



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



BİNA KABUĞU HAVA SIZDIRMAZLIĞININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI: EĞİTİM BİNASI ÖRNEKLERİ

Yüksek Lisans Tezi

Erman ÇOĞAL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir

2021

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**BİNA KABUĞU HAVA SIZDIRMAZLIĞININ
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI: EĞİTİM
BİNASI ÖRNEKLERİ**

Erman ÇOĞAL

Danışman: Prof. Dr. Türkan GÖKSAL ÖZBALTA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir
2021

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Bina Kabuğu Hava Sızdırmazlığının Deneysel Olarak Araştırılması: Eğitim Binası Örnekleri” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

05/ 08/ 2021

Erman ÇOĞAL

ÖZET**BİNA KABUĞU HAVA SIZDIRMAZLIĞININ
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI: EĞİTİM BİNASI
ÖRNEKLERİ**

ÇOĞAL, Erman

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Türkan GÖKSAL ÖZBALTA

Ağustos 2021, 131 sayfa

Enerji tüketiminde önemli bir paya sahip olan binalarda enerjinin yoğun olarak kaybedildiği alanlardan biri de bina kabuğudur. Bina kabuğu hava sızdırmazlığı performansı, enerjinin verimli kullanılması ve iç mekan hava kalitesinin artırılması açısından önem taşımaktadır. Bu bağlamda son yıllarda enerji verimliliği çalışmaları paralelinde hava sızdırmazlığı konusundaki araştırmalar artmış olup çeşitli ülkeler sızdırmazlık standartları kapsamında sınır değerlerini belirlemişlerdir. Ülkemizde ise TS 825 Isı Yalıtım Standardında konutlar için sızdırmazlık sınır değerleri yer almaktadır.

Çalışmada Ege Üniversitesi ve Balıkesir Üniversitesi'ne ait eğitim binalarında öğretim elemanları ofisleri, derslikler ve laboratuvar amaçlı kullanılan mekânların Blower Door Test ile hava sızdırmazlık ölçümleri yapılmış, termal kamera ile olası hava kaçakları ve ısı köprüleri gözlenmiştir. Deneysel çalışma sonucu hava değişim oranları (n_{50}) $0,95 \text{ h}^{-1}$ ile $28,19 \text{ h}^{-1}$ değerleri arasında tespit edilmiştir. Ölçüm sonuçları Türkiye (TS 825), Pasif Ev Standardı, Birleşik Krallık ve Fransa ülkelerine ait standartlar ile karşılaştırılmıştır. Deneysel ölçüm yapılan mekanlara ait hava sızdırmazlık değerlerinin Pasif Ev Standardına ($0,6 \text{ h}^{-1}$) uygun olmadığı görülmüştür. Bazı eğitim binalarından elde edilen ölçüm sonuçlarının TS 825 standart sınır değerlerini karşılamadığı saptanmıştır.

Sonuç olarak hava sızdırmazlık ölçümü yapılan mekanların %58'i Türkiye (TS 825), %64'ü Fransa ve %79'unun Birleşik Krallık standardına (ATTMA TSL) uygun olduğu tespit edilmiştir. Ölçümler esnasında hava sızdırmazlık performansının yetersiz olduğu mekanlarda özellikle doğramalarda hava kaçakları

ile ısı köprülerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular enerji verimliliği ve iç mekân konforu açısından ülkemizde de sızdırmazlık konusuna verilen önemin artırılması, yasal düzenlemelerin iyileştirilerek etkin bir şekilde uygulanması ve farklı bina tiplerine göre sızdırmazlık sınır değerlerinin belirlenmesinin gerekliliğini göstermektedir.

Anahtar sözcükler: Hava Sızdırmazlığı, Blower Door Test, Bina Kabuğu, Binalarda Enerji Verimliliği.



ABSTRACT**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF BUILDING ENVELOPE
AIRTIGHTNESS: EDUCATION BUILDING
EXAMPLES**

COGAL, Erman

MSc in Civil Eng.

Supervisor: Prof. Dr. Türkan GÖKSAL ÖZBALTA

August 2021, 131 pages

Buildings have a significant role in energy consumption, and building envelope is one of the areas in buildings, where energy is lost intensively. Building envelope air tightness performance is crucial in efficient use of energy and increasing indoor air quality. In this context, number of studies on airtightness have increased in recent years in parallel with energy efficiency studies, and various countries have determined limit values within the scope of airtightness standards. In our country, airtightness limit values for residences are included in the TS 825 Thermal Insulation Standard.

In this study, air tightness measurements were made with the Blower Door Test in the instructors offices, classrooms and the spaces used for laboratory purposes in the education buildings of Ege University and Balıkesir University, possible air leakage and thermal bridges were observed with a thermal camera. As a result of the experimental study, air change rates (n_{50}) were determined between 0.95 h^{-1} and 28.19 h^{-1} values. The measurement results were compared with the standards of Turkey (TS 825), Passive House Standard, United Kingdom and France. It has been observed that the airtightness values of the places where experimental measurements were made do not comply with the Passive House Standard (0.6 h^{-1}). It was determined that the measurement results obtained from some education buildings did not meet the TS 825 standard limit values.

As a result, it has been determined that 58% of the airtightness measurement spaces are in compliance with Turkey (TS 825), 64% with France and 79% the UK standard (ATTMA TSL). It was noticed during the measurements that thermal

bridges occurred in spaces where air tightness performance is insufficient, particularly joinery. The findings reveal that from energy efficiency and indoor comfort perspective, it is of paramount importance in Turkey to increase awareness on airtightness, improve and implement legal regulations, and determine airtightness limit values based on different building types.

Anahtar sözcükler: Airtightness, Blower Door Test, Building Envelope, Energy Efficiency in Buildings.



ÖNSÖZ

Tez çalışmasının sızdırmazlık konusunda literatüre farklı bina tipleri açısından yeni örnekler katması ve geliştirilmesi gerekli olan sızdırmazlık sınır değerlerinin belirlenmesine ışık tutması amaçlanmıştır. Bu kapsamda İzmir ve Balıkesir illerinde bulunan Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ve Makine Mühendisliği, Balıkesir Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi binalarında bulunan örnek mekanlar seçilmiş olup, elde edilen mimari projelerden mekanlara ilişkin gerekli alan bilgileri kaydedilerek ölçüm yapmaya hazır hale getirilmiştir. Deneysel çalışma için hazırlanan mekanlarda Blower Door Test ile hava sızdırmazlık ölçümleri yapılarak, hava sızdırmazlık göstergeleri elde edilmiştir. Elde edilen hava sızdırmazlık göstergeleri farklı ülke standartlarında bulunan sızdırmazlık sınır değerleri ile kıyaslanmıştır. Ayrıca test sırasında ısı köprüleri ve hava kaçağı bölgeleri termal kamera ile görüntülenmiştir.

İZMİR

05/08/2021

Erman ÇOĞAL



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvii
TABLolar DİZİNİ	xxiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxvii
1.GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Tezin Kapsamı	2
1.3. Tezin Yöntemi	3
1.4. Literatür Taraması	6
2.BİNALARDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE BİNA KABUĞU	14
2.1.Binalarda Enerji Verimliliği	15
2.1.1. Avrupa Birliği Ülkeleri Enerji Verimliliği Politikaları	19
2.1.2. Ülkemizde Enerji Verimliliği Politikaları	22
2.1.3. Pasif Binalarda Enerji Verimliliği	25
2.2. Enerji Verimliliğinde Bina Kabuğunun Rolü ve Sızdırmazlık	32

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devam)

3. SIZDIRMAZLIK	35
3.1.Genel Sızdırmazlık Sorunları.....	36
3.1.1. Isı Sorunları.....	37
3.1.2. Nem Sorunları.....	37
3.1.3. Ses Sorunları	37
3.1.4. Yangın Güvenliği.....	38
3.2. Hava Sızdırmazlığının Enerji Verimliliğine Etkisi.....	39
3.3. Hava Sızdırmazlığının İnsan Sağlığına Etkisi	40
3.4. Hava Sızdırmazlık Ölçümleri.....	42
3.4.1. Modelleme Yöntemleri	42
3.4.2. Deneysel (Ölçüm) Yöntemler	44
3.4.2.1. Termal Kızılötesi Görüntüleme Yöntemi	45
3.4.2.2. İzleyici Gaz Testi	46
3.4.2.3. Nabız Testi	47
3.4.2.4. Blower Door Test.....	49
3.5. Sızdırmazlık Göstergeleri	52
3.6. Sızdırmazlık Standartları.....	53
3.6.1. Pasif Ev Standardı.....	53

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devam)

3.6.2. Fransa Sızdırmazlık Sınır Değerleri	54
3.6.3. Birleşik Krallık Standartları.....	54
3.6.4. Diğer Avrupa Ülkeleri	56
3.6.5. Türkiye TS 825 Standardı.....	58
4. MATERYAL VE METOT	59
4.1. Alan Çalışmasına İlişkin Veriler	59
4.1.1. Alan Çalışmasına İlişkin Veriler – Eğitim Binası Örnekleri	59
4.1.1.1. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Bina Bilgileri.....	59
4.1.1.2. Ege Üniversitesi İnşaat-Makine Mühendisliği Bina Bilgileri	68
4.1.2. İklimsel Veriler	74
4.1.3. Minneapolis Blower Door Test Cihazı	81
4.1.4. Termal Kamera	82
4.2. Metodoloji.....	83
5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	89
5.1.Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Blower Door Test Bulguları.....	89
5.1.1. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Ofisler.....	89
5.1.2. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Derslikler.....	95
5.2. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ve Makine Mühendisliği Bölümü Binaları Bulguları	99

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devam)

5.2.1. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Binası Derslikleri Blower Door Test Ölçüm Sonuçları	99
5.2.2. Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Binası Derslikleri Blower Door Test Ölçüm Sonuçları	103
5.3. Mekanların Hacim Büyüklüğü- Sızdırmazlık Değerlendirmesi	106
5.4. Cephe Kuruluşu.....	108
5.5. Doğrama Tipi	109
6.SONUÇLAR	111
KAYNAKLAR DİZİNİ	115
TEŞEKKÜR.....	129
ÖZGEÇMİŞ	130

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Tezin Kavramsal İlerleyiş Şeması	3
1.2 Tezin Kavramsal İlerleyişi.....	5
2.1 1800 yılından günümüze kadar atmosfere salınan CO ₂ miktarı	15
2.2 Dünya Nihai Enerji Tüketimi Sektörel Dağılımının Yıllara göre Değişimi.	16
2.3 2018 Yılı Dünya Nihai Enerji Tüketiminin Sektörel Dağılımı	17
2.4 Geçmişten Günümüze Binaların Enerji Tüketimindeki Değişim.....	18
2.5 Mevcut Bina, Düşük Enerjili Bina ve Pasif Binalara Doğru Isıtma Enerjisi Tüketimi.....	19
2.6 2018 Yılı Avrupa Nihai Enerji Tüketiminin Sektörel Dağılımı	20
2.7 2018 Yılı Ülkemizde Nihai Enerji Tüketiminin Sektörlere Göre Dağılımı	23
2.8 Pasif Ev Tasarım İlkeleri (Bulut 2016).....	27
2.9 Riedberg İlkokulu Avludan Görünüş – Batı Cephesi	27
2.10 Riedberg İlkokulu Zemin Kat Planı.....	28
2.11 St. Florian Anaokulu Ön Cephe Görünümü	30
2.12 St. Florain Anaokulu Mimari Planı	30
2.13 St. Florian Anaokulu Kuzeye Yönelik İç Mekan Perspektifi	31
2.14 St. Florian İç Mekan Bitkilendirilmesi	32
2.15 Bina Kabuğunda Meydana Gelen Isı Geçişleri	33

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Bina Kabuğu Hava Sızıntı Bölgeleri.....	35
3.2 Bina Kabuğu Hava Sızıntı Bölgelerinin Dağılımı	36
3.3 Prototip darbe üretim ünitesi.....	48
3.4 Blower Door Testi Negatif Basınçlandırma.....	50
3.5 Pasif Ev Kesitinde Blower Door Testi Gösterimi	50
3.6 İç-Dış Ortam Basınç Farkı ve V_{50} görselleştirmesi	52
4.1 Balıkesir Üniversitesi Mimarlık ve Mühendislik Fakülteleri Google Uydu Görüntüsü.....	59
4.2 Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi ile Mühendislik Fakültesi Binası Genel Görünüş	60
4.3 Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi ölçüm yapılan ofisler 5. kat planı	63
4.4 Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi ölçüm yapılan ofisler 7. kat planı	63
4.5 Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi ölçüm yapılan Ofis 1, Kat Planı	64
4.6 Balıkesir Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi Ölçüm yapılan mekanlar B 201, B 202, Laboratuvar ve Ofis 2, 2. Kat Planı.....	65
4.7 Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fak. B 201, B 202, Laboratuvar ve Ofis-2 Planları	66
4.8. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Ölçüm Yapılan Mimarlık Stüdyosu, 3. Kat Planı.....	67

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.9 Ege Üniversitesi İnşaat ve Makine Mühendisliği Bölüm Binaları Google Uydu Görüntüsü.....	68
4.10 Ege Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü Giriş Cephesi - Kuzey Görünüşü ..	68
4.11 Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Binası Giriş Cephesi - Doğu Görünüşü.....	69
4.12 Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü 1. Kat Planı, Ölçüm Yapılan Derslik 104.....	71
4.13 Ege Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü 2. Kat Planı, Ölçüm Yapılan Derslikler 201,202 ve 204	72
4.14 Ege Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü 3. Kat Planı, Ölçüm Yapılan Derslikler 301, 302, 304 ve 309.....	72
4.15 Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü 1. Kat Planı, 104 ve 112 Nolu Derslik.....	73
4.16 Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü 2. Kat Planı, 201 ve 202 Nolu Derslik.....	73
4.17 Köppen-Geiger Dünya İklim Sınıflandırması	74
4.18 Köppen–Geiger Türkiye İklim Sınıflandırması.....	75
4.19 Balıkesir İli Aylık Ortalama Rüzgâr Hızları.....	77
4.20 Balıkesir İli Rüzgâr Yönü ve Şiddeti.....	77
4.21 İzmir İli Aylık Ortalama Rüzgâr Hızları	80
4.22 İzmir İli Aylık Ortalama Rüzgâr Hızları	80

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.23 Tek Fanlı Blower Door Sistemi	81
4.24 Blower Door Test Cihazına ait Elemanlar	82
4.25 Blower Door Test Ünitesi Kurulum Aşamaları	84
4.26 TECTITE Program Bilgi Giriş Ekranı	85
4.27 TECTITE Program Bilgi Giriş Ekranı	85
4.28 TECTITE Program Bilgi Giriş Ekranı	86
4.29 Kızılötesi Termal Kamera ile Görüntüleme.....	86
4.30 Numune Alma İşleminde Test Grafiği Görüntüsü.....	87
4.31 Test Sonunda Elde Edilen Grafik.....	87
4.32 Ölçüm Sonucu BDT Sızdırmazlık Test Raporu, BAUN 704.....	88
4.33 Ölçüm Anında BDT Fan basıncı Değerleri, BAUN 704	88
5.1 BAUN Mimarlık Fakültesi Öğretim Elemanları Ofislere ait Hava Değişim Oranları	93
5.2 BAUN Mimarlık Fakültesi Öğretim Elemanları Ofislerine ait Hava Değişim Oranlarının, Pasif Ev ve Fransa Sızdırmazlık Sınır Değerleri ile karşılaştırılması	94
5.3 Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Öğretim Elemanları Ofislerine ait Hava Geçirgenlik Değerleri ve Birleşik Krallık Sızdırmazlık Sınır Değerleri	95
5.4 BAUN Mimarlık Fakültesi Dersliklerine ait Hava Değişim Oranları (n50)	97

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.5 BAUN Mimarlık Fakültesi Dersliklerine ait n50 Değerlerinin Pasif Ev Standardı ve Fransa Standardı ile Karşılaştırılması.....	98
5.6 Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dersliklerine ait q50 Değerlerinin Birleşik Krallık Standardı ile Karşılaştırılması.....	99
5.7 Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Binasına ait Hava Değişim Oranları.....	102
5.8 Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Binasına ait n50 Değerlerinin Pasif Ev Standardı ve Fransa Standardı ile Karşılaştırılması	102
5.9 Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Binası Dersliklere ait q50 Değerlerinin Birleşik Krallık Standardı ile Karşılaştırılması	103
5.10 Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Binasına ait Hava Değişim Oranları.....	105
5.11 Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Binasına ait n ₅₀ Değerlerinin Pasif Ev Standardı ve Fransa Standardı ile Karşılaştırılması	105
5.12 Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Binası Dersliklere ait q50 Değerlerinin Birleşik Krallık Standardı ile Karşılaştırılması	106
5.13 Hava Değişim Oranlarının Hacim Büyüklüğüne Göre Sınıflandırması	107
5.14 Hava Değişim Oranlarının Hacim Büyüklüğüne Göre İncelenmesi	107
5.15 BAUN öğretim elemanları ofislerinin hava değişim oranları.....	108
5.16 BAUN öğretim elemanları ofislerin hava değişim oranları.....	109
5.17 BAUN Mimarlık Fakültesi Öğretim Görevlisi Ofisleri Sızdırmazlık Değerleri	110

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)ŞekilSayfa

5.18 BAUN Mimarlık Fakültesi Mekânların Sızdırmazlık Değerleri.....110



TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Sızdırmazlık Konusunu Ele Alan Çalışmalar	12
2.1 Ülkemizde binalarda enerji verimliliği ile ilgili başlıca yasa yönetmelik ve standartlar	24
2.2 Riedberg İlkokuluna ait Malzeme Özellikleri ve U-Değerleri	28
2.3 Riedberg İlkokulunun Spor Salonu Hariç Enerji Parametreleri ve Pasif Ev Standart değerleri.....	29
3.1 İç Ortam Hava Kirleticileri ve Emisyon Kaynakları	41
3.2 Sızdırmazlık Göstergeleri	52
3.3 Fransa Sızdırmazlık Sınır Değerleri	52
3.4 Birleşik Krallık ATTMA TSL1 Standardı Konutlar için Hava Geçirgenliği Sınır Değerleri	52
3.5 Birleşik Krallık ATTMA TSL2 Standardı Konut Dışı Binalar için Hava Geçirgenliği Sınır Değerleri	52
3.6 Diğer Avrupa Ülkeleri Konut ve Konut Dışı Binaların Sızdırmazlık Sınır Değerleri	52
3.7 TS 825'e göre Türkiye'deki Binalarda Sızdırmazlık Sınır Değerleri.....	52
4.1 Balıkesir Üniversitesi Mimarlık-Mühendislik Fakültesi Yapı Elemanları Malzeme Bileşenleri	61
4.2 Balıkesir Üniversitesi Ölçüm Yapılan Mekanların Boyutsal Özellikleri	62
4.3 Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ve Makine Mühendisliği Bölümü binalarına ait yapı elemanları malzeme bileşenleri	70

TABLÖLAR DİZİNİ (devam)

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
4.4 Ege Üniversitesi Ölçüm Yapılan Mekanların Boyutsal Özellikleri.....	71
4.5 1938-2019 yılları arası Balıkesir ili İklimsel Veriler	76
4.6 1938-2019 Yılları Arası İzmir İline Ait İklimsel Veriler.....	79
4.7 Ölçümlerde kullanılan Testo 875 Termal Kamera Teknik Özellikleri	83
5.1 BAUN Mimarlık Fakültesi Ofislere ait Test Bulguları.....	89
5.2 BAUN Mimarlık Fakültesi Ofislerinde Yapılan Blower Door Ölçümlerinde Elde Edilen Bulgular ve Görüntüler.....	90
5.3 BAUN Mimarlık Fakültesi Ofislerinde Yapılan Blower Door Ölçümlerinde Elde Edilen Bulgular ve Görüntüler.....	91
5.4 BAUN Mimarlık Fakültesi Ofislerinde Yapılan Blower Door Ölçümlerinde Elde Edilen Bulgular ve Görüntüler.....	92
5.5 Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dersliklerine ait veriler ve Ölçüm Sonuçları	95
5.6 Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dersliklerinde Yapılan Blower Door Ölçümlerinde Elde Edilen Bulgular ve Görüntüler	96
5.7 Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Binası Dersliklere ait Test Ölçüm Sonuçları	99
5.8 Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Binası Dersliklerinde Yapılan Blower Door Ölçümlerinde Elde Edilen Bulgular ve Görüntüler	100
5.9 Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Binası Dersliklerinde Yapılan Blower Door Ölçümlerinde Elde Edilen Bulgular ve Görüntüler	101

TABLÖLAR DİZİNİ (devam)

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
5.10 Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Binası Dersliklere ait BDT Ölçüm Sonuçları.....	103
5.11 Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Binası Dersliklerinde Yapılan Blower Door Ölçümlerinde Elde Edilen Bulgular ve Görüntüler	104





SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
CO ₂	Karbondiyoksit
W/m ² K	Isı iletkenlik katsayısı (Watt/metre kare. Kelvin)
kWh	Kilowatt saat
kg	Kilogram
m ²	Metrekare
Pa	Pascal
n ₅₀	Saatteki hava değişim oranı (1/h), (h ⁻¹)
V ₅₀	Hava akımı
q ₅₀	Hava geçirgenlik Değeri (m ³ /(h.m ²))
w ₅₀	Özgöl Sızıntı Oranı (m ³ /(h.m ²))
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
V	Bina hacmi
A _E	Bina kabuğu yüzey alanı
ΔP	Basınç farkı (İç-dış ortam)
P _E	Dış ortam hava basıncı
P _I	İç ortam hava basıncı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
-----------------	-----------------

A_F	Bina taban alanı
-------	------------------

CO	Karbon monoksit
----	-----------------

NO ₂	Azot dioksit
-----------------	--------------

SO ₂	Kükürt dioksit
-----------------	----------------

CH ₄	Metan
-----------------	-------

SF ₆	Kükürt hekzaflorür
-----------------	--------------------

Q _P	Hava Sızıntı Miktarı
----------------	----------------------

<u>Kisaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
--------------------	-----------------

AB	Avrupa Birliği
----	----------------

ASHRAE	Amerikan Isıtma, Soğutma ve Havalandırma Müh. Derneği
--------	---

BAUN	Balıkesir Üniversitesi
------	------------------------

BDT	Blower Door Test
-----	------------------

BEP	Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği
-----	--

DOE	Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı
-----	--

EPBD	Binaların Enerji Performansı Direktifi
------	--

EPS	Ekspande Polistren Köpük
-----	--------------------------

ETKB	T.C. Enerji Tabi Kaynakları Bakanlığı
------	---------------------------------------

IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
-----	----------------------------

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
NAIMA	Kuzey Amerika Yalıtım Üreticileri Derneği
NZEB	Yaklaşık Sıfır Enerjili Binalar
T.A.	Taban Alanı
UOB	Uçucu Organik Bileşikler
XPS	Ekstrüde Polistren Köpük
Y.A.	Yüzey Alanı

xxx



1.GİRİŞ

Enerji geçmişte olduğu gibi günümüzde de ülkelerin en temel gereksinimlerinden biridir. 19. yüzyılın başlarında gerçekleşen sanayi devrimiyle enerjiye olan gereksinim giderek artmış ve bunun sonucunda farklı enerji kaynakları bulunarak, doğan enerji ihtiyacı karşılanmaya çalışılmıştır. Değişen dünya düzeninde nüfus artışı, teknoloji, sanayi, konfor gibi nedenlerle her geçen gün enerji daha da önem kazanmıştır. Dolayısı ile ülkelerin enerji ve enerji kaynaklarına giderek artan talepleri sonucu, enerji ile ilgili çalışmalar ülkelerin politikalarını belirlemede etkili olmuştur. Toplam enerji tüketiminde önemli bir pay sahibi olan binalarda (%40) alınacak önlemler ile enerjiden yaklaşık %20 oranında tasarruf edilebilmesi ve enerji tüketimine bağlı olarak artan karbondioksit salımının azaltılması sebebiyle, binalarda enerji verimliliği konusu Dünya’da önemli bir potansiyel olarak dikkat çekmektedir (Tombak Turan 2015).

Çevresel ve enerji arzındaki sorunlar nedeni ile birçok ülke, enerji tüketim değerlerini sınırlayarak düşük enerjili binalara ulaşmayı amaçlamaktadır. Avrupa Birliği’nin 2002/91/EC sayılı “Binaların Enerji Performans Direktifi”nin yürürlüğe girmesi ile enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik uygulamaya konan yasal düzenleme, Mayıs 2010 tarihli revize 2010//31/EC sayılı Direktifin kabulü ile inşaat sektöründeki önemli potansiyeli kullanmak için üye ülkeleri bağlayıcı yeni hükümler getirmekte olup binaların 2050 yılına dek karbonsuzlaştırılması dikkat çeken önemli hedeflerden biridir (Boşluk Analizi Raporu 2018).

