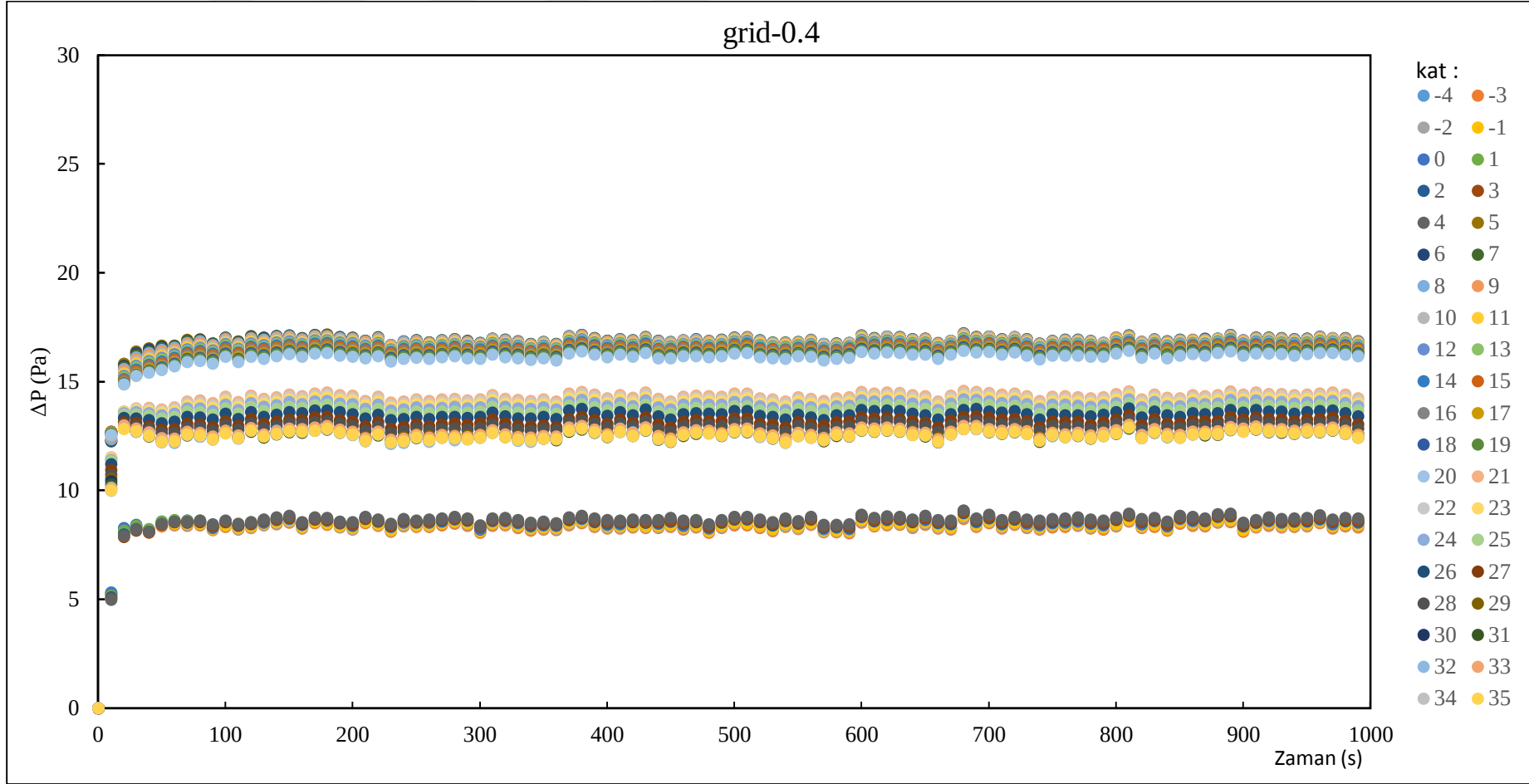
Şekil C.1 : Grid-0.05 modelinde her bir kat için merdiven-dış ortam arası basınç farkı değerlerinin zamana göre değişimi.



Şekil C.2 : Grid-0.1 modelinde her bir kat için merdiven-dış ortam arası basınç farkı değerlerinin zamana göre değişimi.



Şekil C.3 : Grid-0.2 modelinde her bir kat için merdiven-dış ortam arası basınç farkı değerlerinin zamana göre değişimi.



Şekil C.4 : Grid-0.4 modelinde her bir kat için merdiven-dış ortam arası basınç farkı değerlerinin zamana göre değişimi.

ÖZGEÇMİŞ



Ad- Soyad : Büşra Hepgüzel Açıkayol
Doğum Tarihi ve Yeri : 1984 – Eskişehir
E-posta : busra.hepguzel@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2006, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2009, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isı-Akışkan Yüksek Lisans Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Fakültesi - Araştırma Görevlisi (2007 – 2016)
- Vehbi Koç Vakfı Bursiyeri (2013)

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

- **Acıkayol, B.H.**, Balık, G., Kilic, A., 2016. Experimental Investigation of the Effect of Fire Protection Lobby on Stair Pressurization System in a High-Rise Building, *Fire Technology*, 1-17.
- **Hepgüzel B.**, 2014. Numerical and Experimental Investigation of Pressurization System in a High-Rise Building with Stairwell Compartmentation. *The 2nd Asia Conference of International Building Performance Simulation Association*, November 28-29, 2014 Nagoya, Japan.
- **Hepgüzel B.**, 2013. Aşırı Basınç Tahliye Menfezinin Merdiven Basınçlandırma Sistemleri Üzerindeki Etkisi, *TTMD* 87, 39-43.
- **Hepgüzel B.**, 2013. The Effect of Using Relief Damper in Staircase Pressurization as a Part of Positive Ventilation Systems. *7th Mediterranean Congress of Climatization*, October 3-4, 2013, Istanbul Turkey.