Enerji verimliliğinin artırılması ve karbonsuzlaştırma hedefleri doğrultusunda önemli bir yer teşkil eden binalarda, enerji performansının iyileştirilmesi gereklilikleri doğmuştur. Bu gerekliliklerden biri ise bina kabuğunun enerji performansına olan etkisi ve iyileştirmelerdir. Günümüzde iç ve dış mekân arasında pek çok işlevi üstlenen bina kabuğunda enerji performansı ve konfor açısından önem arz eden bir diğer konu hava sızdırmazlık performansıdır. Hava kaçaklarının önlenmesi gerek enerji tasarrufu gerekse mekânlarda kullanıcı memnuniyetini arttıran ısı konforu ve iç ortam hava kalitesinin sağlanmasının yanı sıra yapı fiziği sorunlarının azaltılması ve yapı kullanım süresinde işletme giderleri açısından da önemli rol oynar. Bu sebeple ülkeler standart ve yönetmeliklerine hava sızdırmazlık konusunda şartlar ve sınır değerler tanımlamışlardır. Binalarda hava sızdırmazlık (geçirimsizlik) değerinin standartlarda belirtilen seviyelerde sağlanması, düşük enerjili binalara ulaşma

hedefine önemli katkı sağlamaktadır. Bir binanın enerji performansının artırılması ve enerji verimliliğine yönelik alınan önlemler, bina kabuğundan havanın kontrolsüz bir şekilde içeriye ya da dışarıya sızmasının önlenmesi ile sağlanabilir.

1.1. Tezin Amacı

Binalarda enerji verimliliğinin ve iç mekân hava kalitesinin (havalandırma miktarının) sağlanması için bina kabuğu hava sızdırmazlık performansı oldukça önemlidir. Literatürde incelenen önceki çalışmalar ışığında dünya genelinde sızdırmazlık konusuna verilen önem giderek artmakta olup; çeşitli ülke standartlarında farklı bina türlerine ait hava sızdırmazlık sınır değerleri belirlenmektedir. Çalışmalarda ağırlıklı olarak konutların ele alındığı görülmektedir ve standartlarda konutlara ait sızdırmazlık değerleri mevcuttur. Diğer bina tipolojilerine ilişkin sızdırmazlık değerleri Birleşik Krallık ve Fransa gibi ülke standartlarında yer almaktadır ve bu standartlarda eğitim binası, ofisler, hastaneler vb. bina türlerine ait sınır değerleri tanımlanmıştır. Tez çalışmasının amacı eğitim binalarında yer alan farklı kullanıma sahip mekânların sızdırmazlık değerlerinin Blower Door Test ünitesi ile tespit edilerek, ülkemiz standartları yanı sıra örnek olarak ele alınan Pasif Ev Standardı, Birleşik Krallık ve Fransa ülkelerine ait standartlar ile karşılaştırılmasıdır. Çalışmada Blower Door ölçümlerinin dışında termal kamera aracılığıyla hava kaçaklarının ve ısı köprülerinin saptanması amaçlanmıştır. Böylece farklı ülke standartlarındaki sınır değerler ile karşılaştırma yapılarak durum tespiti yapılmış ve çeşitli parametrelerin elde edilen sonuçlar üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Ayrıca tez çalışmasının ülkemiz için geliştirilmesi gerekli görülen farklı bina tipleri için sızdırmazlık standartlarının belirlenmesine ışık tutacağı düşünülmektedir.

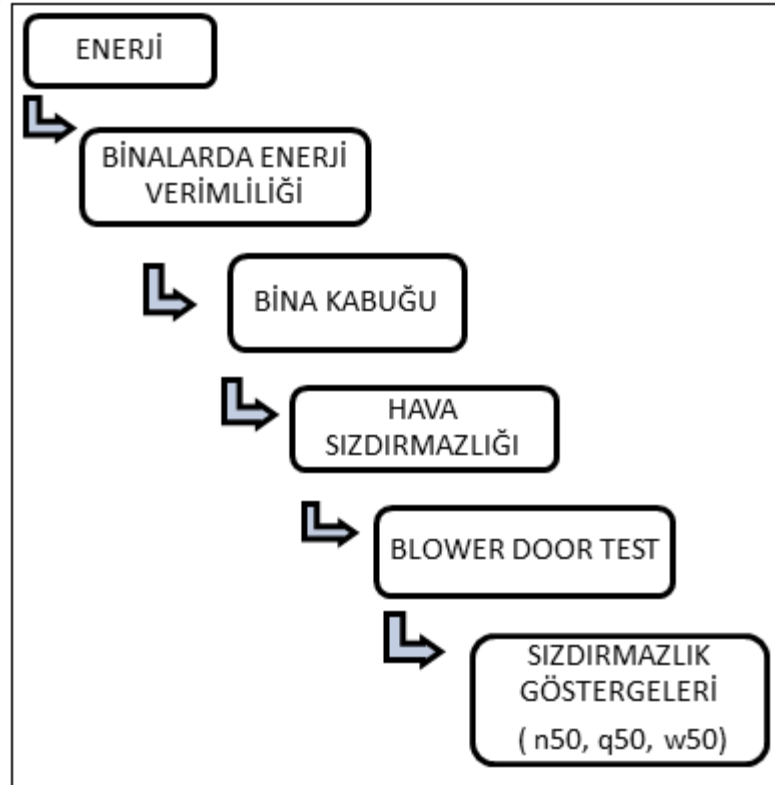
1.2. Tezin Kapsamı

Binalarda enerji verimliliği ve iç ortam konforu açısından önemli olan bina kabuğunda gerçekleşen hava sızıntılarının incelenmesi ve ölçümlerin yapılması için benzer iklim koşullarında yer alan Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi ile Ege Üniversitesi İnşaat ve Makine Mühendisliği Bölümlerine ait eğitim binalarında derslik, laboratuvar ve öğretim elemanlarına ait ofis mekânları seçilmiştir.

Çalışma kapsamında öncelikle literatür taraması ile hava sızdırmazlığı konusunda yapılan mevcut çalışmalar incelenmiştir. Alan çalışması olarak sızdırmazlık ölçümlerinin yapılacağı binaların tipolojisi, yapı malzeme bilgileri ve planları ile bulundukları illerin iklimsel verileri hakkında gerekli bilgiler toplanmıştır. Ege Üniversitesi eğitim binalarında 12 adet derslik, Balıkesir Üniversitesi eğitim binalarında ise 16 adet ofis ve içlerinde laboratuvar da bulunan 5 adet derslik olmak üzere toplam 33 mekanın EN 13829 standardına göre fan basınçlandırma yöntemi olan Minneapolis Blower Door Test cihazı ile hava sızdırmazlık ölçümleri yapılmış olup; test sırasında hava kaçağı (sızıntı) bölgelerinde oluşan ısı köprüleri termal kızılötesi kamera ile görüntülenmiştir. Test sonunda elde edilen hava sızdırmazlık göstergeleri hava değişim oranı (n_{50}), hava geçirgenlik oranı (q_{50}), özgül sızıntı oranı (w_{50}), binaya ilişkin farklı parametreler (hacim, cephe türü vb.) ile kendi içinde ve farklı ülke standartları ile karşılaştırılarak irdelenmiştir.

1.3. Tezin Yöntemi

Tez çalışması kavramsal olarak enerjiden hava sızdırmazlık indekslerine doğru ilerlemektedir (Şekil 1.1.).



Şekil 1.1. Tezin Kavramsal İlerleyiş Şeması

Tez çalışmasında 6 bölüm bulunmaktadır ve ilk bölümde teze genel bir giriş olarak enerjinin verimli kullanımı ve hava sızdırmazlık arasındaki ilişki ile kaynak araştırması yer almaktadır. Kaynak araştırmasında farklı ülkelerde yapılan hava sızdırmazlık çalışmalarına ait bilgiler verilmektedir.

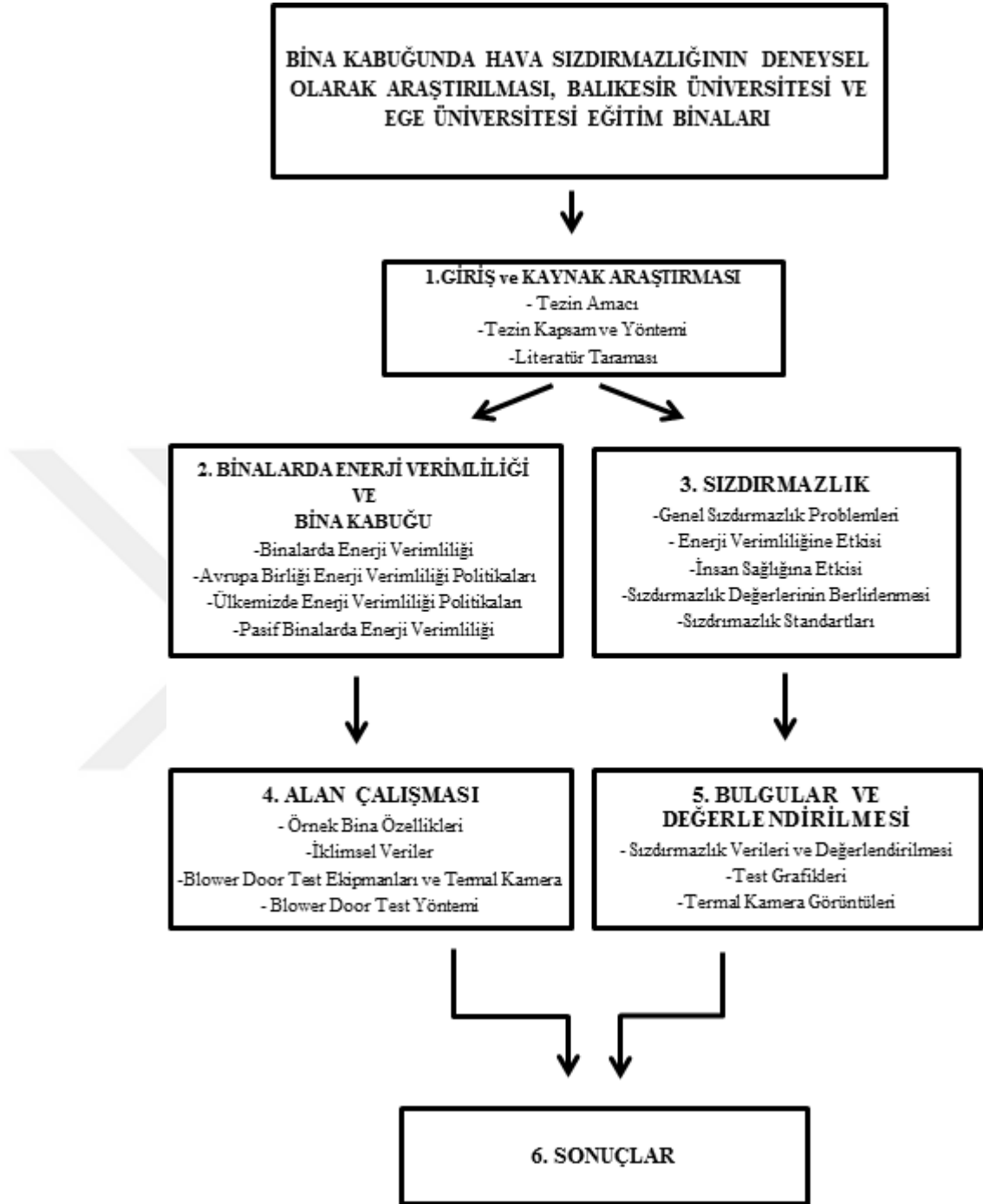
İkinci bölümde kavramsal ilerleyiş doğrultusunda binalarda enerji verimliliği ve bina kabuğu arasındaki ilişkiden yola çıkarak ülkemizde ve Avrupa'da binalarda enerji verimliliğine yönelik politikalar ve hedefler ele alınmıştır. Ayrıca pasif ev standardının enerji verimliliğine yönelik temel tasarım kriterleri de çalışmaya ışık tutması açısından ayrı olarak incelenmiştir.

Üçüncü bölümde bina kabuğu sorunlarından biri olan sızdırmazlık konusu, sızdırmazlığın insan sağlığı, enerji verimliliği üzerindeki etkisi, sızdırmazlık ölçüm yöntemleri ve farklı ülkelere ait sızdırmazlık standart sınır değerleri hakkında gerekli bilgiler geçmiş çalışmalara atıflarda bulunularak verilmiştir.

Dördüncü bölüm alan çalışması yani materyal ve metot kısmını içermektedir. Materyal kısmında örnek eğitim binalarına ilişkin mimari proje planları ve bina kabuğuna ilişkin malzeme bilgileri ve bulundukları illerin iklimsel verileri aktarılmıştır. Metot kısmında ise gerçekleştirilen Blower Door Test ölçüm yönteminin adımları ve termal kızılötesi kamera ile görüntüleme hakkında gerekli bilgilendirmeler yapılmıştır.

Beşinci bölümde alan çalışmasında elde edilen bulgular; bu bulguların değişik parametrelerle (hacim, cephe türü vb.) ilişkisi ve farklı ülke standartları ile karşılaştırılarak değerlendirilmesi yer almaktadır.

Altıncı bölüm çalışmanın sonuç bölümüdür. Elde edilen bulgular eşliğinde değerlendirmeler yapılarak, enerji verimliliği ve mekân konforu bağlamında yasal düzenlemeler ve uygulamalara ilişkin öneriler sunulmuştur.



Şekil 1.2. Tezin Kavramsal İlerleyişi

1.4. Literatür Taraması

Enerji verimliliği konusundaki çalışmaların önem kazanması nedeni ile bina kabuğunda hava sızdırmazlık konusunu ele alan çalışmaların giderek arttığı gözlenmektedir; literatürde yer alan konuya ilişkin çalışmalar aşağıda özetlenmektedir.

Ji and Duanmu (2017a), Çin'de konut binalarının hava geçirmezlik performansı hakkında çok az şey bilindiğini belirterek, Çin'in soğuk bölgesinde ultra düşük enerjili bir binanın hava geçirmezlik performansını araştırmak üzere yaptıkları çalışmada, bina kabuğu hava sızdırmazlığını Blower Door Test yöntemi ile ölçerek, binanın tüm yıl hava sızıntısını, test sonuçlarından elde edilen değerlere dayalı olarak çok bölgeli bir ağ hava akışı modeli ile simüle etmişlerdir. Bina kabuğundaki tipik hava kaçaklarını tespit edebilmek için termal kızılötesi görüntüleyici ve duman kalemi kullanmışlardır. Test sonuçları, basınç düşürme ve basınçlandırma modları altındaki 50 Pascal (ACH50) basınç farkındaki binanın hava değişim oranlarının sırasıyla $0,5 \text{ h}^{-1}$ ve $0,49 \text{ h}^{-1}$ olduğunu göstermektedir. Binanın tipik hava kaçağı yerlerinin ise bina kabuğundaki çatlaklar, pencerelerin duvarlarla birleştiği yerler, pencere ve dış kapıların deformasyona uğrayan kısımları ve hava kanalı boşlukları olduğu belirtilmiştir.

Bir diğer çalışmada ise Çin'in soğuk bölgesinde bulunan on müstakil evin hava sızdırmazlık performansları Blower Door Test ölçümü ile saptanmış ve 50 Pa basınç farkındaki hava değişim oranları $1,89 \text{ h}^{-1}$ ile $0,84 \text{ h}^{-1}$ aralığında, ortalamanın ise $1,42 \text{ h}^{-1}$ değerine sahip olduğu sonucu elde edilmiştir (Ji and Duanmu 2017b).

Ji et al. (2017), test ünitesini kullanarak Çin'in soğuk bölgesinde dört binada yer alan on iki konut/dairenin hava geçirmezlik performansını araştırmıştır. Hava kaçağı ile olası etki faktörleri arasındaki korelasyon katsayıları analiz edilmiştir. Test sonuçları, test edilen bireysel dairelerin 50 Pa altındaki hava değişim oranının $1,14 \text{ h}^{-1}$ ile $2,44 \text{ h}^{-1}$ arasında değiştiğini ve ortalamanın $1,77 \text{ h}^{-1}$ değerinde olduğunu göstermektedir. İstatistiksel analiz sonuçlarına göre pencere ve kapıların bina kabuğu boyunca hava sızıntısını etkileyen ana faktörler olarak saptandığı belirtilmektedir.

Salehi et al. (2017), Portekiz'de Coimbra şehrinde iyileştirilmiş tek aile veya çok aileli evler de dâhil olmak üzere, farklı tipolojilere sahip dört konut

binasında hava değişim oranı, hava geçirgenliği ve özgül sızıntı oranı (n_{50} , q_{50} ve w_{50}), gibi yapı özelliklerini belirlemek için çalışmalarda bulunmuşlardır. Blower Door Test aracılığı ile binaların geçirgenlik göstergeleri saptanarak, termal konfor üzerindeki etkileri ve iç hava kalitesi (IAQ) belirlenmiştir. Sonuç olarak binaların aşırı havalandırma hızlarına sahip olduğunu ve bunun da enerji tüketimini artırdığı yargısına ulaşmışlardır. Bununla birlikte, aşırı havalandırma hızı aynı zamanda iç hava kalitesi ve havalandırma oranını da etkilemektedir; bu nedenle bir binanın hava geçirgenliği düşük olduğunda doğal, mekanik veya hibrit havalandırma formlarının kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Örnek konut binalarının hava değişim oranları (n_{50}) ise $5,48 \text{ h}^{-1}$ ile $9,63 \text{ h}^{-1}$ arasında bulunmuştur.

Hafif çelik yapı endüstriyel binalarda hava sızdırmazlığı üzerine çalışan Brinks et al. (2015), tipik bina bileşenlerindeki sızıntıları ve bağlantıların kapsamlı ölçümlerini yapabilmek amacı ile özel olarak inşa edilmiş bir hava geçirmezlik test standından yararlanmışlardır. Test binalarında hava sızıntılarının azaltılması sonucu geçirimsizlik performansları artırılmış ve kaçaklar boyunca hacimsel akış ölçümleri Blower Door Test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Test standında elde edilen ölçüm verileri, TRNSYS yazılımı ile birleştirilmiş geçici hava akımı şebekesi simülasyonları için kullanılmıştır. 4000'den fazla endüstriyel binadan oluşan bir veri tabanına dayanarak, 28 tipik bina şekli tanımlanmış ve farklı iç sıcaklık profilleri varsayılmıştır. Her bina modellenmiş ve yaklaşık 84 tane tanımlanmış çatlak ile simüle edilmiştir. Çatlaklar, test standındaki ölçümlere dayanmakta ve endüstriyel çelik binaların tipik bir sızıntı dağılımını temsil etmektedir. Yeni bir hava sızıntı modeli oluşturmak için toplamda 140 farklı simülasyon kullanılmıştır. Bu yeni model enerji dengesi hesaplamalarında kolay uygulanabilir olmasının yanı sıra daha yüksek hassasiyetle enerji taleplerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır.

Kalamees et al. (2010), Finlandiya'da bulunan iki katlı evlerde ve beş katlı apartman dairelerinde yapılan testler ve simülasyon ölçümleri ile hava geçirmezlik, havalandırma performansı, hava kaçağı dağılımları ve dış ortam koşullarının evlerde hava basıncı koşullarına etkilerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçları bina kabuğunun hava sızdırmazlığı, hava sızıntısı alanlarının dağılımı ve havalandırma sisteminin performansını binanın arazi koşulları ve çevresel etkiler dikkate alınarak karşılaştırmıştır. Test sonuçları müstakil yapılar için tuğla duvarlı binada $0,7 \text{ h}^{-1}$, ahşap çerçeveli duvarlı binada $3,9 \text{ h}^{-1}$, yığma ahşap binada ise $6,9 \text{ h}^{-1}$ olarak verilmiştir. Apartman binasında sızdırmazlık

değerleri betonarme karkas yapıda 1,0-1,9 h⁻¹ arasında, ahşap karkas yapıda ise 2,1-3,0 h⁻¹ arasında değişmektedir.

Sinnott and Dyer (2011), İrlanda'da 2008 yılında inşa edilen 7 bina ve 1980'lerde inşa edilen 4 konutun (2'si iyileştirilmiş) Blower Door Test yöntemini kullanarak hava sızdırmazlık performansını incelemiştir. Az sayıda örnek konut olmasına rağmen test yapılan binaların İrlanda'daki kentsel konutları temsil ettiği görüşünden yola çıkılmıştır. Test sonuçlarına göre, 2008 inşa yılı olan konutların sızdırmazlık değerlerinin (n₅₀) 6,65 h⁻¹ ile 13,99 h⁻¹ arasında değiştiği ve ortalama değerin 10,96 h⁻¹ olduğu, 1980'li yıllarda inşa edilen iyileştirme yapılan iki konutun ise 5,39 h⁻¹ ile 6,31 h⁻¹ değerine, iyileştirme yapılmayan iki konutun ise 11,66 h⁻¹ ile 14,90 h⁻¹ değerine sahip olduğu saptanmıştır. Elde edilen test sonuçları geçmiş çalışmalarla ve mevcut standartlarla karşılaştırılmış ve sonuç olarak İrlanda'daki konutların hava geçirimsizlik performansının yetersizliği vurgulanmıştır. Çalışmalarında, tasarımın ve detayların önemine dikkat çekilerek, inşaat süresince kontrollerin hava geçirmez konutların eldesinde hayati önem taşıdığına dikkat çekilmiştir.

Bekboliev et al. (2018), özellikle Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından kullanılan 4 farklı tip prefabrik konteyner yapısında Blower Door Test ile hava geçirimsizlik performansını belirleyip, termal kamera yardımıyla hava sızıntı ve ısı köprüleri oluşan bölgeleri tespit ederek bunların enerji verimliliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Testlerden elde edilen verilere göre prefabrik yapılardan birinde gerekli iyileştirmeleri yaparak hava geçirimsizlik performansında yaklaşık %81 artış ve yıllık enerji gereksiniminde ise %9,3 lük bir düşüş sağlamışlardır.

Çok aileli apartmanlar, daireler ve tek aile evleri, 2002 ve 2009 yılları arasında Finlandiya'da iki büyük ölçekli çalışmada incelenmiştir. Bu çalışmalar, 50Pa basınç altında fan basınçlandırma yöntemiyle 170 tek ailelik müstakil ev ve 56 dairenin hava geçirmezlik ölçümlerine dayanmaktadır. Ortalama hava değişim oranları, gaz beton blok duvar, betonarme perde, beton blok, tuğla duvar, hafif beton blok duvar kuruluşuna sahip olan 50 adet, ahşap çerçeveli 100 adet ve 20 adet de ahşap yağma tek aile evleri için sırası ile 1,5 h⁻¹, 1,6 h⁻¹, 2,6 h⁻¹, 2,8 h⁻¹, 3,2 h⁻¹, 3,9 h⁻¹ ve 6,0 h⁻¹ olarak ölçülmüştür. Ara katı sahada dökülmüş olan betonarme çok katlı evlerde 23 dairenin ortalama hava değişim oranı 0,7 h⁻¹, beton elemanlardan inşa edilen çok katlı evlerde 20 dairenin ortalama hava değişim oranı 1,6 h⁻¹, ahşap çerçeveli çok katlı evlerde 16 dairenin ortalama hava değişim

oranı değeri $2,9 \text{ h}^{-1}$ olarak saptanmıştır. Ahşap çerçeveli evlerde inşaat yöntemi ve yalıtım malzemesi (poliüretan yalıtım), ahşap yığma (kütük) evlerde yalıtım malzemesi ve betonarme yapılarda tavan yapısı gibi faktörlerin de hava değişim oranları ortalama değerlerini etkilediğini saptamışlardır. Hava geçirmezliğin ortalama değerleri, Finlandiya'da önerilen hava geçirmezlik seviyesini karşılamamaktadır. Bununla birlikte en önemli sonuç, yapı seçimi, kat sayısı, havalandırma sistemi veya inşaat teknolojisine bakılmaksızın tüm ev gruplarında müstakil evlerin iyi hava sızdırmazlığı değerine ulaşması olduğuna vurgu yapılmaktadır (Vinha et al., 2015).

Feijó-Muñoz et al. (2019), İspanya'nın karasal iklim bölgesinde mevcut konut stokunun bina kabuğundan hava sızıntısını karakterize etmek için kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Farklı tipolojiler ve inşaat dönemlerine sahip konutlara Blower Door Test uygulanmış ve hava kaçak yollarını bulmak için termal görüntülemeyen yararlanmışlardır. 50 Pascal basınç farkındaki ortalama hava geçirgenliklerinin (q_{50}) sırasıyla $5,4 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ ve $6,8 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ olduğu göz önüne alındığında, tek ailelik müstakil konutların dairelere göre daha hava geçirmez olduğunu saptamışlardır. 50 Pa basınç altındaki ortalama hava değişim oranı (n_{50}), tek aile konutları için $6,1 \text{ h}^{-1}$ ve çok aile konutları için $7,1 \text{ h}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte, çeşitli yapı özelliklerinin geçirgenlik sonuçları üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir.

Almeida et al. (2017), çalışmalarında pencerelerin önemli bir rol oynadığı betonarme sisteme sahip binalarda Güney Avrupa'nın düşük hava geçirgenliği bağlamına odaklanarak pencerelerin geçirgenliğinin ölçülmesine katkıda bulunmayı amaçlamışlardır. 23 alanda yapılan deneysel çalışmada fan basınçlandırma yöntemi kullanılarak üç olası kurulum (contasız, sızdırmaz pencere, sızdırmaz pencere ve panjur) oluşturulmuş ve toplam 104 test yapılmıştır. Sonuç olarak, pencere geçirgenliği göstergelerinin 4,8 ile $96,4 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ ve 1,2 ile $30,8 \text{ m}^3/(\text{h.m})$ arasında değiştiğini ve ortalama $28,7 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ ile $8,9 \text{ m}^3/(\text{h.m})$ değerlerinde olduğu, panjur katkısının oldukça değişken olabileceği, ayrıca bina yapım yılı, çerçeve malzemesi türü ve açma sisteminin pencerelerin hava geçirmezliğinde anahtar parametreler olduğu belirtilmiştir.

Güney Kore'de yeni inşa edilen apartmanlarda yapı bileşenlerinin hava geçirmezliği üzerindeki etkisini belirlemek üzere yapılacak ölçümler için, su ve hava sistemleri ile ilgili elektrik, mimari ve iki mekanik bileşen kategorize edilmiş ve bu parçaların hava kaçak oranları Blower Door Testi ile ölçülmüştür. Bu yapı

bileşenlerinin yanı sıra giriş kapısındaki hava kaçağı oranları üç farklı bina yüksekliği için analiz edilmiştir. Blower Door Test ile elde edilen sonuçlar, izleyici (tracer) gaz ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Hava sızıntı oranlarının (ACH50) tüm sistemler kapatıldığında $0,7 \text{ h}^{-1}$ ile $1,0 \text{ h}^{-1}$, tüm sistemler açık iken ise $1,6$ ile $2,7 \text{ h}^{-1}$ arasında değiştiği gözlenmiştir. Pencerelelerin ve giriş kapısının iyileştirilmesi ile konut binalarında hava kaçaklarının önemli ölçüde azaltılabileceği sonucuna varmışlardır (Hong and Kim 2018).

Mortensen and Bergsøe (2017), Danimarka'daki mevcut tek ailelik evlerde bina kabuğunun hava sızdırmazlığını belirlemek üzere çalışmalarında 1880 ve 2007 yılları arasında inşa edilmiş 16 tek ailelik müstakil evlere ait ölçümlerin sonuçlarını sunmaktadır. Bina kabuğunun hava sızdırmazlığı, Blower Door Test tekniği kullanılarak EN ISO 9972'ye göre ölçülmüştür. Bina kabuğu hava sızdırmazlığının ölçüm sonuçları 50 Pa basınç altında (q_{50}) $1,1-5,8 \text{ l/(s. m}^2\text{)}$ arasındadır. İncelenen evler doğal olarak havalandırılmaktadır. Tipik olarak, bina kabuğundaki penetrasyonların elektrik tesisatları ve egzoz kanalları, baca dipleri, eski pencereler ve kapıların çevresi, ahşap tavanlar ve tavan kapakları ile bağlantılı olduğu gözlenmiş olup evlerin tadilatında saptanan bulguların dikkate alınmasının gereği vurgulanmıştır.

Domhagen and Wahlgren (2017), araştırmalarında, ahşap binalardaki hava geçirmezliğinin yıl boyunca değişebileceğini ve binaların kış aylarında, muhtemelen nem değişikliklerinden dolayı hava sızdırmazlık düzeyinin düşük olabileceğini bildirmektedir. Artan enerji kullanımı ve nem hasarı gibi olası sorunların nedenlerini ve sonuçlarını araştırmak için bir dizi sayısal simülasyon ve laboratuvar ölçümü yapmışlardır. Ahşap bir konukevi örneğinde, nem kesici olmadan, iç mekan bağıl nemi 8 gün boyunca % 90'da tutulmuş ve daha sonra 7 gün boyunca % 25 oranına düşürülmüştür. Hava sızdırmazlığı belirtilen her iki koşulda çok kez ölçülmüş ve hava sızdırmazlığının (q_{50}) 50 Pa basınç farkında $0,74 \text{ l/s.m}^2$ 'den $1,21 \text{ l/s.m}^2$ 'ye varan bir değişiklik gösterdiği saptanmıştır. Değişen hava sızdırmazlığının sonuçlarını araştırmak için, tipik bir ahşap müstakil ev sayısal modeli oluşturulmuş ve hava akışları ile basınç profilleri farklı hava sızdırmazlık değerleri için hesaplanmıştır. Simülasyonlar, sızmadaki toplam artışın sadece hava sızdırmazlık değerine değil, aynı zamanda sızıntı dağılımına da bağlı olduğunu göstermektedir. Sonuçlara göre, tavan arasına hava sızdıran bir tavan kapağından erişim var ise, yılın bazı dönemlerinde havanın iç ortamdan tavan arasına ve diğer dönemlerde de tavan arasından iç ortama sızması olasıdır. Ayrıca ahşap evlerde hava sızdırmazlığındaki değişikliklerin çevre (ortam)

neminden etkilendiği; nem artışının hava sızdırmazlık değerini azalttığını ve değişen hava sızdırmazlığı sonuçlarının hem nem hem de enerji performansını etkileyeceği belirtilmektedir.

Šadauskiene et al. (2016), bina enerji performans metodolojisinin güvenilirliğini değerlendirmek ve bina hava sızdırmazlığının önemini belirlemek üzere 2007-2011 yılları arasında Orta Litvanya'da inşa edilen 27 tek ailelik müstakil ev için bina hava sızdırmazlığının önemi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Saha çalışması ve hesaplamaların sonuçlarına göre A sınıfı binalarda hava sızdırmazlığı değerleri $0,55 \text{ h}^{-1}$ ile $0,67 \text{ h}^{-1}$ arasında değişmekte olup ortalama $0,6 \text{ h}^{-1}$ değeri ile $\text{ACH50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ düzenleme gerekliliklerine uygun olduğunu göstermiştir. B ve C sınıfı binalar arasında ise büyük farklılıklar gözlenmiştir. %90 güven aralığında B sınıfı binalar için hava değişim oranları $4,17 \text{ h}^{-1}$ ile $8,05 \text{ h}^{-1}$ arasında değişmekte olup ortalama $6,01 \text{ h}^{-1}$, C sınıfı binaların hava değişim oranları ise $4,45 \text{ h}^{-1}$ ile $7,60 \text{ h}^{-1}$ değerleri arasında değişmekte olup ortalama $6,0 \text{ h}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Sonuçlar, B ve C enerji performans sınıfına sahip Litvanya binalarının yeterince sızdırmaz olmadığını göstermiştir. B sınıfı binaların sunulan ACH50 değerlerinin bir kısmı C sınıfı bina sızdırmazlık değerine yakın olduğu ve dolayısı ile B enerji performans sınıfı binaların da C sınıfına dâhil olabileceği bildirilmektedir.

Bina kabuğu sızdırmazlık konusunu ele çalışmaların özet bilgileri ve gruplandırması Tablo 1.2'de görülmektedir.

Tablo 1.1. Sızdırmazlık Konusunu Ele Alan Çalışmalar

Araştırmacılar	Ülke	Amaç ve Kapsam	Çalışma Odağı	Sayısal Veri
Ji, Yongming Duanmu, Lin 2017-a	Çin	Ultra düşük enerjili 2 konut binasının hava geçirimsizlik performansının incelenmesi	Ultra Düşük Enerjili Bina ve Farklı Yapı Tipi	n(50) 0,5 h ⁻¹ ve 0,49h ⁻¹
Ji, Yongming Duanmu, Lin 2017-b	Çin	Çin'in soğuk iklim bölgesinde bulunan 10 müstakil evin hava sızdırmazlık değerlerinin saptanması	Farklı Müstakil Ev Tipleri	n(50) 0,84 h ⁻¹ – 1,89 h ⁻¹ arası değişen değerler Ortalama: 1,42 h ⁻¹
Ji, Yongming Duanmu, Lin Xiangli, Li 2017-b	Çin	Çin'in soğuk iklim bölgesinde bulunan 4 binada 12 konut dairesinin hava sızdırmazlık değerlerinin saptanması, hava kaçağı faktörleri ve olası etkilerinin araştırılması	Sızıntı Faktörleri ve Bölgeleri	n(50) 1,14 h ⁻¹ – 2,44 h ⁻¹ arası değişen değerler Ortalama: 1,77 h ⁻¹
Salehi, Atefeh Torres, Isabel Ramos, Ana 2017	Portekiz	Farklı yapı tipolojilerine sahip 4 konut binasına ait hava sızdırmazlık indekslerinin belirlenmesi, termal konfor ve iç hava kalitesi üzerindeki etkisinin araştırılması	Farklı Yapı Tipolojisi	n(50) 5,48 h ⁻¹ – 9,63 h ⁻¹ arası değişen değerler
Brinks, Pascal Komadt, Oliver Oly, Rene 2015	Lüksemburg	Endüstriyel bir yapıda özel bir hava sızdırmazlık standı ile ölçümlerin yapılıp, sızıntıların azaltılması ile hava geçirimsizlik performansının artırılması. Ölçüm verilerinin TRNSYS yazılımı ile birleştirilip hava akımı şebekesi simülasyonları için kullanılması.	Endüstriyel Hafif Çelik Yapı	-
Kalamees, T. Kurnitski, J. Jokisalo, J. Eskola, L. Jokiranta, K. Vinha, J. 2010	Finlandiya	Tipik Finlandiya konutlarındaki hava basıncı koşullarının, saha ölçümleri ve bilgisayar simülasyonlarından elde edilen veriler kullanılarak analiz edilmesi	Yapı Tipolojisi ve Çevresel Etmenler	n(50) Müstakil Ev Ahşap iskelet Duvarlı: 3,9 h ⁻¹ Tuğla Duvarlı: 0,7 h ⁻¹ Yığma Ahşap Duvarlı: 6,9 h ⁻¹ Apartman Betonarme yapı 2. Kat: 1,0 h ⁻¹ , 5. Kat: 1,9 h ⁻¹ Ahşap karkas yapı 2. Kat: 2,1h ⁻¹ 4. Kat: 3,0 h ⁻¹

Tablo 1.1. Sızdırmazlık Konusunu Ele Alan Çalışmalar (devamı)

Araştırmacılar	Ülke	Amaç ve Kapsam	Çalışma Odağı	Sayısal Veri
Derek Sinnott Mark Dyer 2011	İrlanda	2008 yılında inşa edilen 7 konut binası ve 1980lerde inşa edilen güçlendirilmiş 2 ve güçlendirilmemiş 2 olmak üzere toplam 11 konut için hava sızdırmazlık değerlerinin belirlenip, (az sayıda örnek olmasına rağmen İrlanda'nın yaygın kentsel konutlarını temsil etmesinden dolayı) genel olarak İrlanda konutlarının performansının araştırılması.	Geleneksel İrlanda Konutları ve Yapı Tipolojisi	n(50) 2008 Yılı İnşa Edilen Konutlar 6,65 h ⁻¹ ile 13,99 h ⁻¹ arası değişen değerler ve Ortalama: 10,96 h ⁻¹ 1980lerde İnşa Edilen Konutlar Güçlendirilmiş: 5,39 h ⁻¹ ve 6,31 h ⁻¹ Orijinal: 11,66 h ⁻¹ ve 14,90 h ⁻¹
Bekboliev, Mirbek Tavukcuoglu, Ayse Tanyer, Ali Murat 2018	Türkiye	Farklı tipteki prefabrik konteyner yapıların Blower Door Test ile hava geçirimsizlik performanslarını belirleyip, termal kamera ile hava sızıntısı ve ısı köprüsü oluşan bölgeleri tespit etmek, sızdırmazlığın ve yapılan iyileştirmelerin enerji verimliliği üzerindeki etkisini incelemek.	Yapı Tipolojisi (Prefabrik Konteyner Yapılar)	n(50) İyileştirme yapılmadan: 9,00 h ⁻¹ ile 25,00 h ⁻¹ arası değişen değerler İyileştirme Sonrası: 2,70 h ⁻¹ ile 14,20 h ⁻¹ arası değişen değerler Yapılan İyileştirmeler Sonrası Hava Geçirimsizlik Performansında % 81 artış Yıllık Enerji Talebinde % 9,30 düşüş
Feijó-Muñoz, Jesús González- Lezcano, Roberto Alonso Poza-Casado, Irene Padilla-Marcos, Miguel Ángel Meiss, Alberto 2019	İspanya	Tek aile ve çok aile evlerinin geçirgenlik(q50) değerlerini bulup, çeşitli yapı özelliklerinin geçirgenlik değerleri üzerindeki etkisinin incelenmesi.	Yapı Tipolojisi ve Yapı Özellikleri	q(50) Tek Aile Evleri: 5,4 m ³ /h·m ² Çok Aile Evleri: 6,8 m ³ /h·m ² n(50) Tek Aile Evleri: 6,1 h ⁻¹ Çok Aile Evleri: 7,1 h ⁻¹
Vinha, Juha Manelius, Elina Korpi, Minna Salminen, Kati Kurnitski, Jarek Kiviste, Mihkel Laukkarinen, Anssi 2015	Finlandiya	Finlandiya'da farklı yapı malzemeleri ile inşa edilen 170 müstakil ev ile 56 konut dairesinin hava sızdırmazlık değerlerine ulaşılması ve karşılaştırılması.	Yapı Malzemeleri ve Yapı Tipolojisi	n(50) 10 gaz beton blok, 10 betonarme perde, 10 tuğla duvar, 10 beton blok, 100 ahşap çerçevesi ve 20 ahşap yığma tek aile evleri için sırası ile ortalama 1,5 h ⁻¹ , 1,6 h ⁻¹ , 2,6 h ⁻¹ , 2,8 h ⁻¹ , 3,2 h ⁻¹ , 3,9 h ⁻¹ ve 6,0 h ⁻¹ . Ara katı sahada dökülmüş olan betonarme çok katlı evlerde 23 dairenin ortalama: 0,7 h ⁻¹ Beton elemanlardan inşa edilen çok katlı evlerde 20 dairenin ortalama: 1,6 h ⁻¹ Ahşap çerçevesi çok katlı evlerde 16 dairenin ortalaması 2,9 h ⁻¹

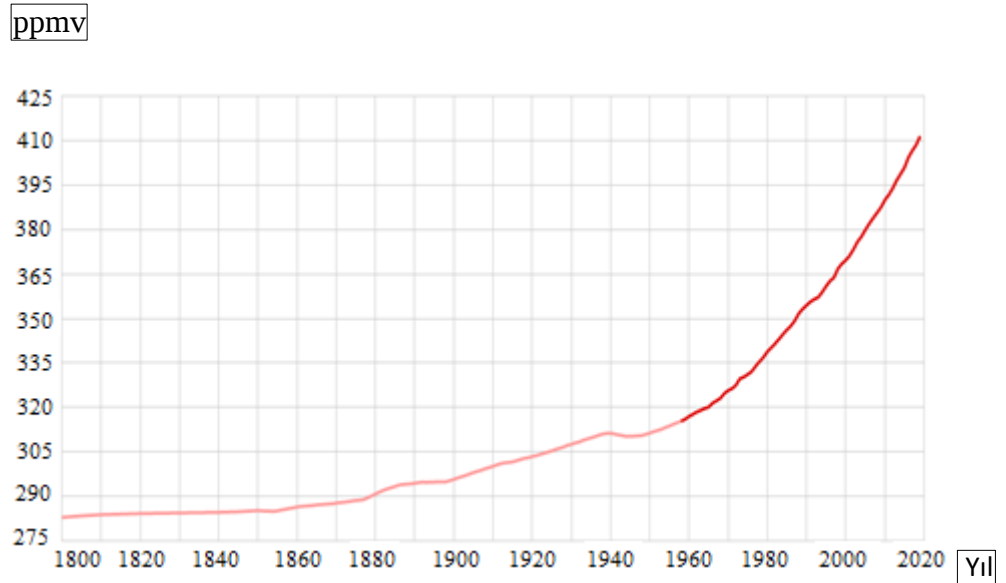
Tablo 1.1. Sızdırmazlık Konusunu Ele Alan Çalışmalar (devamı)

Araştırmacılar	Ülke	Amaç ve Kapsam	Çalışma Odağı	Sayısal Veri
Almeida, Ricardo Ramos, Nuno. Pereira, Pedro 2017	Portekiz	Pencerelerin önemli bir rol oynadığı ağır inşaat binalarında Güney Avrupa düşük hava geçirgenliği bağlamına odaklanarak pencerelerin geçirgenliğinin ölçülmesine katkıda bulunmayı amaçlamışlardır.	Pencere ve Doğrama Tipi, Panjur Etkisi ve İnşaat Yılı	q(50) V_{50}/A_e :4,8- 96,4 m ³ /h·m ² arasında değişen ortalama 28,7 m ³ /h·m ² V_{50}/L : 1,2-30,8 m ³ /h·m arasında değişen ortalama 8,9 m ³ /h·m
Hong, Goopyo Kim, Daeung Danny 2018	Güney Kore	Güney Kore'de yeni inşa edilen apartmanlarda bina bileşenlerinin hava sızdırmazlığı üzerindeki etkisini incelemektir.	Bina Bileşenlerinin Açık ve Kapalı olması	n(50) Parçalar sızdırmaz hale getirildiğinde: 0,7 h ⁻¹ ile 1,0 h ⁻¹ , Tüm parçalar açıkken 1,6 ile 2,7 h ⁻¹ arasında değişen değerler.
Mortensen, Lone H. Bergsøe, Niels C. 2017	Danimarka	1880 ve 2007 yılları arasında inşa edilmiş orijinal ve iyileştirme yapılmış 16 evin Blower Door test ile sızdırmazlık ölçümlerinin yapılması ve incelenmesi	Yapı Detayları ve Bina Yaşları	(q50) 1,1 ile 5,8 l/(s. m ²) arası değişen değerler.
Domhagen, Fredrik Wahlgren, Paula 2017	İsveç	Ahşap binalardaki hava geçirmezliğinin yıl boyunca değişebileceğini ve binaların kış aylarında, nem değişikliklerinden dolayı daha az hava geçirmez olabileceğini göstermeyi amaçlamışlardır.	Bağıl Nem Etkisi ve Ahşap Malzeme Yapısı	(q50) Bağıl Nem %90: 0.74 l/sm ² Bağıl Nem %25: 1.21 l/sm ²
Šadauskiene, J. Šeduikyte, L. Paukštys, V. Banionis, K. Gailius, A. 2016	Litvanya	Bina Enerji Performansının hava geçirimsizlik açısından güvenilirliğini değerlendirmek ve hava sızdırmazlığının önemini belirlemektir.	Bina Enerji Performansı Sınıflandırması ve Sızdırmazlık İlişkisi	n(50) A sınıfı binalar Ortalama: 0,6 h ⁻¹ (Uygunluk) B sınıfı binalar Ortalama: 6,1 h ⁻¹ (Uygun Değil) C sınıfı binalar Ortalama: 6,0 h ⁻¹ (Uygun Değil)

2.BİNALARDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE BİNA KABUĞU

2.1.Binalarda Enerji Verimliliği

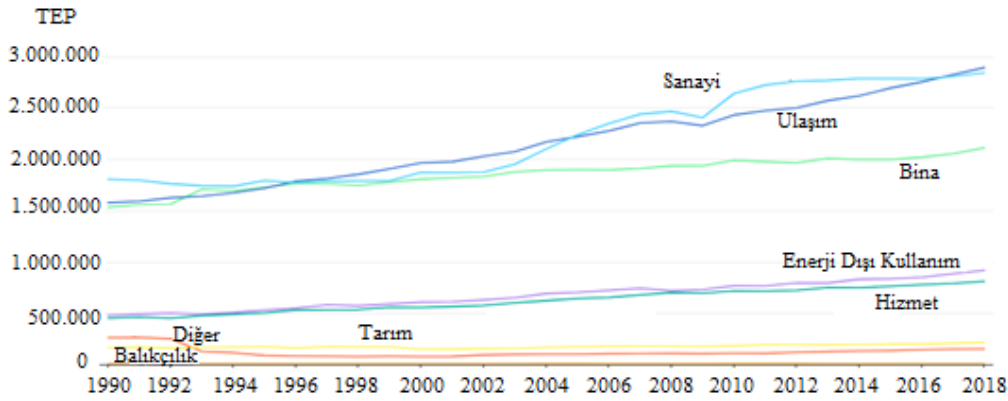
Dünyadaki hızlı ekonomik büyüme, enerji tüketiminin artmasına neden olmuştur. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) istatistiklerine göre fosil yakıtlar, yaklaşık %81'lik bir payla dünya enerji pazarına hâkimdir ve 2030 yılına kadar dünyanın birincil enerjisine hâkim olmaya devam edeceği tahmin edilmektedir (Memon 2014). Bununla birlikte fosil enerji kaynakları tükenmekte ve bu durum gerek enerji kaynaklarının yetersizliği gerekse çevre sorunları (zararlı gaz emisyonları) konusunda duyulan endişeyi arttırmaktadır. Çevresel sorunların temelini oluşturan CO₂ salımı sanayileşme öncesi 1800'lü yılların başında 280 ppm, 1958 yılında ise Mauna Loa İstasyonu'nda yapılan ölçümlerde 317,71 ppm olarak kaydedilmiştir. İklim değişikliği ile mücadele sınırı olan 350 ppm değeri ise ilk kez 1988 yılında 351,57 ppm değeri ile aşılmıştır. 1998 yılı Ocak ayında kaydedilen ortalama değer 350,39 ppm olurken 2020 yılı Aralık ayı ortalaması 414,02 ppm değerine ulaşmıştır (Yeşil Ekonomi 2021). 1800 yılından günümüze kadar atmosfere salınan CO₂ miktarı eğrisi Şekil 2.1'de görülmektedir.



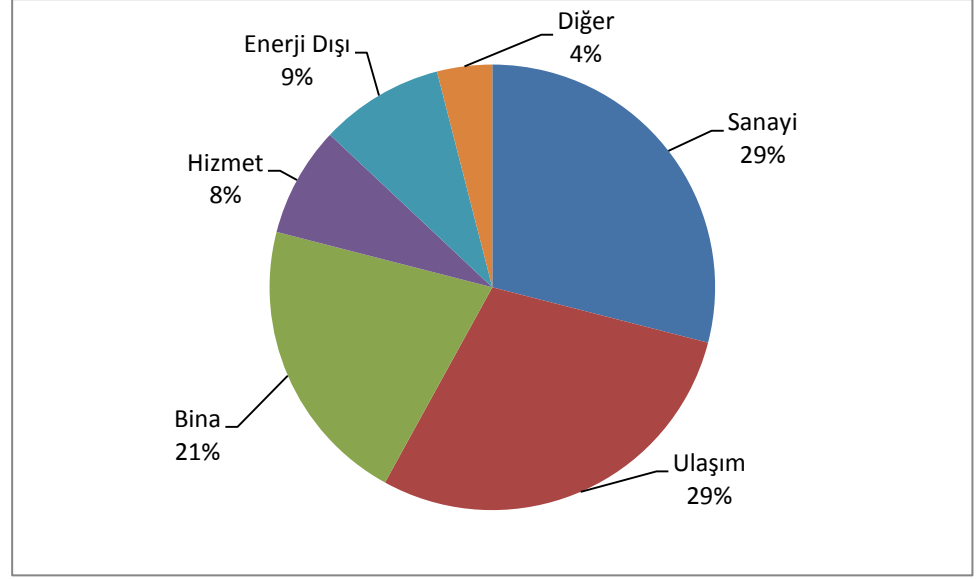
Şekil 2.1. 1800 yılından günümüze kadar atmosfere salınan CO₂ miktarı (Sealevel.info 2021)

Karbon emisyonu ve iklim değışikliğı ile ilgili endişelerin artması, özellikle gelişmiş ülkelerde enerji tüketiminde %50 oranına varan tasarruf sağlamasından dolayı binalarda enerji verimliliğine odaklanılmasının temel nedenidir (Pérez-Lombard et al. 2008). Dolayısıyla inşaat sektöründe yeni binalarda enerjinin verimli kullanımı ve mevcut yapılarda da enerji performansının artırılması temel amaç olup, dünya ülkelerinin enerji politikalarında dikkat çeken en önemli konulardan biridir. Enerji verimliliğı, yaşam standardını, üretim kalitesini ve miktarını düşürmeden, daha az enerji kullanarak aynı miktardaki işi yapabilmektir. Diğer bir deyişle, enerji verimliliğı birim hizmet ya da ürün miktarında enerji tüketimini azaltmaktır. Günlük yaşamda da pek çok alanda enerjiyi verimli kullanmaya yönelik büyük bir potansiyel bulunmaktadır.

İnşaat sektörü ülkelerin gelişmesine bağılı olarak hızla büyümekte olup gerek yapım süreci gerekse yapıların kullanım aşamasında harcanan enerji miktarına bağılı olarak toplam enerji tüketimi içindeki payını giderek artırmaktadır (Şekil 2.2 ve Şekil 2.3). Birçok ülkede harcanan enerji miktarının kontrol edilebilmesi ve enerjinin daha verimli bir şekilde kullanılması için izlenen politikalar çerçevesinde ilgili yasalar yürürlüğe girmiştir (Kraus and Kubeckova 2013).



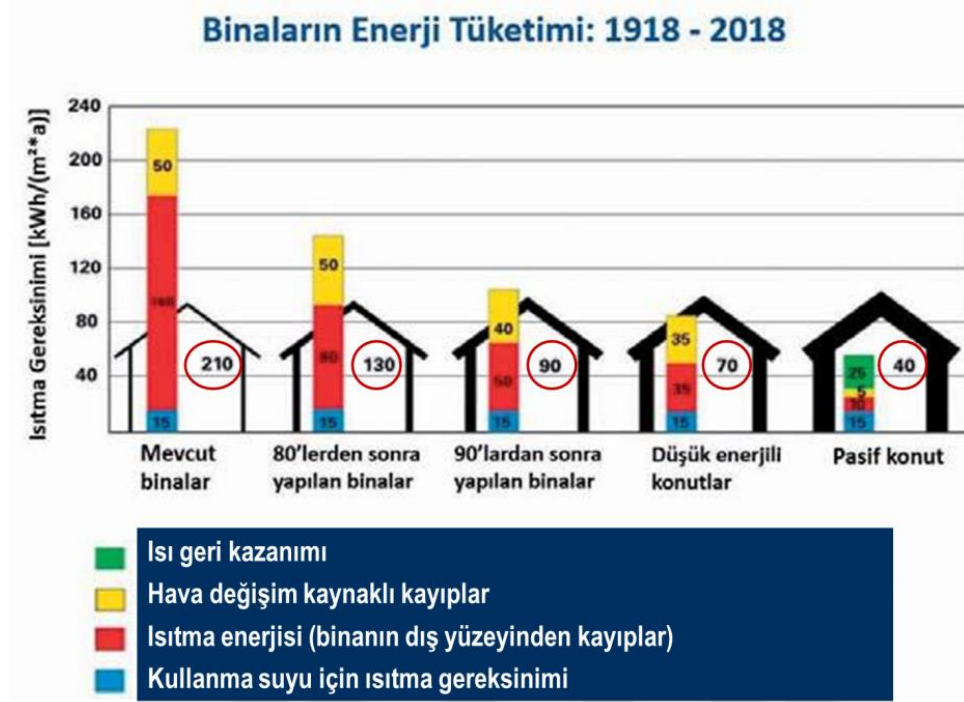
Şekil 2.2. Dünya Nihai Enerji Tüketimi Sektörel Dağılımının Yıllara göre Değişimi (IEA)



Şekil 2.3. 2018 Yılı Dünya Nihai Enerji Tüketiminin Sektörel Dağılımı (IEA)

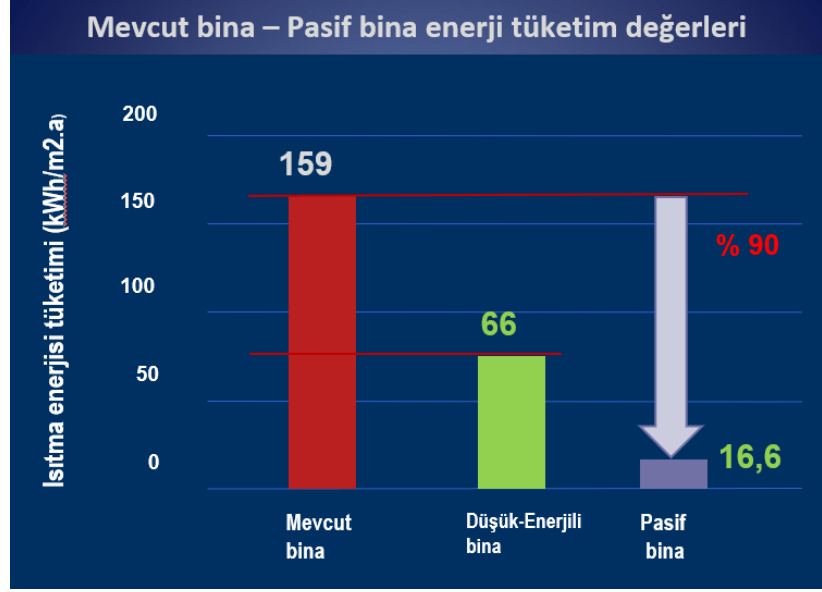
Binalarda enerji verimliliği, mühendislik ve mimarlığın temel konularından biridir. Enerji ve çevre bilinçli tasarım yaklaşımı, tasarımcıların ve bina sahiplerinin bina işletme maliyetlerini ekonomik olarak azaltmasına yardımcı olurken, binanın sakinleri için konforu da artırır. Geçmişte inşa edilen yapı stokuna bakıldığında bir kısmının günümüz bina enerji verimliliği standartlarını karşılayamadığı görülmektedir. Dolayısı ile yaşı ilerledikçe, verimsiz binaların enerji etkin iyileştirilmesi veya yenilenmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Enerji tüketimini azaltmak için dünya ülkeleri bina enerji performansı için giderek daha titiz politika ve düzenlemeleri benimsemişlerdir. Bu düzenlemeler, gelişmiş enerji yönetimi için mevcut yapıların enerji verimliliğini iyileştirmelerinde artışa neden olmuştur.

Teknolojik gelişmeler, artan nüfusa bağlı olarak kentsel alanların yüksek büyüme oranı ve artan konfor gereksiniminin enerji tüketimindeki artışı tetikleme, konuyu insanlığın endişelerinden biri haline getirmiştir. Bu sorun, çevre üzerinde önemli etkilere neden olan, fosil (yenilenemez) kaynak kullanımına dayanmaktadır. Yapı sektöründeki enerji tüketiminin önemli bir payı ısıtma ve soğutma ile ilişkilidir. Bu nedenle, binaların enerji verimliliğini artırmaya yönelik çözümlerin uygulanması önemsenmiştir. Binaların ısıtma ve soğutma yükünü azaltmak için öncelikle bina kabuğunda iyileştirmeler yapılarak bina enerji performansında artış sağlanabilir. Şekil 2.4'te geçmiş yıllardan günümüze kadar inşa edilen binaların ısıtma enerjisi tüketimine dair değişim görülmektedir.



Şekil 2.4. Geçmişten Günümüze Binaların Enerji Tüketimindeki Değişim
(Özbalta ve Yıldız 2017)

Avrupa Birliği, Binalarda Enerji Performansı Direktifi ve Enerji Verimliliği Direktifi ile 2020, 2030 ve 2050 hedeflerine ulaşabilmek için mevcut binaların enerji tüketim miktarını azaltmak üzere pasif bina ve aktif enerjili binalara geçişi teşvik eden politikaları izlemektedir. Şekil 2.5'te Hannover Kronsberg yerleşimine yönelik yapılan bir çalışmada görüldüğü üzere mevcut bir binada yaklaşık 160 kWh/m².yıl olan ısıtma enerjisi tüketimi düşük enerjili bir binada yaklaşık 66 kWh/m².yıl ve pasif binada ise 16 kWh/m².yıl değerlerinde olup % 90 oranında azalma sağlandığı görülmektedir.

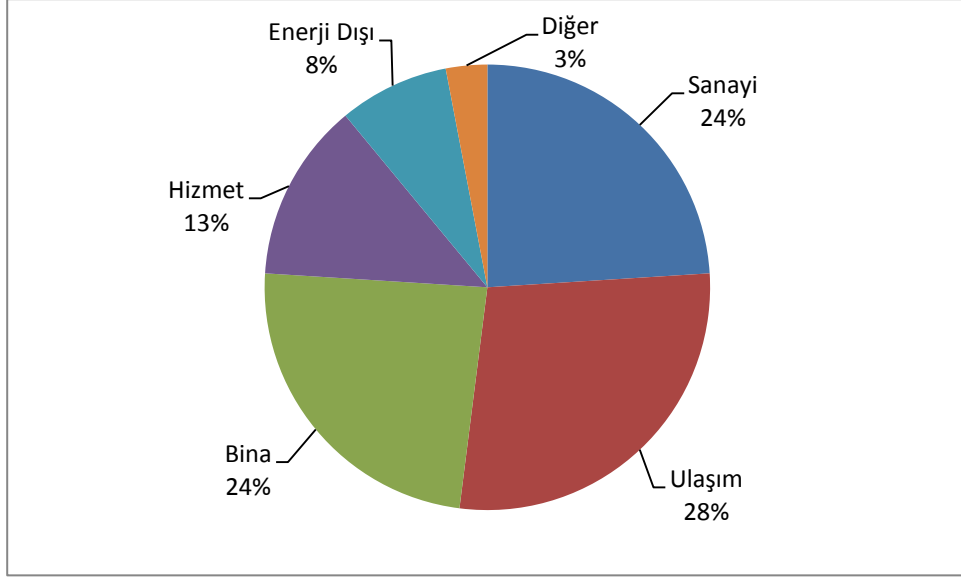


Şekil 2.5. Mevcut Bina, Düşük Enerjili Bina ve Pasif Binalara Doğru Isıtma Enerjisi Tüketimi (Özbalta ve Yıldız 2017)

2.1.1. Avrupa Birliği Ülkeleri Enerji Verimliliği Politikaları

Avrupa Birliği enerji politikasında genel olarak üç ana yaklaşımı izlemiştir. Öncelikli olarak enerji performansı düşük olan mevcut yapı stokunun iyileştirilmesi ve yeni binaların daha yüksek ısı performans standartlarına göre inşa edilmesi, diğeri ise enerjinin daha rasyonel kullanımını teşvik ederek tüketicilerin bilinçlenmesini ve bireylerin davranışlarını değiştirmelerini sağlamaktır; çünkü binalardaki toplam enerji tüketiminde bireyler büyük ölçüde etkilidir.

Avrupa Birliği ülkelerinde kullanılan enerjinin yaklaşık %24'lük bir bölümü binalara ait tüketimdir (Şekil 2.6). Sürdürülebilir bina süreçleri ile ilgili uygulanan enerji ilkelerine uygun olarak enerji tüketimini ve CO₂ emisyonlarını azaltıcı bir dizi önlemler alınmaktadır. Günümüzde ana enerji kaynağı olan fosil yakıtların makul ve dikkatli bir şekilde kullanımı ve alternatif doğal kaynakların kullanımının artması, enerji tüketimini önemli ölçüde azaltmayı; sürdürülebilir inşaat ilkeleri doğrultusunda enerji kaynaklarını gelecek nesillere aktarmayı mümkün kılacaktır (Kraus and Kubeckova 2013).



Şekil 2.6. 2018 Yılı Avrupa Nihai Enerji Tüketiminin Sektörel Dağılımı (IEA)

Bina sektörünü etkileyen temel yasal araç, Binaların Enerji Performansı Yönergesidir. Yönerge, enerji performansını ölçmek için entegre bir metodoloji için bir çerçeve sunarak üye ülkelerdeki binaların enerji performansını teşvik etmek üzere tasarlanmıştır.

Binaların enerji performansını artırmak için Avrupa Birliği, 2010/31/EU Binaların Enerji Performansı Direktifi (EPBD) ve 2012/27/EU Enerji Verimliliği Direktifini içeren bir yasal çerçeve oluşturmuştur. Direktiflerin teşvik ettiği politikalar:

- 2050 yılına kadar yüksek enerji verimli ve karbondan arındırılmış bina stokuna ulaşmak,
- Yatırım kararları için istikrarlı bir ortam yaratmak,
- Tüketicilerin ve işletmelerin enerji ve paradan tasarruf etmek için daha bilinçli seçimler yapmasını sağlamak şeklinde sıralanmaktadır.

Ulusal bina yönetmeliklerinde enerji performansı kurallarının getirilmesinin ardından binaların, 1980'li yıllarda inşa edilen binalara kıyasla yalnızca yarısı kadar enerji tükettikleri görülmektedir.

EPBD, ulusal Avrupa Birliği hükümetlerinin binaların enerji performansının artırmasına ve mevcut bina stokunu iyileştirmesine yardımcı olacak çok çeşitli politikaları ve destekleyici önlemleri kapsamaktadır. Bu destekleyici önlemler:

- Avrupa Birliği ülkeleri, 2030, 2040 ve 2050 için gösterge niteliğindeki kilometre taşları ile 2050 yılına kadar ulusal bina stoklarının karbondan arındırılmasını hedefleyen güçlü uzun vadeli yenileme stratejileri oluşturmalarıdır. Stratejiler, ulusal enerji ve iklim planlarının enerji verimliliği hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunmalıdır.
- AB ülkeleri, yeni binalar ve büyük ölçüde yenilenen mevcut binalar için, ısıtma ve soğutma sistemleri, çatılar ve duvarlar gibi yapı elemanlarının değiştirilmesi veya iyileştirilmesi için en uygun maliyetli minimum enerji performansı gerekliliklerini belirlemelidir.
- 31 Aralık 2020'den itibaren tüm yeni binalar yaklaşık sıfır enerjili binalar (NZEB) olmalıdır. 31 Aralık 2018'den bu yana, tüm yeni kamu binalarının zaten NZEB olması gerekmektedir.
- Bir bina satıldığında veya kiralanırken enerji performans sertifikaları verilmeli ve ısıtma ve iklimlendirme sistemleri için denetim şemaları oluşturulmalıdır.
- Akıllı teknolojiler, bina otomasyonu ve kontrol sistemlerinin kurulumu ve oda seviyesinde sıcaklığı düzenleyen cihazlar dâhil olmak üzere teşvik edilmelidir.
- Bina kullanıcılarının sağlığı ve refahı, örneğin hava kalitesi ve havalandırma dikkate alınmalıdır.
- AB ülkeleri, binaların enerji verimliliğini artırmak için ulusal mali önlemlerin listelerini hazırlamalıdır.

Bu gerekliliklere ek olarak, Enerji Verimliliği Direktifi (2012/27/EU) uyarınca, AB ülkeleri, merkezi hükümetler tarafından sahip olunan ve kullanılan binaların toplam alanının en az % 3'ü kadar enerji verimli yenilemeler yapmalıdır.

Ayrıca, Kyoto Protokolü iklim değişikliklerinden kaynaklanan taahhütlere uymak, küresel sıcaklık artışını 2°C'nin altında tutmak ve 2020'ye kadar toplam sera gazı emisyonlarını 1990 değerlerine karşı en az % 20 oranında azaltılmasını taahhüt etmiş ve gerekli çabayı göstermiştir (Kraus ve Kubeckova 2013). Paris iklim anlaşması, küresel ısınmayı 2100 yılında tahmin edilen ortalama 2,6°C – 3,1°C sıcaklık artışının 1,5°C ile sınırlandırmayı amaçlamaktadır. Bunu başarmak için ülkeler, 2020 sonrası iklim eylemlerini özetleyen “Hedeflenen Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkıları” (INDC's) olarak sunmuştur (Rogelj J. et al. 2016).

Avrupa Birliği, 2020 yılına kadar sera gazı emisyonlarını en az %20 azaltmayı, yenilenebilir enerji payını tüketimin en az %20'sine çıkarmayı ve %20 daha fazla enerji tasarrufu sağlamayı hedeflemiş idi. Ayrıca Tüm Avrupa Birliği ülkelerinde ulaşım sektöründe de yenilenebilir enerjiden % 10 pay alınması öngörölmüştü (AB Türkiye Delegasyonu 2020).

Avrupa Birliği üye ülkeleri tarafından 2030 yılı için mutabakata varılan hedefler ise;

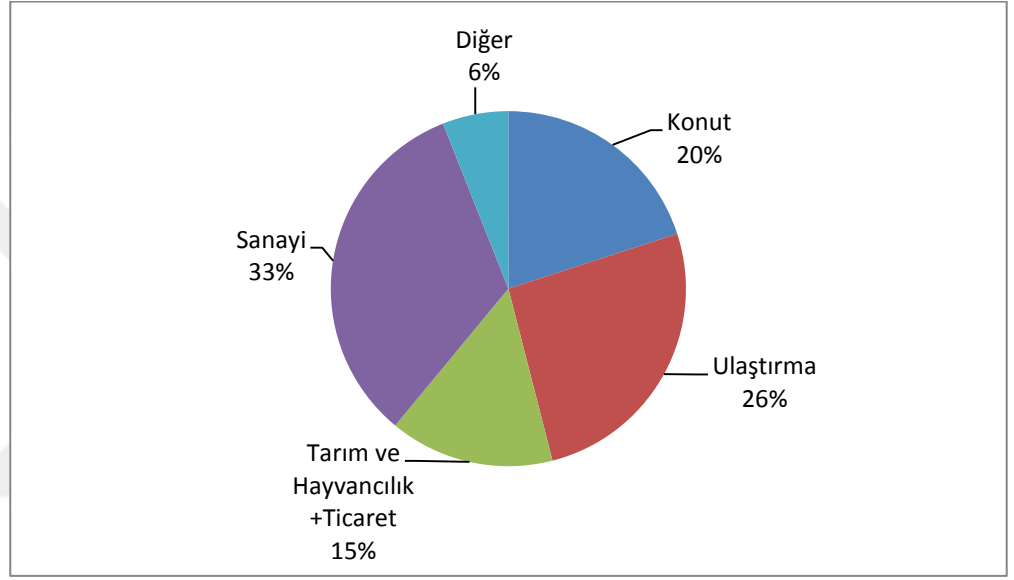
- Sera gazı emisyonlarının 1990 yılındaki değeriine göre %40 azaltmak,
- Tüketilen enerjinin %27'sinin yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesini sağlamak,
- Enerji verimliliğini en az %27 oranında artırmak,
- AB ülkeleri arasında, elektrik dâhili bağlantı hedefi olarak belirlenen %15 oranına ulaşmak ve altyapı projelerini ilerleterek iç enerji piyasasını tamamlamaktır.

Ayrıca AB, sera gazı emisyonlarını 2050 yılına kadar 1990 seviyelerine kıyasla %80-95 oranında azaltmayı uzun vadeli bir hedef (2050 Enerji Yol Haritası) olarak belirlemiştir. 2050 Enerji Yol Haritası, enerji sisteminin geçişini bu sera gazı azaltma hedefiyle uyumlu olacak şekilde araştırırken, aynı zamanda rekabet gücünü ve arz güvenliğini artırmaktadır. Bu hedeflere ulaşmak için, yeni düşük karbon teknolojilerine, yenilenebilir enerjiye, enerji verimliliğine ve şebeke altyapısına önemli yatırımların yapılmasının gerekliliğine dikkat çekiliyor. Yol haritası, 2050'de daha sürdürülebilir, rekabetçi ve güvenli bir enerji sistemine giden dört ana rota belirlemiştir: Enerji verimliliği, yenilenebilir enerji, nükleer enerji, karbon yakalama ve depolamadır.

2.1.2. Ülkemizde Enerji Verimliliği Politikaları

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının paylaştığı denge tablolarına göre ülkemizin dışa bağımlılık oranı 2018 yılında %72,4'dür (MMO 2020). Enerjinin nihai tüketiminin sektörlere göre dağılımında binalar %20 oranı ile önemli bir paya sahiptir (Şekil 2.7) (ETKB 2020). Bu bağımlılığı azaltma adına ülkemizde enerji verimliliği ve tasarruf önlemlerini içeren başlıca yönetmelik, kanun ve düzenlemeler Çizelge 2.1'de yer almaktadır. Bina kullanım sürecinin

verimliliğini ise bina tasarımı, kullanılan malzemeler ve bina işletimindeki verimlilik etkilemektedir. Yapılan uygulamalar, binada alınacak enerji verimliliği önlemleri ile bina enerji tüketimlerinin ortalama %50 civarında azaltılabileceğini göstermektedir. Türkiye’de uygulanan enerji verimliliği politikalarının hedefleri üç ana başlıkta toplanabilir. Bunlar; a) enerji arz güvenliğinin sağlanması, b) enerjide dışa bağımlılıktan kaynaklanan risklerin azaltılması ve c) iklim değişikliği ile mücadele etkinliğinin artırılmasıdır (Tombak, E.T. 2017).



Şekil 2.7. 2018 Yılı Ülkemizde Nihai Enerji Tüketiminin Sektörlere Göre Dağılımı (ETKB 2020)

Tablo 2.1. Ülkemizde binalarda enerji verimliliği ile ilgili başlıca yasa yönetmelik ve standartlar (Tombak, E.T. 2017)

Tarih	Mevzuat	Sorumlu Kurum
1970	TS 825 Standardı	Türk Standartları Enstitüsü - TSE
1977	Isıtma ve Buhar Tesislerinin Yakıt Tüketiminde Ekonomi Sağlaması ve Hava Kirliliğinin Azaltılması Yönetmeliği	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
1981	Bazı belediyelerin İmar Yönetmeliklerinde Değişiklik Yapılması ve bu Yönetmeliklere Yeni Maddeler Eklenmesi Hakkında Yönetmelik	İmar ve İskân Bakanlığı
1984	Mevcut Binalarda Isı Yalıtım ile Yakıt Tasarrufu Sağlanması ve Hava Kirliliğinin Azaltılması Dair Yönetmelik	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
1985	Bazı belediyelerin İmar Yönetmeliklerinde Değişiklik Yapılması ve bu Yönetmeliklere Yeni Maddeler Eklenmesi Hakkında Yönetmelik Değişikliği	Bayındırlık ve İskân Bakanlığı
1998	TS-825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı	Türk Standartları Enstitüsü - TSE
2000	Binalarda Isı Yalıtım Yönetmeliği	Bayındırlık ve İskân Bakanlığı
2007	Enerji Verimliliği Kanunu	Enerji ve Tabii Kaynakları Bakanlığı
2008	MISGP Yönetmeliği (Merkezi Isıtma Ve Sıhhi Su Sistemlerinde Isınma Ve Sıhhi Sıcak Su İhtiyaçlarının Paylaştırılmasına İlişkin Yönetmelik)	Bayındırlık ve İskân Bakanlığı
2008	Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği	Bayındırlık ve İskân Bakanlığı
2010	EKB Ulusal Hesaplama Yöntemine Dair Tebliğ	Bayındırlık ve İskân Bakanlığı
2011	BEP Yönetmeliği	Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
2013	Planlı Alanlar Tip İmar Yönetmeliği	Çevre ve Şehircilik Bakanlığı

Binalarda enerji verimliliğini sağlamaya yönelik ilk düzenleme 1970’de hazırlanan “TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları” standardıdır.

1998 yılında kabul edilen “TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı” binaların ısıtılmasında kullanılan enerji miktarının sınırlandırılması dolayısıyla enerji tasarrufunun yapılmasını esas amaç olarak almıştır.

“2000 yılı Binalarda Isı Yalıtım Yönetmeliği” binalarda ısı kayıplarının azaltılması, enerji tasarrufunun sağlanması amacıyla 14.06.2000 tarihli ve 24043 sayılı Resmi Gazete’de yayınlanarak yürürlüğe girmiştir.

2007 yılında Enerji ve Tabii Kaynakları Bakanlığı tarafından 02.05.2007 tarihli ve 26510 Sayılı Resmi Gazetede yayınlanarak yürürlüğe giren Enerji

Verimliliği Kanunu'nun amacı enerjinin etkin kullanılması, israfının önlenmesi, enerji maliyetlerinin ekonomi üzerindeki yükünün hafifletilmesi ve çevrenin korunması için enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artırılmasıdır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2007). Kanunda enerji verimliliğinin artırılması amacına yönelik uygulamalar, bu kapsamda sağlanacak destekler, ihlali halinde idari yaptırımlar ve çeşitli hükümler ile eğitim ve bilinçlendirme faaliyetleri açıklanmıştır.

2008 Yılı “Binalarda Enerji Performans Yönetmeliği” Enerji Verimliliği Kanununa dayanarak ve Avrupa Birliğinin 2002/91/EC Çerçeve Direktifi baz alınarak çıkarılmıştır. Söz konusu yönetmelik Binalarda Isı Yalıtım Yönetmeliğini yürürlükten kaldırmıştır. Yönetmeliğin amacı; binalarda enerjinin ve enerji kaynaklarının etkin ve verimli kullanılması, enerji israfının önlenmesi, çevrenin korunmasına ilişkin usul ve esasları düzenlemektir. Yönetmelik kapsamında; binanın enerji kullanımını ilgilendiren konularda bina projelerinin hazırlanması, uygulanması enerji kimlik belgesi düzenlenmesi, bina kontrolleri ve denetim faaliyetleri ile ilgili yetkilendirme, enerji ihtiyacının, kojenerasyon sistemi ve yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması, ülke genelindeki bina envanterinin oluşturulması, toplumdaki enerji kültürü ve verimlilik bilincinin geliştirilmesi bulunmaktadır (Bayındırlık ve İskân Bakanlığı 2008).

2011 Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliğine göre yeni inşa edilen binaların “Enerji Kimlik Belgesi” alması zorunlu hale getirilmiştir. Şu an yeni yapılan binalar için BEP-TR programına göre “C” sınıfına ulaşamayan inşaatlara yapı iskânı verilmemektedir.

Belediyelerce uyulması zorunlu olan 2013 yılı Planlı Alanlar Tip Yönetmeliğinde yapılan ilave düzenlemelerle Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği vurgulamakta, mevcut binalarda yapılacak ruhsat işlemlerinde binalarda enerji verimliliği kurallarına uyulması ve enerji kimlik belgesinin düzenlenmesi zorunluluğu getirilerek ve çevre dostu, enerji verimli, sağlıklı, yaşanabilir yerleşmeler teşvik edilmektedir.

2.1.3. Pasif Binalarda Enerji Verimliliği

Pasif binalar, çok düşük ısıtma enerjisi talebi olan, konforlu iç ortam koşulları ve iç hava kalitesi sağlayan akıllı binalardır (Liang et al. 2017). Janson (2008)'a göre pasif bir evin temel fikri, çok iyi yalıtımlı ve mekanik

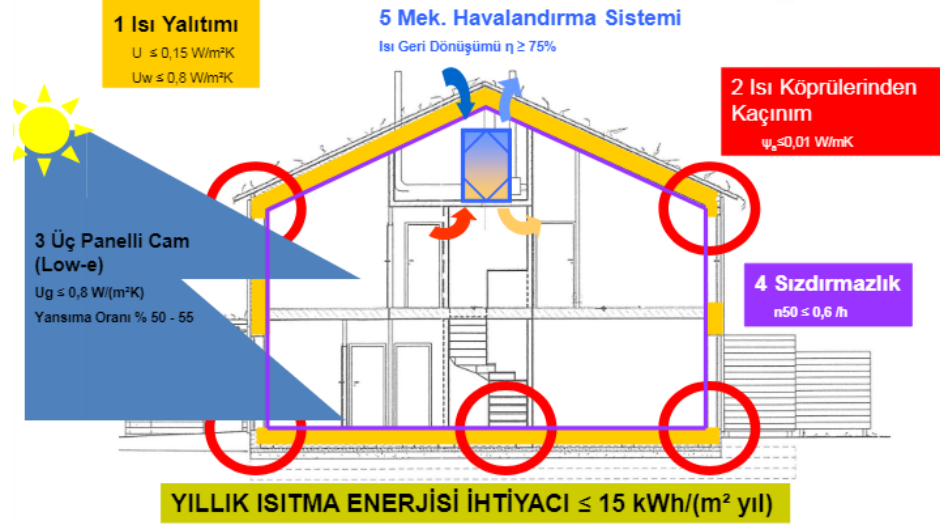
havalandırılmalı hava geçirmez bina kabuğuna dayanmaktadır. Pasif Ev Enstitüsüne göre ise enerji verimli, konforlu, ekonomik ve aynı zamanda çevre dostu bir bina standardıdır (Passive House Institute, 2020).

Pasif ev temel konsepti ve fikri, 1988'de Profesör Bo Adamson tarafından ortaya atılmış olup Dr. Wolfgang Feist desteği ile geliştirilmiştir. İlk pasif ev 1991 yılında Almanya, Darmstadt Kranichstein'da inşa edilmiştir. Pasif ev inşası için enerji standardını teşvik etmek ve kontrol etmek için 1996 yılında Almanya, Darmstadt'ta Dr. Feist tarafından kurulan Pasif Ev Enstitüsü, mimari, mühendislik alanında bilimsel çalışmalar, ürün geliştirme, sertifikalandırma ve eğitim bağlamında öncü rolünü sürdürmektedir (Passipedia 2021a).

Bir binanın Pasif Ev sertifikasını alabilmesi için sağlaması gereken koşullar aşağıda yer almaktadır (Liang et al. 2017):

- Birincil enerji talebinin metrekare başına $< 120 \text{ kWh}$ olması,
- Alan ısıtma enerjisi talebinin metrekare başına yılda 15 kWh'yi geçmeyecek miktarda olması,
- Hava geçirimsizlik performansı açısından ise 50 Pascal basınç altında hava değişim oranının (n_{50}) $0,6 \text{ h}^{-1}$ değerini aşmaması,
- Tüm yaşam alanlarında yaz aylarında olduğu gibi kışın da ısı konforun sağlanmasıdır.

Pasif ev tasarım ilkeleri Şekil 2.8'de görülmektedir.



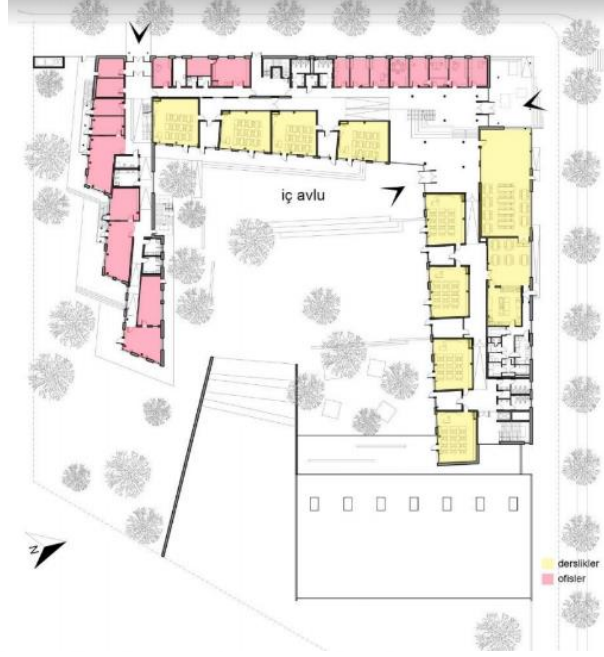
Şekil 2.8. Pasif Ev Tasarım İlkeleri (Bulut N.)

Pasif Ev enerji verimliliği açısından ön planda gelmekte olup farklı iklimlerde uygulanabileceği kanıtlandığı için 2016 yılına kadar dünyada 60.000'den fazla pasif bina inşa edilmiştir (Passipedia 2021b). Bir eğitim binası olan Riedberg İlkokulu 2004 yılında pasif ev ilkelerine göre Almanya'nın Frankfurt şehrinde inşa edilmiştir (Şekil 2.9). Burada 2002 yılında kent konseyi ve belediye meclisinin “gelecekteki tüm anaokulları ve okulların pasif ev tasarım kriterleriyle inşa edileceği” şeklinde aldığı karar etkili olmuştur (Bretzke 2006).



Şekil 2.9. Riedberg İlkokulu Avludan Görünüş – Batı Cephesi (Peper et al. 2011)

Riedberg İlkokulu avlu etrafında konumlanan 3 kollu plan şeması ile toplam 8785 m² brüt taban alanına sahiptir (Şekil 2.10); bina kabuğu U-değerlerinin (çatı U-değeri:0,11 W/m²K, dış duvar U-değeri:0,16 W/m²K, zemin döşemesi U-değeri:0,21 W/m²K, pencere U-değeri 0,8 W/m²K) oldukça düşük olduğu görülmektedir. Yapı elemanlarına ilişkin ayrıntılı malzeme özellikleri Tablo 2.2.'de yer almaktadır.



Şekil 2.10. Riedberg İlkokulu Zemin Kat Planı (Bretzke 2005)

Tablo 2.2. Riedberg İlkokuluna ait Malzeme Özellikleri ve U-Değerleri (Ünlütürk S. 2020)

Yapı Elemanları	Kuruluş-Malzeme Özellikleri	U Değeri [W/m ² K]
ÇATI	-Yalıtımlı boşluksuz düz çatı kaplaması -280 mm betonarme döşeme -300 mm ısı yalıtımı (EPS)	0,11
DIŞ DUVARLAR	-200 mm betonarme kolon -280 mm taş yünü -Paslanmaz çelik eternit -Cephe paneli	0,16
BODRUM ZEMİNİ	-5mm linolyum -12.5 mm alçıpan lif levha -2x15mm fibrokarbon paneller -20 mm ses izolasyonu -100 mm ısı yalıtımı (EPS) -12,5 mm alçıpan -500 mm betonarme	0,21
PENCERELER	-Üç camlı, soygaz dolgulu cam sistemi	0,8

Okulun pasif ev standardına göre inşası Almanya’da geçerli olan EnEv standardına göre yaklaşık %5,8 oranında ek maliyet içermektedir. Ancak benzer projelerden edinilen deneyimlere göre %5-8 arasındaki ek maliyetin 10-20 yıl içinde amorti edildiği belirtilmektedir (Bretzke 2005).

Pasif ev yalıtım standardını ve hava sızdırmazlığını (n_{50} : $0,46 \text{ h}^{-1} < 0,6 \text{ h}^{-1}$) karşılamasının yanı sıra, yalıtımlı bir bariyer ile toprağa ısı kaybı en aza indirilmiştir. Yapıda, dış panjurlar ve gece soğutması desteği ile yaz döneminde de pasif ev standardından bağımsız olarak ısı konfor sağlanmaktadır. Toplam kapasitesi $21.700 \text{ m}^3/\text{h.s}$ olan altı havalandırma sistemi, yüksek verimli ısı geri kazanım sistemleri (%84) ile donatılmıştır; fakat bina içerisindeki soğuk havalandırma kanallarının uzunluğu nedeniyle efektif ısı geri kazanım oranının % 74’e düştüğü belirtilmektedir. Bu durum, bina içerisinden geçen soğuk kanalların yalıtımlı olsalar bile mümkün olduğunca kısa olması gerektiğini göstermektedir (Passipedia, 2020). Tablo 2.3’te Riedberg İlkokulu’nun spor salonu hariç enerji parametreleri ve pasif ev standart değerleri yer almaktadır.

Tablo 2.3. Riedberg İlkokulunun Spor Salonu Hariç Enerji Parametreleri ve Pasif Ev Standart değerleri (Bretzke 2005)

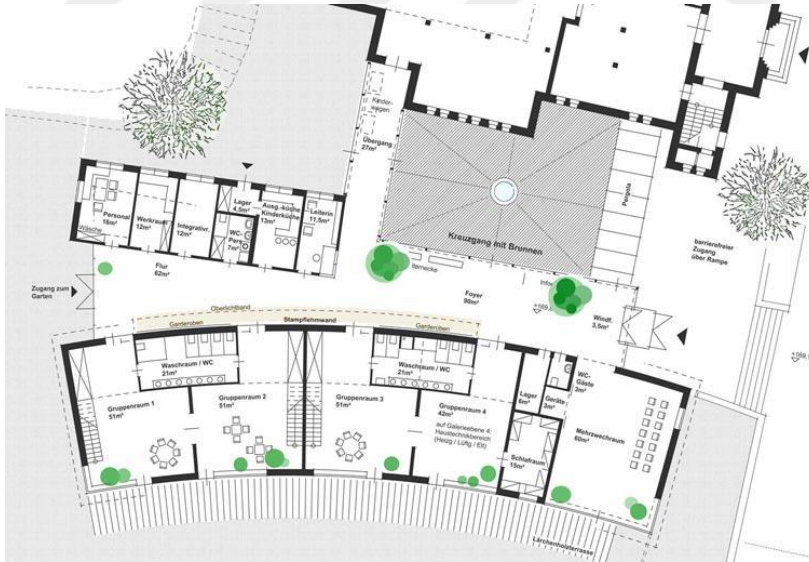
	Riedberg İlkokulu	Pasif Ev Standardı
Isı	15,0 kWh/m ² a	15,0 kWh/m ² a
Isıtma Yüğü	10,5 W/m ²	
Sızdırmazlık (n_{50})	0,46 h ⁻¹	0,6 h ⁻¹
Havalandırma (Yaklaşık)	0,44 Wh/m ³	0,45 Wh/m ³
Birincil Enerji Talebi	41 kWh/m ² .a	PH: 120
Birincil enerji payı elektrik talebi	33 kWh/m ² .a	
Kojenerasyon tesisi boruları merkezi ısıtma kullanarak 30 yılda (EnEV göre -%30) CO2 tasarrufu	1000 t	
Aydınlatma sınıfı	< 6 W/m ² (<2 W/100lux/m ²)	

Bir diğer eğitim binası örneği ise Almanya’nın Döbeln şehrinde pasif ev konsepti ile tasarlanan, iç avluya sahip ve 2006 yılında yapımı tamamlanan St. Florian anaokuludur (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. St. Florian Anaokulu Ön Cephe Görünümü (Passipedia 2021d)

Anaokulunda 4 grup odası bulunmakta olup toplam taban alanı 623 m^2 ve hacmi 3144 m^3 'tür. Şekil 2.12'de anaokuluna ait mimari plan görülmektedir (Informationsdienst-holz 2021).



Şekil 2.12. St. Florain Anaokulu Mimari Planı (Passipedia 2021d)

Pasif ev tasarım konseptinde cam yüzeylerin ağırlıklı olarak güneye yönlendiği ile güneşten pasif kazanç eldesi kriter olmakla birlikte, bu

uygulamada mevcut bina ile ilişkilendirilmesi açısından kuzeye yönelik cam yüzeyler de düzenlenmiştir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. St. Florian Anaokulu Kuzeye Yönelik İç Mekan Perspektifi (Passipedia 2021d)

Binanın tüm dış duvarları ve çatı ahşap çerçeve konstrüksiyona sahiptir. Duvarlar, iç kısımda çift T-kiriş ($d = 36 \text{ cm}$) ve 4 cm kalınlığında yumuşak ahşap lifli OSB panelleri ile desteklenmiştir. Isı geçirgenlik katsayısı (U-değeri) $0.11 \text{ W/m}^2\text{.K}$ olup bina kabuğunda ısı köprüleri engellenmiştir. Ahşap çerçeveli pencerelerde 3 katmanlı cam sistemi uygulanmıştır; U-değeri $0,85 \text{ W/m}^2\text{.K}$, g-değeri ise %55'dir. İç mekânlarda tavan kaplamaları lamine masif ahşaptır ve bina yangın dayanımı açısından F30-B sınıfına sahiptir. Planlama aşamasında başlangıçta PHPP hesaplamalarında ısıtma ihtiyacı sınır değeri $15 \text{ kWh/m}^2\text{.yıl}$ bir miktar aşılmış olmakla birlikte alınan önlemler ile parapet düzenlenmesi ve cam yüzeyin azaltılması sonucu pasif ev gereksinimleri karşılanmıştır (Informationsdienst-holz 2021).

Duvarlardaki renkli karaçam ahşap kaplama, havalandırmalı yeşil bir çatı ve tekstil perde gölgeleme elemanlı ahşap pencereler, yaz döneminde optimum düzeyde koruma sağlamaktadır. Yaz ve kış döneminde nem ve iç ortam hava kalitesinin iyileştirilmesi amacı ile iç mekânda bitkilerin kullanımı dikkat çekmektedir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. St. Florian İç Mekan Bitkilendirilmesi (Passipedia 2021d)

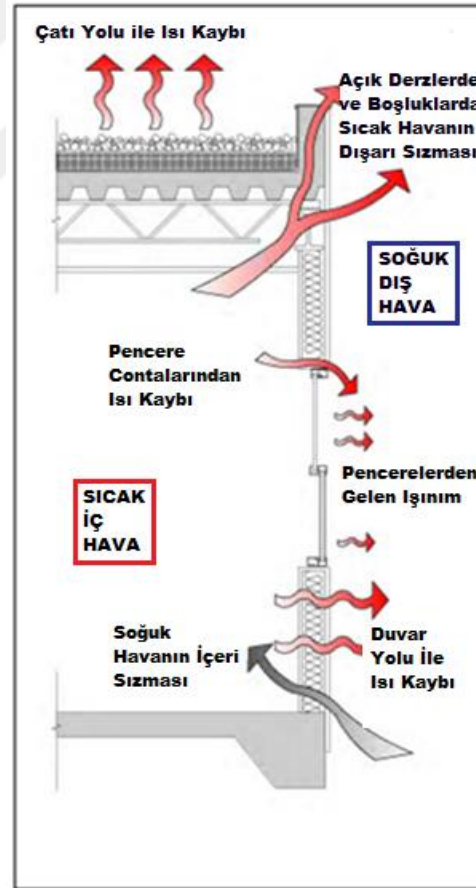
Pasif evin temel enerji gereksinimi güneşe bakan pencerelerden gelen güneş enerjisinden pasif kazanç ile gerçekleşir. Anaokulu uygulamasında ek ısı kaynakları güneş kolektörleri ve bağlantılı binadaki (kilise) mevcut düşük sıcaklıklı gaz kazan sistemidir. Çocuk grup odalarında ısıtma, kil siva içine döşenen difüzyona dayanıklı metal kompozit borulardan yapılmış duvar ısıtma yüzeyleri ile sağlanır. Havalandırma sistemi atık ısı geri kazanımı ile desteklenmektedir (Informationsdienst-holz 2021).

2.2. Enerji Verimliliğinde Bina Kabuğunun Rolü ve Sızdırmazlık

Bina kabuğu dış ortam ile iç ortamla arasında farklı iklimsel koşullara maruz kalır ve binalarda en fazla enerji kaybının meydana geldiği bölümdür. Bina kabuğunun tanımlanmasında kullanılan ana faktörler: işlevi, özellikleri ve tüm binalar üzerindeki etkileridir (Mansour W.S. 2020). Brock (2005), bina kabuğunu "Bina yapısının iskeleti tarafından desteklenen bir binanın dış yüzüdür" şeklinde tanımlamış; bina kabuğunun temel işlevini, güvenli bir yaşam alanı sağlaması olarak belirtmiştir. Bina kabuğu mekânların gün ışığı, ısı, akustik, güneş kontrolü, hava kalitesi, yangına dayanıklılık ve nem kontrolü gibi gereklilikleri karşılayarak konfor ve güvenliğin sağlanmasından sorumludur.

Bina kabuğu ayrıca estetik kalitede inşa edilmiş bir çevre sağlamaya da katkıda bulunur. Dolayısı ile binanın yaşam döngüsü boyunca yerel çevre ve maliyet yönetimi üzerinde oldukça büyük bir etkiye sahiptir (Leung vd. 2005). Bina kabuğunun özellikleri, bina enerji verimliliği ve iklimlendirme sistemi enerji tüketimini önemli ölçüde etkilemektedir (Lin vd. 2021). Bina kabuğu özelliklerinin bir binada çevresel, işlevsel, sosyal ve ekonomik yönleri ile sürdürülebilirlik bağlamında da etkili olabileceği belirtilmektedir (Berardi 2013).

Bina kabuğu, bir binanın koşullandırılmış iç ve dış ortamı arasındaki fiziksel arabirimdir, HVAC ekipmanına olan talebi azaltan, iç mekân konforunu artıran ve bina bileşenlerinin ömrünü uzatan bir termal kalkan işlevini üstlenir. Böylece ısı geçişi en aza indirgenerek, mekânların ısıtılması ve soğutması için gerekli enerji miktarı önemli ölçüde azaltılabilir (Kadlubowski and Yates 2009). Şekil 2.16'da soğuk dönemde bina kabuğundan iç ve dış ortama ısı geçişleri görülmektedir.



Şekil 2.15. Bina Kabuğunda Meydana Gelen Isı Geçişleri
(Kadlubowski and Yates 2009)

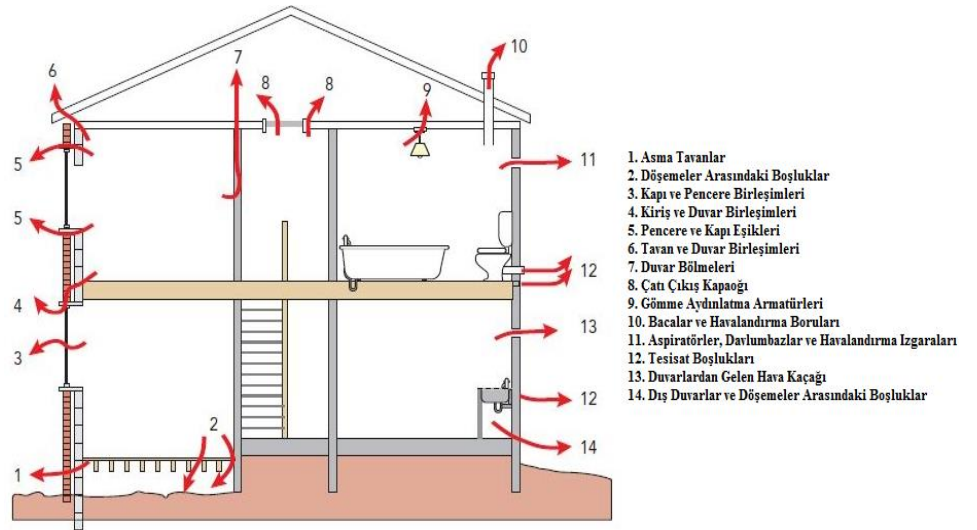
Bina kabuğunda ısı geçişlerinin yanı sıra enerji kaybına neden olan önemli etmenlerden biri de hava sızıntılarıdır. Hava sızıntılarının düzeyi bina kabuğunun enerji performansı açısından önemli bir faktördür. Tüm yeni binaların gerekli yalıtım seviyesine sahip olduğu varsayılırsa, hava sızdırmazlığı bir bina kabuğunun enerji açısından verimli olup olmayacağının önemli bir belirleyicisidir (Fennell and Haehnel 2005).

Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı (DOE), bir binayı ısıtmak veya soğutmak için tüketilen enerjinin yaklaşık %40'lık miktarının bina kabuğundan içe veya dışa gerçekleşen hava sızıntısından kaynaklandığını belirtmiştir. Ayrıca, Kuzey Amerika Yalıtım Üreticileri Derneği (NAIMA) tarafından 1990-1997 yılları arasında yalıtımın bir hava bariyeri sistemi olarak rolünün test edildiği çok sayıdaki araştırma projelerinden elde edilen sonuç raporunda “Yalıtım bir evde enerji tasarrufunda önemli bir rol oynasa da hava sızıntısını azaltmadaki rolü ihmal edilebilir düzeydedir.” şeklinde belirtmiştir (Fennell and Haehnel 2005).

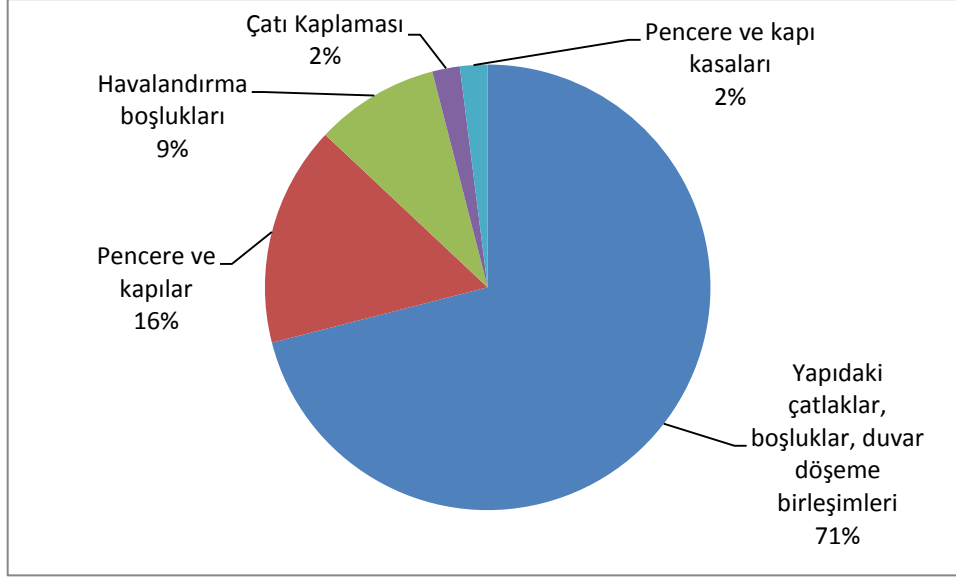
Hava sızdırmazlığı için bir sınır belirlemek, bilinen bir kontrolsüz hava sızıntısını telafi etmek ve az miktarda enerji için ısıtma ve soğutma sisteminin tasarımının optimize edilmesine katkıda bulunabilir. Bunun sebebi ise tasarımcının bina kabuğu boyunca kayıpların seviyesi hakkında güvenilir verilere sahip olmasıdır. Hava sızdırmazlığı için çeşitli standartlar kabul edilmiştir. Hava sızdırmazlık standartları, ayrıca bina kabuğundaki sorunların nedenleri hakkında tasarımcı ve inşaat sektöründe uygulamacılar açısından farkındalığı artırmak ve geçirimsiz bir bina kabuğu tasarımı için gerekli eğitimi ve bilinci teşvik etmek, bina enerji verimliliği ve kullanıcı konforun açısından yarar sağlayacaktır.

3. SIZDIRMAZLIK

Hava kaçağı, bir binanın kabuğundaki boşluklardan ve çatlaklardan kontrolsüz hava akışıdır (bazen sızma veya cereyan etme olarak adlandırılır). Binalarda enerji verimliliğinin artması ve gelecekte karbon nötr, sıfır emisyon hedefleri ile yasal düzenlemelere uyum gösterilmesinin gerekliliği, hava sızdırmazlığının önemli bir performans göstergesi olduğuna dikkat çekmektedir. Hava sızıntıları ile ilişkili enerji kayıplarının nispi oranı, bina ısı yalıtımının son dönemlerde iyileştirilmesi sonucu artmıştır. Hava sızdırmazlığı temel olarak bina kabuğu yoluyla oluşan sızma seviyesini belirler ve binanın havalandırılmasını etkiler. Bina kabuğundaki çatlaklar, boşluklar veya diğer potansiyel açıklıklardan hava hareketi olarak tanımlanan hava sızıntısı terimi de sıklıkla gereksiz havalandırma olarak adlandırılır (Zheng et al. 2019). Bir basınç altında diferansiyel hava kaçağı öncelikle sayısız çatlak, boşluk, yanlış tasarlanmış veya inşa edilmiş derzler, tesisat geçişleri, duvar ile pencere ve kapı çerçeveleri arasındaki bağlantılar, duvar ve çatı tertibatları arasındaki bağlantı vb. bölgelerde meydana gelir. Şekil 3.1’de bina kabuğunda yaygın hava sızıntı bölgeleri ve Şekil 3.2’de ise hava sızıntı bölgelerinin dağılımı oranları yer almaktadır.



Şekil 3.1. Bina Kabuğu Hava Sızıntı Bölgeleri (Tipperary Energy Agency 2021)



Şekil 3.2. Bina Kabuğu Hava Sızıntı Bölgelerinin Dağılımı (Tipperary Energy Agency 2021)

Bina hava kaçağının, ısıtma ve soğutmanın gerekli olduğu yerlerde bina enerji kaybına önemli ölçüde neden olduğu yaygın olarak kabul edilmektedir. Max Howard Sherman (1980), çalışmasında hava kaçağının çoğu konut ve binalardan kaynaklanan toplam enerji kaybının önemli bir bölümünü oluşturduğunu ve binalarda hava sızıntısı nedeniyle ülke toplam enerji bütçesinin % 6 ila % 9'unun kaybedildiğini belirtmiştir. İyi derecede bina kabuğu hava sızdırmazlığı, iç ortamın kontrol edilmesini kolaylaştırır; etkili ve verimli bir havalandırmaya olanak sağlar. Ancak kontrolsüz bir hava sızdırmazlığı (yüksek sızma) ise ısı kayıplarına neden olmakla birlikte, ayrıca havanın bina kabuğu içerisine nüfuz etmesine izin vererek olası yapı fiziki sorunları nedeni ile binanın kullanım süresini (ömrünü) de etkiler. Bina enerji kaybına etkisi ve bina sektöründeki enerji tüketiminin geniş koşullu küresel enerji kullanımını temsil ettiği gerçeği göz önünde bulundurularak bina nitel değerlendirme normunda hava sızdırmazlığını dikkate almak önemlidir.

3.1.Genel Sızdırmazlık Sorunları

Bina kabuğunda meydana gelen hava kaçaklarının bina enerji performansı, ekonomi, kullanıcı sağlığı ve konforu üzerinde etkileri vardır. Dolayısı ile iç ve dış ortam arasında istenmeyen/kontrolsüz hava akımı gerçekleşen bir bina kabuğu, binanın ısı ve nem performansı, yangın güvenliği, gürültü kontrolü ve iç ortam hava kalitesini olumsuz etkileyen sorunlara neden olabilir.

3.1.1. Isı Sorunları

Bina ısı kayıpları, çeşitli enerji performans yönetmelik ve standartlarına uyulmak kaydıyla uzun yıllar boyunca sürekli azaltılmıştır. Yapı malzemelerinin ısı performansında yapılan iyileştirmeler, daha az sızdıran bina kabuğunun tasarlanması ve inşa edilmesinin önemini artırmıştır (ATTMA TSL1 2010). Yapının hizmet ömrü boyunca bina kabuğundan yazın istenmeyen ısı kazançlarının, kışın ise ısı kaçaklarının en düşük düzeyde tutabilmesi sonucunda ısıtma ve soğutma yüklerinin en aza indirgenmesi ile sağlanan ısı performans enerji verimliliğinde istenilen bir etkidir (durumdur). Bina kabuğundan ısı kazanç ve kayıpları bilindiği üzere iletim, taşınım ve ışıınım yoluyla gerçekleşir. İç ortam ve dış ortam arasında hava sızıntısı ile taşınan ısı, binada ısı kayıp ve kazançlarına neden olur. İç ortamda hava sızıntısı ile kazanılan veya kaybedilen ısınin dengelenmesi amacıyla enerji harcanması enerji maliyetlerini arttırmaktadır. Sonucunda artan enerji tüketimi fosil kaynaklı olması nedeniyle karbon salımını da tetiklemektedir (Sular 2017).

3.1.2. Nem Sorunları

Bina kabuğundan hava sızıntısı yolu ile taşınan su buharı miktarı difüzyon yolu ile emilen su buharı miktarından fazladır (Sular 2017). Bina kabuğundaki sızıntılardan, yağmur ve yeraltı suyu, kılcal hareket, yüzey gerilimi, yerçekimi, rüzgâr ve hava basıncındaki farklılıklar yoluyla binaya önemli miktarda nem (su buharı) girebilir. Dış ortamdaki nemli hava sızıntı bölgelerinden iç ortama nüfuz edebilir. Dolayısı ile bir bina kabuğunun dayanıklılığını etkileyen önemli faktörlerden biri olarak nem, bina kabuğunun işlevlerini yerine getirme kabiliyetini azaltabilir. Yapıya nüfuz eden nem, küf, mantar oluşumu ve diğer mikrobiyal bulaşmanın yanı sıra yapıda korozyon, çürüme ve diğer nemle ilgili bozulmalara neden olabilir (Lstiburek 2002). Ayrıca iç ortamda biriken nemli hava insan sağlığı açısından zararlı mikroorganizmaların artmasına sebep olarak iç ortam hava kalitesini olumsuz etkiler, böylece bireylerde solunum sistemi ve çeşitli cilt rahatsızlıkları oluşmasına neden olabilir (Clancy 2011).

3.1.3. Ses Sorunları

Bina kabuğu sızdırmazlığı ve ses arasındaki ilişkiyi belirlemek amacı ile yapılan çalışmalar da mevcuttur. Iordache and Catalina (2012), bina hava kaçağı akışını akustik bir yöntem ile analiz ederek pencere derzlerinden hava ve gürültü

aktarımının ilişkili olup olmadığını ve iki aktarım arasındaki ilişkinin ne olduğunu belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu ilişkiyi analiz etmek için, aynı bina cephesi için hem hava akışı transferini (sızma) hem de pencere derzlerinden havayla taşınan gürültü transferini ölçmüşlerdir. Hava değişim hızının ses iletim kaybıyla ters orantılı olduğu; ses iletim kaybı ne kadar yüksek olursa, hava sızma hızı o kadar düşük olur sonucuna varmışlardır.

Varshney et al. (2013), çalışmasındaki amacı, çeşitli tipteki delikler ve çatlaklar yoluyla ses iletim kaybı (STL) kullanan binalarda hava sızmasını belirlemektir. Yöntem, bina içinde bilinen bir frekansta ses dalgaları yayan bir ses kaynağının ve bina içindeki-dışındaki ses basınç seviyesini ölçen iki ses seviye ölçerin kullanılmasına dayanmaktadır. Ses iletim kaybı ve hava sızması arasında bir ilişki geliştirmek için çeşitli malzeme türleri kullanılarak deneyler yapılmıştır. Bir test odası, iç ve dış hava koşullarını simüle etmek için iki alt odaya bölünmüştür. Her biri farklı şekil ve boyutlarda küçük bir deliğe sahip çeşitli malzemeler, iki alt oda arasına yerleştirilerek, alt odalar arasında bir basınç farkı oluşturulmuş, her deneyde her bir delikten hava sızması ölçülmüştür ve STL ile hava sızması arasında bir ilişki tanımlanmıştır. Kullanılan tekniğin sonuçları Blower Door Test okumaları ile karşılaştırıldığında; hava sızdırmazlığını ölçmek için alternatif ve yararlı bir metot olduğu kanısına varmışlardır.

3.1.4. Yangın Güvenliği

Yangın sırasında mekanda açığa çıkan gazların, insanların sağlığı ve yaşamı üzerindeki etkisi çok önemlidir. İstatistiksel verilerden, yangın mağdurlarının yaklaşık %80'inin, boğucu, tahriş edici ve uyuşturucu bir etkiye sahip olan sentetik polimer malzemelerin ayrışması ve yanması sonucu oluşan toksik ürünlerin solunması nedeniyle hayatını kaybettiği bilinmektedir. Gałaj and Saleta (2020), konut hava sızdırmazlığının yangın esnasında yayılan zehirli gaz konsantrasyonlarına etkisini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Polonya Bytom'da bulunan 1976 yılında prefabrike betonarme olarak inşa edilen 5 katlı örnek bir binadaki iki yangın testinde, yangın sırasında açığa çıkan gazların konsantrasyonlarını kaydedip analiz etmişlerdir. Yangın testleri sırasında açığa çıkan tüm toksik gazların (NO_2 hariç) konsantrasyonları, sızdırmaz bir apartman dairesinde daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Analize dayalı olarak, sızdırmazlığı artırmanın yangın ortamının toksitesini artırabileceğini öne süren sonuçlar formüle edilmiştir.

3.2. Hava Sızdırmazlığının Enerji Verimliliğine Etkisi

Bina kabuğunda içeriden dışarıya ya da dışarıdan içeriye istenmeyen ve kontrolsüz hava kaçağı, ısı yalıtımının verimliliğini ve yapının ısı direncini azaltarak havalandırma ile ısı kayıplarını artıracaktır. Dolayısı ile ısıtma amaçlı artan enerji talebi, işletme ve bireyler için yüksek enerji tüketimi nedeni ile ekonomiyi olumsuz etkiler.

Binalarda hava sızdırmazlığının enerji tüketimi üzerindeki etkisini araştırmak üzere çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Emmerich et al. (2007), düşük katlı ABD ticari binalarında bina kabuğu hava sızdırmazlığına yönelik yapılan iyileştirmenin, enerji ve maliyet üzerindeki etkisini saptamak amacı ile simülasyon çalışması yapmışlardır. Mevcut binalardaki ölçümlere dayanarak, hedef sızdırmazlık seviyesinde binaların enerji kullanımını tahmin etmek için birleştirilmiş çok bölgeli hava akışı ve bina enerji simülasyon aracı kullanarak potansiyel ısıtma ve soğutma için yıllık enerji kullanımı ve maliyet tasarrufunda %9 ile %36 arasında değişmekte olan bir değere ulaşmışlardır. Yine Emmerich and Persily (1998) çalışmalarında, sızdırmazlığın ABD ofis binaları için ısıtma yükünün yaklaşık %13'ünden ve soğutma yükünün %3'ünden sorumlu olduğunu, daha yeni binalarda ise yüksek yalıtım seviyeleri nedeniyle ısıtma yükünün yaklaşık %25'inden, soğutma yükünün de %4'ünden sorumlu olduğunu belirtmişlerdir. Moll (2012), iyi hava sızdırmazlık performansına sahip yapıların, 0 °C altındaki kış koşullarında konforlu bir iç ortam elde etmek için 1m² koşullu alanı ısıtmak için 10 kWh yeterli olacağını belirtmiştir. Ayrıca, iyi ısı yalıtımı ve hava geçirmez inşaat teknolojilerine sahip yeni uygulamaların (Alman evleri) yaklaşık 60 kWh/m².yıl tüketime sahip olduğunu vurgulamıştır. Aynı yazar, hava sızdırmazlığı zayıf olan ve sızıntılardan kaynaklanan ısı kayıpları olan binalarda her 1m² yaşam alanı için yıllık 500 kWh'yi aşan bir enerji tüketiminin yaygın olduğunu belirtmiştir. Şahin vd. (2015), İzmir'de çok katlı bir apartmanda bulunan konutta hava sızdırmazlık değerinin enerji tüketimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Blower Door Test ile konuta ait hava sızdırmazlık değerini belirleyerek hava sızdırmazlık değerinin 0,5 h⁻¹ iyileştirilmesinin konutun yıllık ısıtma amaçlı enerji tüketimi üzerine olan etkisini bina enerji simülasyon aracı yardımıyla belirlemişlerdir. Hava sızdırmazlık değerindeki iyileştirmenin yıllık enerji tüketiminde %3'lük bir azalma sağladığı ve bu değer ısı yalıtımının da eklenmesi ile %13 seviyesine çıktığı belirtilmiştir.

Bekboliev et al. (2018), 4 farklı tip prefabrik konteyner yapısında yapılan iyileştirme sonucu Blower Door Test ile hava geçirimsizlik performansında yaklaşık %81 ve yıllık enerji talebinde ise %9,3 lük bir düşüş sağlanacağını belirtmiştir.

3.3. Hava Sızdırmazlığının İnsan Sağlığına Etkisi

Hava sızdırmazlığının insan sağlığına olan etkisinin olumlu ve olumsuz yönlerinin, yapılan araştırmalarda ve kaynaklarda ayrıntılı olarak ele alındığı görülmektedir. Hava sızdırmazlık performansı düşük binalarda dış ortamda bulunan çeşitli gazlar ve partiküller, sızan hava ile birlikte bina kabuğundan iç ortama taşınabilir. Özellikle sanayi bölgelerine yakın yerleşim yerlerinde, sanayi kuruluşlarından çeşitli kimyasal gazların ve partiküller halinde havaya karışan yabancı maddelerin binalarda iç ortama girişiyle insan sağlığı açısından tehlike oluşturabilir.

Binaların hava sızdırmazlık performansının artırılması ise ısıtma ve soğutma için gerekli enerji talebini dengelemek için önemli olmakla birlikte belli bir sızdırmazlık performansının üzerine çıkıldığında insan sağlığını olumsuz etkileyebilir. İç mekan malzemelerinde, mobilyalarda ve günlük kullanılan eşyalarda bulunan çeşitli kimyasallar nedeniyle sağlıklı bir iç ortamın korunması amacıyla yeterli havalandırmanın sağlanması önemlidir. Hava geçirmez binalarda iç mekân hava kalitesini artırmanın bir yolu, yüksek düzeyde uçucu organik bileşikler yayan malzemelerin kullanımını azaltmak ve yeterli havalandırmayı sağlamaktır. Havalandırma sistemlerinin yeterli olmadığı binalarda “hasta bina sendromu” olarak adlandırılan sağlık sorunları ilk olarak enerji tasarrufu önlemi olarak hava değişim oranının (n_{50}) düşürülmesi sonucu olarak ortaya çıktığı belirlenmiştir. Uygun hava kalitesinin sağlanabilmesi için Amerikan Isıtma, Soğutma ve Havalandırma Mühendisleri Derneği (ASHRAE) tarafından önerilen değerler; CO₂ konsantrasyonu için 1000 ppm ila 2500 ppm aralığında olup havalandırma için ise kişi başına 10 l/sn’dir (Vorsatz et al. 2012). İç ortam hava kirleticileri ve emisyon kaynakları Tablo 3.1’de görülmektedir.

Tablo 3.1. İç Ortam Hava Kirleticileri ve Emisyon Kaynakları (Vorsatz et al. 2012)

	Kirletici	Emisyon Kaynağı
GAZLAR	CO ₂	Yanma İşlemi, garaj egzozu, sigara dumanı
	CO	Yanma İşlemleri (ısıtıcılar, sobalar, şömine), garaj egzozu, sigara dumanı
	NO ₂	Yanma İşlemleri, garaj egzozu, sigara dumanı
	O ₃	Fotokopi makinesi, yazıcılar
	SO ₂	Gaz Sobaları
	Formaldehit	Ahşap mobilyalar, halılar, duvarlar ve tavan boyları, izolasyon malzemeleri, reçineler, yapıştırıcılar, laminant parkeler, döşemelikler, dezenfektanlar.
	UOB	Mobilyalar, halılar, vernikler, çözücüler, oda parfümleri, deterjanlar, yapıştırıcılar, yanma işlemleri, boyalar, yer ve duvar kaplamaları, laminant parkeler, kuru temizleme ile temizlenen elbiseler, böcek ilaçları
	Radon	Topraktan difüzyon yolu ile
BİYOAEROSOLLER	Allerjenler	Ev tozları, evcil hayvanlar, böcekler, polenler
	Mantar Sporları	Bitkiler, gıda maddeleri
	Bakteriler, Virüsler	İnsanlar, evcil hayvanlar, bitkiler, havalandırma cihazları
	PAH	Yanma işlemleri, sigara dumanı

Bornehag et al. (2004) tarafından İsveç'te 390 hanede gerçekleştirilen alerji semptomlarına ilişkin vaka kontrol çalışmalarında, alerji semptomları olan vaka grubunun hava değişim oranının 0,5 h⁻¹'den daha düşük olduğu saptanmıştır. Seppänen et al. (1999) ise çalışmasında düşük hava değişim oranında hasta bina sendromunun ve diğer hava bulaşıcı hastalıkların arttığını belirtmiştir. Osawa and Hayashi (2009), Japonya'da 2800 hanede kimyasal konsantrasyonunun ölçülmesi sonucunda hanelerin % 27,3'ünde formaldehit oranının sınır değerden daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. Sonuç olarak, revize edilmiş ülke bina standartlarına ilişkin yasalar, yeni inşa edilen binaların oturma odalarında hava değişim oranının en az 0,5 h⁻¹ oranında güvence altına alınması gerektiğini öngörmektedir. Hava sızması sonucu dış mekân kirleticilerinin iç mekânlara taşınması ile iç mekân hava kalitesini olumsuz etkileyeceği bilinmektedir. Bununla birlikte dış mekân kaynaklı kirleticilere, tersi durumda (sızdırmaz bir yapıda) ise, ortamdaki yetersiz hava değişimi, tütün dumanı gibi iç kaynaklı kirleticilere ve inşaat malzemelerinden, pişirme veya temizleme faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonlara yüksek oranda maruz kalılabilmektedir (Chan et al. 2005)

Shrestha et al. (2019) çalışmalarında “Colorado Ev Enerji Verimliliği ve Solunum Sağlığı” (CHEER) ile yıllık ortalama sızma oranları ve insan sağlığı arasındaki ilişkiyi 226 adet düşük gelirli hanede yaptıkları sızdırmazlık testleri ile incelemişlerdir. Yüksek sızıntıya sahip evlerin daha sağlıklı olduğu sonucuna varmışlardır. Ana yollara yakın yüksek sızıntılı evlerde iç mekan toz seviyelerinin en yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca CHEER çalışmasında toplanan solunum anketi verileri ile sızdırmazlık test sonucu analizleri, yüksek sızdırmazlık seviyesindeki evlerde yaşayan bireylerde solunum sağlığı açısından olumsuz etkilerin bulunabileceğini göstermiştir.

3.4. Hava Sızdırmazlık Ölçümleri

Genellikle bina kabuğu hava sızdırmazlığı simülasyon ve ölçümler ile incelenmektedir. Ölçüm yöntemleri yüksek maliyet gerektirdiğinden, genelde araştırmacılar modelleme (simülasyon) araçlarını kullanmaktadır. Modelleme yöntemi daha basit ve ekonomik olmasından dolayı daha yaygındır. Ölçüm yöntemleri ile elde edilen veriler daha gerçekçi ve güvenilir olmasına karşın daha az uygulanmaktadır.

3.4.1. Modelleme Yöntemleri

Bir bina kabuğunun hava geçirmezlik performansı hem binanın kullanım ömrü boyunca enerji tüketimine etkisi hem de kullanıcı konforu açısından önemli faktörlerden biridir. Hava geçirmezlik için bir değer, basınçlandırma testi ile elde edilebilir, ancak bu, bina inşa edilene kadar yapılamaz ve büyük binalar için genellikle hem maliyetlidir hem de sonuçlar kesinlikten yoksundur (Berge 2011). Bina kabuğundaki hava kaçaklarını ve miktarını belirlemek için deneysel teste dayalı ölçüm yöntemlerinin yanı sıra modelleme (simülasyon) yöntemi de kullanılabilir. Modelleme yöntemi mevcut bir yapıda veya tasarım aşamasında olan bir yapının bilgileriyle oluşturulan yapay bina kabuğu modeli ile hava değişim oranının çeşitli bilgisayar simülasyon programları kullanılarak belirlenmesini sağlar. Simülasyon yöntemlerinin güvenilirliği kanıtlanmış olmakla birlikte modelleme programlarından elde edilen değerlerin doğruluğunun ölçüm yöntemlerinden elde edilen değerler ile karşılaştırılmaları önemlidir.

Bina kabuğu enerji performansı ve sızdırmazlık durumunun deneysel ve test ölçümlerinin yanı sıra modelleme yöntemi ile belirlenmesini sağlayan EnergyPlus, DesignBuilder, TRNSYS, BLAST, DOE-2, WUFI, IDA-ICE,

CONTAM, COMIS, AccuRate, ESP-r, ANSYS – Fluent, Autodesk – CFD gibi simülasyon programları bulunmaktadır (Sular 2017).

Roberson (2004), Teksas ve Houston'ın ılıman iklimindeki tipik yeni bir evde saatlik hava değişim oranlarını karşılaştırmak için çok bölgeli bina hava akışı yazılım modeli CONTAM'ı kullanarak üç sızıntı senaryosu (tipik yeni inşaat, enerji açısından verimli yeni inşaat ve hava geçirmez yapı) ve üç fan senaryosu (havalandırma fanı olmadan, standartlara göre boyutlandırılmış egzoz fanı ve saatte 0,35 hava değişimi sağlayacak boyutta bir egzoz fanı) olmak üzere toplam dokuz senaryoyu simüle etmiştir. Bunu takiben, hava değişim sonuçları; yetersiz havalandırılmış, yeterince havalandırılmış ve aşırı havalandırılmış olarak harcanan zaman ve fana atfedilebilen toplam havalandırmanın yüzdesi olarak tanımlanan egzoz havalandırma verimliliği için analiz edilmiştir. Sonuçlar, standartlara göre boyutlandırılan egzoz fanlarının tipik yeni inşaatla havalandırmayı yalnızca marjinal olarak iyileştirdiğini, enerji verimli veya daha hava geçirmez yapıların önemli ölçüde yetersiz havalandırıldığını göstermektedir. Younes and Abi Shdid (2013), binalarda hava kaçağının tespiti amacı ile bina kabuğunda higrotermal simülasyonları (3D) gerçekleştirmek için bir modelleme metodolojisi geliştirmişlerdir. Metodoloji, bir bina kabuğunda şekil, yer ve miktar bakımından yaygın olan çeşitli çatlakları, gerçekçi bir şekilde tasvir eder ve ayrıca sorunun gerçek, çoklu fizik doğasını ve çeşitli saatlik hava değişkenlerini açıklar. Bu yöntem yüksek hassasiyetle enerji verimli, çeşitli yeşil ve sürdürülebilir bina tasarımı uygulamaları için gerekli olan hava kaçağı kaynaklı ısı yükünün daha doğru bir şekilde hesaplanmasını sağlar. Mohamadi and Vahid Mirnoori (2012), Kıbrıs'ta geleneksel müstakil tek aile konutlarını ele alarak, Bina Bilgi Modellemesi ve termal performans modellemesini entegre ederek, erken tasarım aşamasında, hava geçirmezlik açısından düşük kaliteli inşaat uygulamasının dezavantajlarını gösteren bir çalışma yapmışlardır. Yaklaşık 110 m² alana sahip müstakil bir ev, Bina Bilgi Modelleme araçlarından biri olan Autodesk Revit tarafından geleneksel inşaat malzemelerine dayanarak modellenmiştir. Yalıtımlı ve yalıtımsız olmak üzere modellenen iki tip konut için saatte 0,25 ila 2,5 ACH arasında çeşitli hava değişimleri uygulanmış ve gözlemler yapılmıştır. Sonuç olarak düşük sızdırmazlık performansı ve düşük kalitedeki inşaat uygulamaları arasında bağlantı kurulmuştur. Berge (2011), hava geçirmezlik değerinin istatistiksel bir tahminini kullanma ve istatistiksel tahminleri mühendisler tarafından yaygın olarak kullanılan basitleştirmelerle karşılaştırma olasılıklarını analiz etmiştir. Basınçlandırma testine bir alternatif, hava sızdırmazlığını istatistiksel bir modelle tahmin etmektir. Elde edilen sonuçlarda büyük sapmalar

olmuştur; fakat istatistiksel modeller, bilinmeyen hava sızdırmazlık değerleri olması durumunda deneyimsiz modelleme mühendisleri için bir kılavuz olarak kullanılabileceği yargısına ulaşılmıştır. Capener et al. (2014), tarafından 1950'lerde ve 1980'lerde inşa edilen Almanya (Münih) ve Finlandiya'da (Oulu) bulunan çeşitli bina cephelerinin higrotermal davranışı, iki boyutlu higrotermal bina kabuğu simülasyon aracı olan WUFI 2D ile modellenmiştir. Örnek binaların iyileştirilmiş cepheleri, duvarlara monte edilen higrotermal göstergeler ile yaklaşık 1 yıl boyunca izlenmiştir. Alan çalışması ile elde edilen veriler, WUFI 2D simülasyon programı bulguları ile karşılaştırılmıştır. Hem Münih hem de Oulu simülasyon sonuçlarının, iyileştirilen duvar ölçüm sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu saptanmıştır. Sıcaklık, ölçülen sonuçlarla bağdaşmaktadır. Nem seviyeleri ise çok iyi korelasyon göstermekte, ancak ölçülen veriler nem seviyelerinde simüle edilen verilere göre çok daha fazla varyasyon göstermektedir. Ayrıca sistemin kabuk sızıntısından kaynaklanan neme karşı sağlamlığı ve hassasiyetinin araştırılması konusuna önemle dikkat çekilmektedir. Kisilewicz et al. (2019) Polonya'da 2017 yılında inşa edilen müstakil evde bina hava sızdırmazlığının iç ısı konfor ve hava kalitesine etkisini incelemişlerdir. Blower Door Test ile elde edilen hava sızdırmazlık sonuçları Polonya iklim koşulları için Design Builder programında gerçekleştirilen yıllık hesaplamalı simülasyonlarda model kalibrasyon aracı olarak kullanılmıştır. Simülasyonlara dayanarak bina hava sızdırmazlığının iç ısı konfor üzerindeki etkisini ve kontrolünün potansiyel senaryosunu belirlemişlerdir. Rodrigues et al. (2020), Brezilya'nın São Paulo şehrinde konutların hava geçirmezlik seviyelerini belirlemek için Nabız Testi metodolojisini kullanmışlardır. Hava sızdırmazlık değerleri 1970'li, 1980'li ve 2000'li yıllarda inşa edilen çok aileli üç örnek konutta 4 Pa basınç altında sırası ile $1,04 \text{ h}^{-1}$, $4,26 \text{ h}^{-1}$ ve $5,7 \text{ h}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Değişken değerlerin ısı konfora etkisini anlamak için ölçülen hava sızdırmazlık değerlerini kullanarak dinamik bina simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, ısı konfor seviyelerinde maksimum sızma olarak $1,0 \text{ h}^{-1}$ kabul edilerek %9'a ve $0,5 \text{ h}^{-1}$ kullanılarak ısı konfor seviyelerinde %14'e varan iyileşme elde edilebileceğini göstermiştir.

3.4.2. Deneysel (Ölçüm) Yöntemler

Bina kabuğunun sızdırmazlık performansının sayısal veriler ile ifade edilip analizinin yapılması için yaygın olarak kullanılan ölçüm yöntemleri bulunmaktadır. Günümüzde kullanılan ölçüm yöntemleri (Kronvall 1980) aşağıda belirtilmiştir:

- Kızılötesi ısı görüntüleme yöntemi,
- İzleyici gaz testi,
- Nabız testi,
- Blower Door test (Fan basınçlandırma metodu),

3.4.2.1. Termal Kızılötesi Görüntüleme Yöntemi

Binaların ısı yalıtımı ve sızdırmazlığa yönelik eksiklikleri, yüksek ısıtma maliyetleri ve rahatsız edici iç ortam iklimsel koşullarından anlaşılabilir (Axen and Pettersson 1980). Binaların hava sızdırmazlığının araştırılmasında en yaygın olarak kullanılan test yöntemlerinden birisi kızılötesi (termal) kameradır. Özellikle sızıntıların konumunu araştırmak ve belirli bir dereceye kadar sızıntıların etkisini ölçmek için yararlıdır. Binaya düşük bir basınç uygulanarak sızıntılar kamera ile kolaylıkla izlenebilir. Bu izleme binaya giren soğuk dış hava sızıntısının yanındaki yüzeyleri soğutarak kamera tarafından görünür hale gelmesinden kaynaklanmaktadır. Termografi ile bağlantılı olarak, ölçümler genellikle termal kamera tarafından ortaya çıkan ve belgelenen yerel sızıntılarla bağlantılı olarak hava hızının hassas bir anemometre ölçümü ile yapılır (Kronvall 1980).

Balaras and Argiriou (2002), bina kabuğundaki sorunları (hava sızıntısı, ısı köprüsü, yoğunlaşma vb.) belirlemek ve güvenilir sonuçlar elde etmek için termal kızılötesi görüntüleme yöntemini kullanmış ve görüntülemelerinde hava sızıntılarını duvar ile pencere/kapı kasası birleşimleri ve sızdırmazlık malzemelerinin işlevini kaybettiği bölgelerde tespit etmişlerdir. Hart (1991), çalışmasında normal şartlarda ve iç ortam basıncı altındayken termal kamera ile bina kabuğundaki hava sızıntı bölgelerini, iç ve dış ortamda tespit etmiştir. Bina kabuğunda hava sızıntısının belirlendiği bölgeler; duvar elemanı ile ara kat döşeme birleşimleri, metal ve ahşap doğramalı pencereler; çatı arası kullanılan kırma çatıya ait yapı bileşenleri ve malzeme birleşim yerleri olarak saptanmıştır. Snell and Spring (2002), binanın tasarım, yapım ve onarım aşamalarında yapılan hataların neden olduğu higrotermal sorunları termal kızılötesi görüntüleme ile belirlemişlerdir. Yapılan hatalar sonucu bina kabuğunda meydana gelen hava sızıntı bölgelerini dış duvar köşe birleşimleri, dış duvar-ara kat döşemesi birleşimleri ve dış duvar-çatı parapeti birleşimleri olarak görüntülemişlerdir. Sonuç olarak bina kabuğu hava sızdırmazlık tespitinde termal kızılötesi görüntüleme yönteminin kolay bir tespit şekli olduğu dikkat çekmektedir.

Barreira et al. (2017), bir odanın pencere çerçevesi ve panjurundan geçen hava sızıntısını tespit etmek için Blower Door Test ile nicel sonuçlar alarak termal görüntülemenin uygulanabilirliğini değerlendirmeyi amaçlayan bir çalışmada bulunmuşlardır. Termal görüntülerin analizi, sızıntı noktasına yakın daha soğuk bir alanın tespit edilebildiğini ve basınç farkının artmasıyla büyüdüğünü göstermiştir. Gil-Valverde et al. (2020), hava sızıntısının bina kabuğu boşluğundan geçerken, boşluğa yakın bir yerde ürettiği; kızılötesi (IR) termografi ile yakalanan; iki boyutlu sıcaklık matrisine ve hava girişi ile hava akışının konfigürasyonuna bağlı bir çalışma yapmışlardır.

3.4.2.2. İzleyici Gaz Testi

Hava kaçağı ve sızıntı, günümüzde birçok alanda büyük bir endişeyi temsil etmektedir. Hava sızıntılarının tespiti ve önlenmesi bu alanların başarısı için yaşamsal önem taşımaktadır. Tüm bir binanın veya bir binanın bir bölümünün hava sızıntısını ölçmek için kullanılan standart tekniklerden birisi de İzleyici Gaz Testi (Tracer Gas Method) olarak bilinmektedir. American Society for Testing and Materials, E741-11 (2017) standardına göre, izleyici gaz testi, bir binanın bir alt bölümüne bir izleyici gazın enjekte edilmesini ve akış hızının elde edilebildiği sızıntılar yoluyla binaya temiz hava akışı olarak gaz konsantrasyonunun izlenmesini içerir. Fanlı kapı testlerinden farklı olarak, izleyici gaz yöntemi ile bir bina, alt bölüm veya oda için daha nicel ortalama kaçak akış hızı verileri elde edilir. Yine de konsantrasyon testinin bazı hataları vardır. Üfleyici kapı testi gibi, yerel kaçak akış verilerini tanımlayamaz, optimum koşulları elde etmek ve testleri yürütmek uzun zaman alır, büyük miktarda izleyici gaz kullanır ve test edilen alanın kullanımını olumsuz etkiler (Ghazi and Marshall 2014). Bu yöntem ayrıca, izleyici gaz konsantrasyonunun tüm test hacmi boyunca eşit şekilde karıştırılmasını gerektirir; ancak homojen dağılımın, birçok köşesi, kör noktası vb. olan büyük bir binada elde edilmesi zor olabilir. Dolayısı ile kaydedilen ölçümlerde hata olasılığı artabilir (Sherman M.H. 1989).

İzleyici gaz testinin gerçekleştirilmesi için çeşitli ideal izleyici gazlar kullanılabilir. En uygun izleyici gazı bulmak üzere yapılan araştırmalarda kullanılan gazlar karşılaştırılmış ve her izleyici gazın gereksinimleri karşılayamadığı saptanmıştır. Sherman (1990) çalışmasında havalandırma oranlarını belirlemek için ideal bir izleyici gazın sahip olması gereken özellikleri yanıcı ve toksik olmayan, ideal izleyici gaz sisteminin hava akışı ve yoğunluğunu etkilememesi, reaktif olmaması, eşsiz (diğer tüm hava bileşenlerinden

tanınabilmesi) ve ölçülebilir olması gerektiğini belirtmiştir. Grimsrud et al. (1979), binalarda hava sızıntısı oranlarını ölçmek için kullanılan yaygın izleyici gazlar arasında doğrudan bir karşılaştırma yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar, kükürt hekzaflorür (SF_6) kullanılarak ölçülen hava değişim oranlarının, metan (CH_4) veya azot oksit (N_2O) kullanılarak yapılan ölçümlere göre daha büyük olduğunu göstermektedir.

İzleyici gaz ölçümleri tıpta, binalar için havalandırma deneylerinde ve iklimlendirme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ghazi and Marshall (2014), pencerelerdeki sızıntıları belirlemek ve karakterize etmek için bir karbondioksit gazı izleme testini, Cui et al. (2015), binaların hava değişim oranını belirlemek için izleyici gaz testi yöntemini kullanmışlardır. İzleyici gaz testi ile ilgili standartlarda verilen bilgiler ile test aşamaları doğru bir biçimde ve sırası ile gerçekleştirildiğinde, uygun hesaplama yöntemleri kullanılarak bina kabuğunda meydana gelebilecek hava sızdırmazlık değerine ilişkin sonuçlara ulaşılabilmek mümkündür.

3.4.2.3. Nabız Testi

Bina kabuğunda gerçekleşen hava sızıntısı enerji tüketimi, iç mekan konforu, yapı fiziki gibi sorunlara neden olması nedeniyle istenmeyen bir durumdur; dolayısı ile birçok ülkede, maksimum değeri aşmadığından emin olmak için bina kabuğunun hava sızdırmazlık değerini ölçmek yaygın bir uygulamadır. Mevcut standartlar, bina kabuğunun sızma potansiyelinin bir ölçüsü olarak yüksek basınçlı veriler (tipik olarak 50 Pa) kullanır. 50 Pa basınçtaki sızıntı, sabit bir basınç farkı (Δp) oluşturmak için gereken fan akış hızının ölçüldüğü sabit bir basınçlandırma testi ile ölçülür. Gerçekte sızma çok daha düşük basınçlarda (tipik olarak 4 Pascal) gerçekleşir ve sızma potansiyelinin daha doğru bir ölçüsü 4 Pascal basınçtaki sızıntıdır. Ancak, bu tür düşük basınçlarda doğru ölçümler, rüzgâr basınçları nedeniyle önemli belirsizliğe tabidir (Cooper and Etheridge 2007).

Nabız testinde temel teknik, binayı hızlı ve bilinen bir hacim değişikliğine maruz bırakmak ve zamanla basınç tepkisini kaydetmektir. Prensip olarak test edilebilen binanın büyüklüğünde bir sınır yoktur. Küçük binalar için tek bir darbe ünitesi kullanılır ancak büyük binalar için darbe ünitesi binanın etrafına özdeş birimlerde dağıtılır ve darbe üniteleri aynı anda ateşlenir. Bu potansiyel olarak nabız testi tekniğinin büyük bir avantajıdır. Bir diğer önemli avantaj, testin kısa

sürede gerçekleştirilmesidir. Darbe tekniği ile bina kabuğunu delmeye gerek yoktur ve test sadece birkaç saniye sürer. Darbe ünitesi kullanımı basit, nispeten ucuz ve çok sayıda uygulama için kolaylıkla yeniden kullanılabilir (Cooper and Etheridge 2004).

Şekil 3.3’de görülen temel darbe üretim ekipmanı, bir silindirde sabit bir shaft boyunca kayan bir pistondan oluşur. Piston, bir zaman sıralayıcı tarafından çalıştırılan solenoid valfli bir veya iki kompresörden silindire hava enjekte edilerek yer değiştirir. Pistonun anlık konumunu ölçmek için bir deplasman dönüştürücü kullanılır. Piston konumu ve basınç farkı $\Delta p\{t\}$ ölçümleri 200 Hz frekansında alınır. Piston hızı, konum dönüştürücü çıkışının farklılaştırılmasıyla elde edilir ve dolayısıyla sızıntı miktarı $Q_p\{t\}$ bilinmektedir. Bu nedenle bir testin süresi oldukça kısadır ve birkaç tekrar ölçümünün yapılması uygundur (Cooper and Etheridge 2007).



Şekil 3.3. Prototip darbe üretim ünitesi (E. Cooper ve Etheridge 2007)

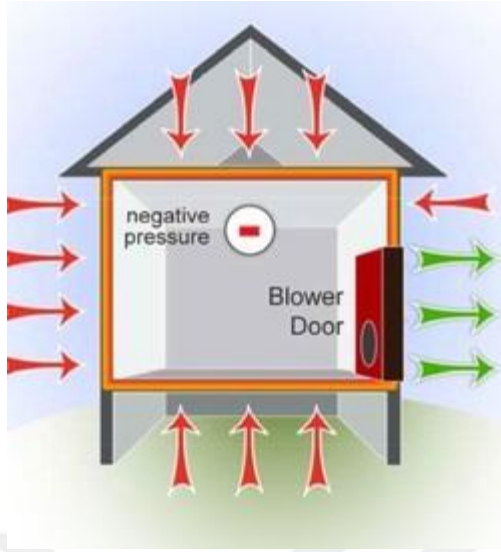
Zheng et al. (2020), hem darbe tekniğini hem de sabit basınçlandırma yöntemini kullanarak bir dış mekân odasının hava geçirmezlik ölçümünün deneysel bir çalışmasını yapmışlardır. Çeşitli sızıntı seviyelerinde bir dış odanın hava sızdırmazlığının ölçülmesinde her iki yöntemin karşılaştırılması ve çeşitli rüzgâr hızlarında sabit rüzgârın, oda hava sızdırmazlığının nabız ölçümünü nasıl etkileyebileceğini araştırmak için farklı zamanlarda bağımsız olarak iki set deneysel test gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, her iki yöntemle ölçülen 4 Pa basınç altında hava geçirgenliğinin çoğu test senaryosunda %16'dan daha az bir yüzde farkına sahip olduğunu göstermektedir; bu da, korunaklı ortam çalışmasında bulunandan biraz daha büyük bir farklılıktır. Sabit rüzgar testlerinde, çok dişli portatif bir treyler fanı kullanılarak nabız testlerinde çeşitli hız seviyelerinde yapay rüzgar tanıtılmış olup; ilk bulgular, sabit rüzgarın 3,5 m/s'nin altında olduğunda nabız testi üzerindeki etkisinin çoğunlukla önemsiz olduğunu

göstermiştir. Bununla birlikte, yüksek rüzgâr hızları (4 m/s-9,5 m/s), sabit rüzgar testlerinde fan kapalı durumda ölçülene kıyasla 4 Pa basınç altında hava geçirgenlik değerini %16–24 azaltmıştır.

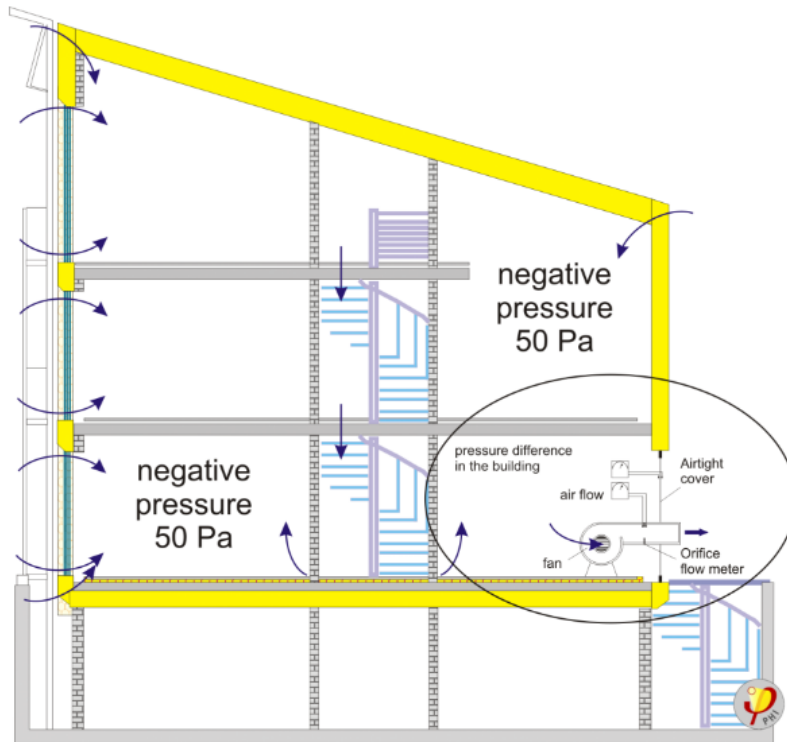
3.4.2.4. Blower Door Test

Binalarda enerji performansını etkileyen faktörlerden biri olan hava sızdırmazlık performansında etkili olan bir diğer parametre ise hava değişim oranıdır. Enerji verimliliği açısından hava sızdırmazlık oranının çok düşük olması, yani yüksek oranda hava sızdırmaz özellikte bir bina kabuğu ile enerji kayıpları önlenabilir ve bina iç mekânları dış hava koşullarından (sıcak, soğuk, rüzgâr) etkilenmez. Blower Door Test (BDT) esnasında bina içinde oluşturulan alçak basınç yardımıyla bina kabuğunda, hava sızdıran noktalar/yerler belirlenir. Bunun bina inşaatının tamamlanmasından önce yapılması durumunda gerekli önlemler alınarak, binanın enerji verimli olması ve yapım esnasındaki hataların düzeltilmesi sağlanabilir.

BDT ekipmanı, bina kabuğundan kaynaklanan kaçakları belirlemek için bir evi basınçlandırmak veya basınç azaltmak için kullanılan bir cihazdır. EN ISO 13829'a dayanarak, hava akışını 70 Pa'ya kadar yükseltebilen ve ardından 5-10 Pascal aralıklarla kademeli olarak düşürebilen bir fan kurulumundan oluşur. Değişken hızlı fan (evin belirli oranda basınçlandırılması veya basıncın düşürülmesi) bir kapı veya başka bir açıklığa geçici olarak monte edilir. Test sürecinde fan tarafından üretilen basınç farklılıklarını ölçmek için bir dizi manometre veya farklı basınçölçer kullanılır. Fan muhafazasındaki kalibre edilmiş bir açıklık boyunca hava akışı ölçülür. Debi ve basınç farkı arasındaki ilişki kabuk hava geçirmezliğinin bir göstergesidir. Ölçüm esnasında mekândaki tüm kapılar ve pencereler gibi tüm dış açıklıklar kapalı olmalıdır, böylece bir ısıtma mevsimi konfigürasyonu taklit edilir. Üfleme kapısındaki fan, egzoz fanı olarak görev yapar ve iç havayı dışarıya doğru yönlendirir. Böylece emme işlemi ile evdeki hava basıncının dış hava basıncının altına düşmesi sağlanır. Alternatif olarak, sızdırma yollarını görünür kılmak için duman üreten bir cihaz da kullanılabilir (Van der Meer 2001). Blower Door Test ünitesinden negatif basınçlandırma sonrası hava akım yönü ve bina kabuğu formu Şekil 3.4 ve Pasif Ev'de Blower Door Testinin uygulanması ise Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.4. Blower Door Testi Negatif Basınçlandırma (EnergyGeeks)



Şekil 3.5. Pasif Ev Kesitinde Blower Door Testi Gösterimi (Passipedia 2021c)

BDT prosedürleri, fanın içinden geçen akışın bina kabuğunun sızıntısından eşit miktarda akışla dengelenmesi gereğine göre kütle koruma teorisine dayanmaktadır. Binanın hacmi ve şekline bağlı olarak maksimum basınç farkı değişebilir, genellikle 50 Pa veya üstü değerler kabul edilir. Yaygın olarak kabul gören test yöntemi ev/binalarda "enerji verimliliği" için önemli göstergelerden biri olarak kullanılır. Sızdırmazlık yöntemi, yapı elemanları ve bina kabuğundaki sızıntıların nerede olduğunun bulunmasına yardımcı olur. Böylece bir yapının "sızdırmazlığı" değerlendirilerek, tespit edilen noktalara göre önlemler alınır. Bina tasarımcıları ve üreticileri BDT sonucunda elde edilen bilgiler ile binaların hava akış dinamiğini kavrama ve böylece binaların gerçekte nasıl performans göstereceğini öngörebilirler.

Literatür incelendiğinde BDT farklı standartlarda (ISO 9972: 2015; EN ISO 13790; EN ISO 13829) ifade edilmektedir. Birçok Avrupa ülkesinde yaygın olarak kullanılan standart ise EN-ISO-13829'dur ve Avrupa normudur. EN 13829'a göre, BDT'nin kabul edilebilir olması için, yerine getirilmesi gereken birtakım koşullar vardır: Bunlar; (EN ISO 13829)

- Binanın kabuğundaki açıklıklar (pencere vb.) kapalı olmalıdır (veya en azından test edilecek kısım),
- Rüzgar hızı Beaufort skalası 3 veya daha az olmalıdır; ya da ölçülüyorsa 6 m/sn veya daha düşük olmalıdır,
- 500m.K kuralı geçerlidir - binanın yüksekliğinin metrik cinsinden santigrad'daki iç/dış sıcaklık farkıyla çarpımının sonucu 500'den az olmalıdır,
- Bina kabuğunun kapalı olduğu, ancak test cihazının çalışmadığı durumda, binanın içi ve dışı arasındaki statik basınç (Sıfır Akış) farkı, 30 saniyelik bir ortalama 5 Pascal'dan (Pa) az olmalıdır,
- Koşulların değişmediğinden emin olmak için bu değişkenlerin test sonrasında da kontrol edilmesi gerektiği şeklinde sıralanabilir.

EN13829 standardı, Yöntem A ve Yöntem B olarak iki temel test hazırlama yöntemi sunmaktadır. Test edilen konutun deneye hazır hale getirilme süreci, hava geçirimsizlik testi sonucu için kritik öneme sahiptir. Bu tez çalışmasında, örnek mekânların hava sızdırmazlık ölçümleri Minneapolis Blower Door Test cihazı ile

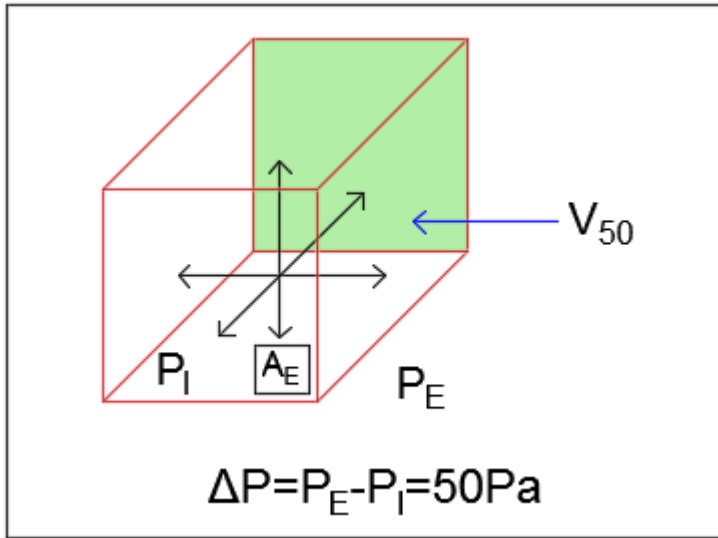
EN13829 standardına göre yapılmıştır ve yöntem A dikkate alınmıştır. Temel kural kapatılabilecek tüm açıklıkların kapatılması, yapı kabuğu içerisindeki diğer tüm öğelerin olduğu haliyle bırakılması ve havalandırma veya iklimlendirme sisteminin de kapatılmasıdır. Bu nedenle, test aşamasında dış pencereler ve kapılar tamamen kapatılır; test edilen bölümlerde temiz hava için tasarlanmış doğal havalandırma açıklıkları ve mekanik havalandırma sistemlerinin kapalı olduğundan emin olunmalıdır.

3.5. Sızdırmazlık Göstergeleri

Sızdırmazlık testleri sonucunda bina kabuğunda 50 Pa basınç farkı oluşturulması ile fandan geçen hava debisi (V_{50}) değeri ölçülmüş olur. Daha sonra hava debisi (V_{50}) değerinden sızdırmazlık göstergeleri hesaplanabilir (EN 13829). Tablo 3.2’de sızdırmazlık göstergeleri yer almaktadır.

Tablo 3.2. Sızdırmazlık Göstergeleri

Sembol	Açıklama	Birim
n_{50}	50 Pa Basınç Farkında Hava Değişim Oranı	h^{-1}
q_{50}	50 Pa Basınç Farkında Hava Geçirgenliği	$m^3/(h.m^2)$
w_{50}	50 Pa Basınç Farkında Özgül Sızıntı Oranı	$m^3/(h.m^2)$



Şekil 3.6. İç-Dış Ortam Basınç Farkı ve V_{50} görselleştirmesi

Blower Door Test sonucu elde edilen sızdırmazlık göstergelerinden hava değişim oranı (n_{50}) hava debisinin hacme, hava geçirgenliği (q_{50}) hava debisinin ölçüm yapılan mekanın taban alanına(A_E), özgül sızıntı oranı (w_{50}) ise hava debisinin ölçüm yapılan mekanın yüzey alanına(A_F) oranıdır.

n_{50} : (Hava Değişim Oranı)

$$n_{50} = \frac{V_{50}}{V} \quad (\text{h}^{-1})$$

q_{50} : (Hava geçirgenliği)

$$q_{50} = \frac{V_{50}}{A_E} \quad (\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2)$$

w_{50} : (Özgül Sızıntı Oranı)

$$w_{50} = \frac{V_{50}}{A_F} \quad (\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2)$$

3.6. Sızdırmazlık Standartları

Birçok ülkede genel olarak enerjinin verimli kullanılması için önemli bir faktör olan hava sızdırmazlığı konusunda bir dizi çeşitli önlemler ve standartlar kabul edilmiştir. Bu bölümde farklı ülkelerde uygulanan hava sızdırmazlık standartlarına ilişkin veriler tablolar halinde verilmiştir.

3.6.1. Pasif Ev Standardı

Pasif Ev Standardı temel tasarım kriterlerinden birisi bina kabuğu hava sızdırmazlığıdır. Pasif Ev standardına göre hava değişim oranı (n_{50}) $0,6 \text{ h}^{-1}$ değeri ve altında olmalıdır.

3.6.2. Fransa Sızdırmazlık Sınır Değerleri

Fransız Standardında hava değişim oranı (n_{50}) ve hava geçirgenlik (q_{50}) sınır değerleri konut ve konut dışı olmak üzere ofisler, oteller, eğitim ve sağlık binaları için tanımlanmıştır (Retrotec 2014). Tablo 3.4'te görüldüğü üzere Fransa'da konut türlerine göre n_{50} değerleri tek aile evleri için $4,5 \text{ h}^{-1}$, diğer konutlar için $6,8 \text{ h}^{-1}$ olarak belirtilmiştir. Konut dışı binalara ait n_{50} değerleri ise ofis, otel, eğitim ve sağlık binaları için $5,8 \text{ h}^{-1}$ iken diğer binalar başlığında $12,0 \text{ h}^{-1}$ olarak verilmektedir. Fransız Standardında da hava geçirgenliği (q_{50}) konut ve konut dışı olarak tanımlanmış olup sınır değerler $4,1$ ila $12,90 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ aralığında değişmektedir.

Tablo 3.3. Fransa Sızdırmazlık Sınır Değerleri (Retrotec 2014)

	Tip	Hava Geçirgenliği (q_{50}) $\text{m}^3/\text{h.m}^2$	Hava Değişim Oranı (n_{50}) h^{-1}
Konut	Tek Aile Evleri	4,1	4,5
	Diğer Konutlar	6,2	6,8
Konu Dışı Bina	Ofisler, Oteller, Eğitim ve Sağlık binaları	6,2	5,8
	Diğer Binalar	12,9	12,0

3.6.3. Birleşik Krallık Standartları

Birleşik Krallık konutlar için ATTMA TSL1 standardı hava geçirgenliği sınır değerleri Tablo 3.4'te ve konut dışı binalar için ATTMA TSL2 standardı hava geçirgenlik sınır değerleri Tablo 3.5'de yer almakta olup binaların doğal ya da mekanik havalandırılmasına ve bina kullanım amacına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Konutlar için q_{50} değeri doğal havalandırılmalı mekânlarda $5,0\text{--}7,0 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$, mekanik havalandırmada ise $1,0\text{--}5,0 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ aralığında değişmektedir.

Tablo 3.4. Birleşik Krallık ATTMA TSL1 Standardı Konutlar için Hava Geçirgenliği Sınır Değerleri

Tip	Hava Geçirgenliği (q_{50}) $\text{m}^3/\text{h.m}^2$		Hava Değişim Oranı (n_{50}) h^{-1}
	En İyi Uygulama	Normal Uygulama	
Doğal Havalandırma	5,0	7,0	
Mekanik Havalandırma	1,0	5,0	
Pasif Ev	-	<1,0	0,6

Tablo 3.5’de görüldüğü üzere “en iyi uygulama” başlığı altında müzeler ve süpermarketler için q_{50} değeri $1,0 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ olup en düşük değere sahiptir, bunu sırası ile ofisler (karma mod) ve depolar $2,0 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$, ofisler (doğal havalandırma) ve okullar $3,0 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ ve $5,0 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ değeri ile hastaneler izlemektedir. Ancak “normal uygulama” başlığında q_{50} değerlerinde farklılık dikkat çekmektedir; burada q_{50} değerleri $0,35$ ila $9,0 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ değişkenlik göstermekte olup en iyi uygulamaya kıyasla 2-3 kat oranında bir artış dikkat çekmektedir. Bir diğer önemli husus ise soğuk hava depoları için $0,2-0,35 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ aralığında verilen hava geçirgenliği değeridir.

Tablo 3.5. Birleşik Krallık ATTMA TSL2 Standardı Konut dışı Binalar için Hava Geçirgenliği Sınır Değerleri

Tip	Hava Geçirgenliği (q_{50}) $\text{m}^3/\text{h.m}^2$		Hava Değişim Oranı (n_{50}) h^{-1}
	En İyi Uygulama	Normal Uygulama	
Ofisler -Doğal Havalandırma	3,0	7,0	
Ofisler - Karma Mod	2,5	5,0	
Ofisler - Havalandırma Koşulu/ Düşük Enerji	2,0	5,0	
Fabrikalar/Depolar	2,0	6,0	
Süpermarketler	1,0	5,0	
Okullar	3,0	9,0	
Hastaneler	5,0	9,0	
Müzeler	1,0	1,5	
Soğuk Hava Depoları	0,2	0,35	
Pasif Ev Standardı	-	-1,0	0,6

3.6.4. Diğer Avrupa Ülkeleri

Avrupa ülkelerine ait hava değişim oranları ve hava geçirgenliği sınır değerleri genel olarak bakıldığında konut ve konut dışı olarak, kendi içlerinde ise havalandırma tiplerine göre sınır değerler belirledikleri görülmektedir (Tablo 3.6). Literatürde sızdırmazlık konusunda örnek çalışmaları göze çarpan Finlandiya’da konut ve konut dışı binaları bina ısı kaybı referansı ve enerji performansı sertifikasına göre sınıflandırmış olup sınır değerler belirlenmiştir. Almanya sızdırmazlık sınır değerleri DIN-EN 13829 uyarınca gerçekleştirilen testlere göre doğal ve mekanik havalandırma olarak ayrılmakta olup hava değişim oranı (n_{50}) değerleri sırası ile 3,0 ve 1,5 h^{-1} ’dir. Standartta ayrıca hava geçirgenlik değeri (q_{50}) dikkate alınarak da değerlendirme yapılır; q_{50} değerleri doğal ve mekanik havalandırma için sıra ile 2,7-1,4 $m^3/h.m^2$ olarak tanımlanmıştır. Alman Standardında farklı bina tipolojilerine göre bir tanımlama yapılmamıştır. Portekiz’e ait hava değişim oranı (n_{50}) 0,6 h^{-1} ve hava geçirgenliği (q_{50}) 0,5 $m^3/h.m^2$ sınır değerleri, Pasif Ev Standardı ile aynı sınır değerlerdir.

Tablo 3.6. Diğer Avrupa Ülkeleri Konut ve Konut Dışı Binaların Sızdırmazlık Sınır Değerleri
(Retrotec 2014)

	Ülke	Tip	Hava Geçirgenliği (q50) m ³ /h.m ²	Hava Değişim Oranı (n50) h ⁻¹
KONUT DIŞI BİNALAR	Litvanya	Doğal Havalandırma	3,2	3,0
		Mekanik Havalandırma	1,6	1,5
	Letonya	Endüstriyel Binalar	2,6	4,0
		Havalandırılmalı Binalar	4,3	3,0
	Norveç		3,2	3,0
	Slovenya	Doğal Havalandırılmalı	3,2	3,0
		Mekanik Havalandırma	2,1	2,0
	İskoçya	Mevcut Düzenleme	5,0	4,7
		Yeni Düzenleme	1,0	0,93
	Slovakya		2,1	2,0
	Estonya	Büyük Binalar (Yeni)	3,0	-
		Büyük Binalar (Mevcut)	6,0	-
	Finlandiya	Bina Isı Kaybı Referansı	2,1	2,0
		Enerji Performans Sertifikası	4,3	4,0
KONUT	Almanya	Doğal Havalandırma	2,7	3,0
		Mekanik Havalandırma	1,4	1,5
	Litvanya	Doğal Havalandırma	2,6	3,0
		Mekanik Havalandırma	1,4	1,5
	Letonya	Konutlar	2,6	3,0
		Havalandırılmalı	2,6	3,0
	Hollanda	Havalandırma Sistemli	1,8 - 2,6	2-3
		Havalandırma Sistemsiz	3,5 - 5,5	4-6
	Norveç		2,6	3,0
	Portekiz	Konutlar	0,5	0,6
	Slovenya	Doğal Havalandırma	2,6	3,0
		Mekanik Havalandırma	1,8	2,0
	Slovakya	Yüksek kalite pencereci tek aile evleri	3,5	4,0
	Estonya	Küçük Binalar (Yeni)	6,0	-
		Küçük Binalar (Mevcut)	9,0	-
	Finlandiya	Bina Isı Kaybı Referansı	1,8	2,0
		Enerji Performans Sertifikası	3,5	4,0
		Yeni Apartmanlar	0,46	0,5

3.6.5. Türkiye TS 825 Standardı

Türkiye’de bina kabuğu hava sızdırmazlığına ilişkin bir standart mevcut değildir; sadece TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı içinde bir tablo ile konutlara ait sızdırmazlık sınır değerleri yer almaktadır (Tablo 3.7). TS 825 de farklı bina tiplerine ya da havalandırma türüne göre ayrı tanımlama yapılmamıştır; verilen sınır değerler tüm bina tipolojileri için geçerlidir. Ancak Fransa, Birleşik Krallık ülkelerinde konut dışında eğitim, hastane, ofis binaları vs. sızdırmazlık sınır değerleri mevcuttur.

Türkiye’deki binalarda sızdırmazlık sınır değerleri konutlar için katta çok daireli ve tek daireli binalar olarak ayrılmakta olup yüksek, orta ve düşük sızdırmazlık durumları olarak sınıflandırılmıştır. Katta çok daireli binalar için hava değişim oranı (n_{50}) 2’den küçük ise “yüksek”, $2 \leq n_{50} \leq 5$ ise “orta” ve 5’ten büyük ise “düşük” sızdırmazlık sınıfındadır. Katta tek tek daireli binalar için ise hava değişim oranı (n_{50}) 4’den küçük ise “yüksek”, $4 \leq n_{50} \leq 10$ ise “orta” ve 10’dan büyük ise “düşük” sızdırmazlık sınıfındadır.

Tablo 3.7. TS 825’e göre Türkiye’deki Binalarda Sızdırmazlık Sınır Değerleri (TS825 2008)

Katta Çok Daireli Binalar	Katta Tek Daireli Binalar	Bina Zarfının Sızdırmazlık Durumu
$n_{50} < 2$	$n_{50} < 4$	Yüksek
$2 \leq n_{50} \leq 5$	$4 \leq n_{50} \leq 10$	Orta
$5 < n_{50}$	$10 < n_{50}$	Düşük

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Alan Çalışmasına İlişkin Veriler

4.1.1. Alan Çalışmasına İlişkin Veriler – Eğitim Binası Örnekleri

Tez çalışmasında Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ve Makine Mühendisliği Bölümü ile Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Binasında yer alan derslikler ve öğretim elemanları ofislerinde Blower Door Test (Minneapolis) cihazı ile hava sızdırmazlık ölçümleri yapılmıştır; ayrıca termal kamera ile görüntüler alınarak hava kaçaklarından kaynaklanan ısı köprüleri gözlemlenmiştir.

4.1.1.1. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Bina Bilgileri

Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsünde bulunan Mimarlık Fakültesi ve Mühendislik Fakültesi tarafından ortak kullanılan öğretim elemanları ofisleri ve eğitim mekânlarına sahip 7 ve 4 katlı, 2 bloktan oluşan bina Kuzeybatı-Güneydoğu aksında konumlanmaktadır (Şekil 4.1, Şekil 4.2).



Şekil 4.1. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık ve Mühendislik Fakülteleri Google Uydu Görüntüsü



Şekil 4.2. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi ile Mühendislik Fakültesi Binası Genel Görünüş

İncelenen bina betonarme karkas taşıyıcı sisteme sahiptir. Bina kabuğunu oluşturan dış duvar kuruluşu 19 cm tuğla (düşey delikli), çimento harçlı 2 cm iç sıva ve 3 cm dış sıvadan oluşmaktadır. Tablo 4.1’de dış duvar, teras çatı, iç duvar, ara kat ve zemin döşeme elemanları ile pencerelere ilişkin ayrıntılı malzeme bilgileri ve bu yapı elemanlarının ısı geçiş katsayısı değerleri yer almaktadır. Pencereler çift camlı PVC ve alüminyum doğramaya sahiptir ve binada mekanik havalandırma sistemi mevcut değildir; doğal olarak havalandırılmaktadır. Binanın ısıtılması doğalgaz destekli merkezi sistem (radyatörler) ile yapılmaktadır; ancak öğretim elemanları ofislerinde ısıtma/soğutma için fan-coil sistemi bulunmaktadır.

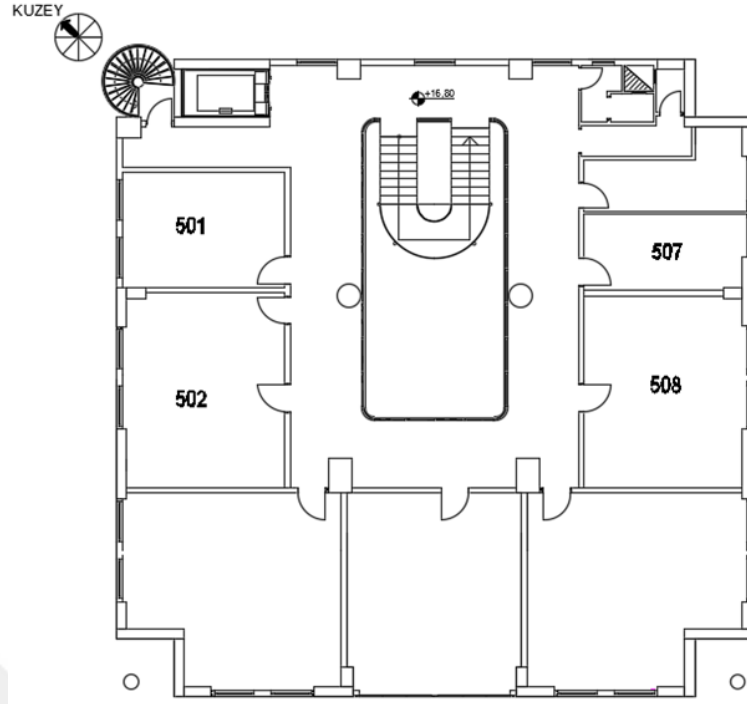
Tablo 4.1. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık-Mühendislik Fakültesi Yapı Elemanları
Malzeme Bileşenleri (Koçyiğit 2019)

Yapı Elemanları	Malzeme bileşenleri	U değeri (W/m ² K)
Dış duvar	- 30 mm çimento harçlı dış sıva - 190 mm düşey delikli tuğla - 20 mm çimento harçlı iç sıva	1,287
Teras çatı	- 6 mm polimer bitümlü su yalıtım örtüsü - 0,005 mm astar - 50 mm eğim betonu - 120 mm döşeme betonu - 20 mm çimento harçlı sıva	3,42
İç duvar	- 20 mm çimento harçlı sıva - 100 mm yatay delikli tuğla - 20 mm çimento harçlı sıva	1,843
Ara kat döşeme	- 15 mm seramik yer karosu - 60 mm tesviye betonu + harç - 120 mm döşeme betonu - 20 mm çimento harçlı sıva	2,267
Taban	- 15 mm seramik yer karosu - 60 mm tesviye betonu+ harç - 3 mm su yalıtımı membranı - 100 mm grobeton - 35 mm kum - 150 mm blokaj	1,014
Pencere	-6 mm cam -13 mm hava boşluğu -6 mm cam	2,708

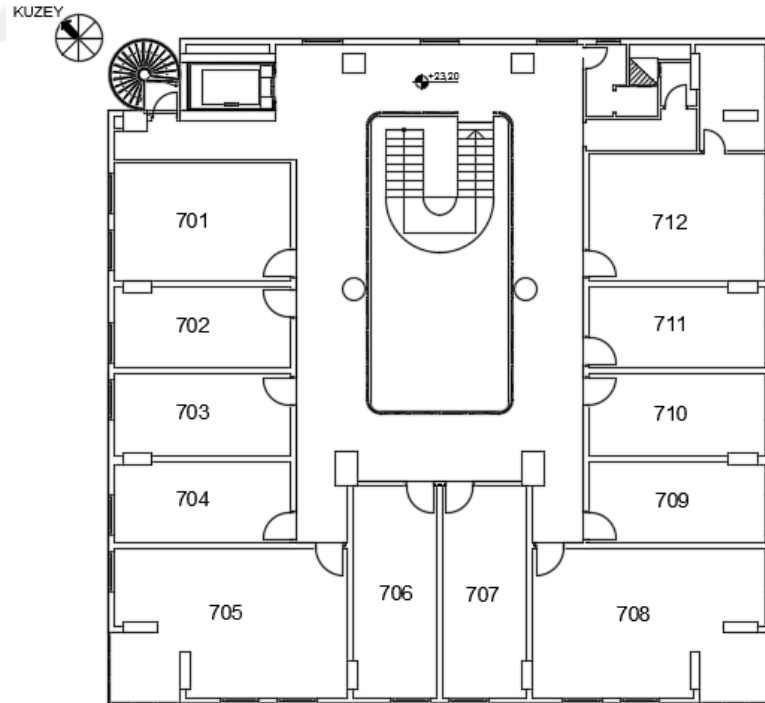
Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Binasında Blower Door Test ile ölçümü yapılan derslikler ve öğretim elemanları ofislerinin taban alanı, hacim, yüzey alanı ve kat yüksekliği bilgileri Tablo 4.2’de verilmektedir; ayrıca mekanların yer aldıkları kat planları ise Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de yer almaktadır.

Tablo 4.2. Balıkesir Üniversitesi Ölçüm Yapılan Mekanların Boyutsal Özellikleri

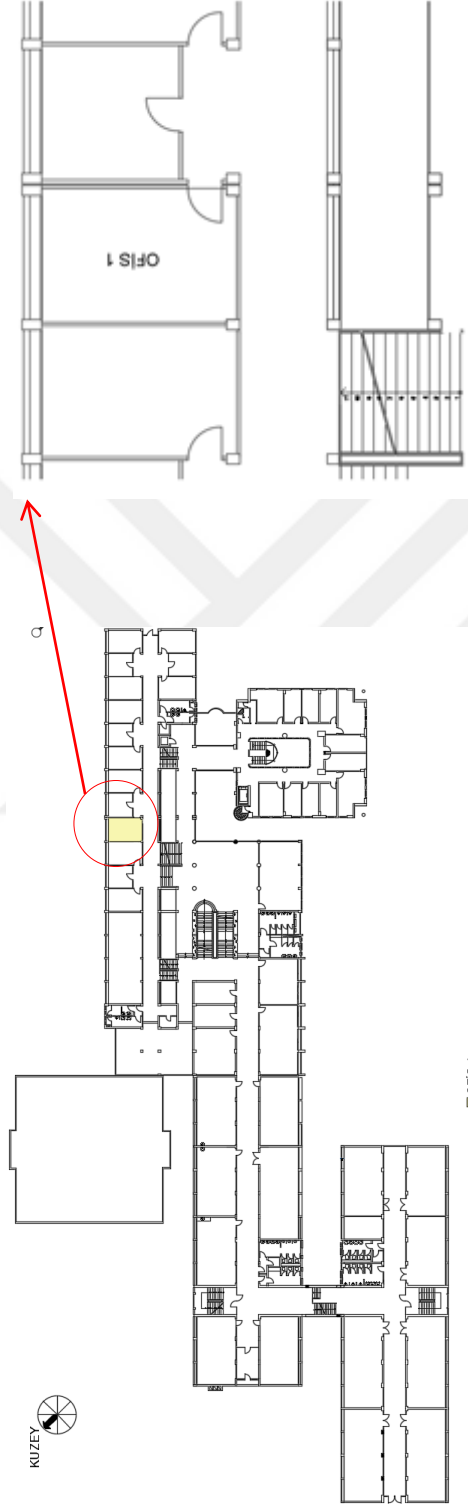
	Mekan	Taban Alanı (m ²)	Hacim (m ³)	Yüzey Alanı (m ²)	Net Yükseklik (m)
ÖĞRETİM ELEMANI OFİSLERİ	OFİS -1	23,20	60,32	97,36	2,60
	OFİS -2	23,98	62,36	100,22	2,60
	5.Kat 501	22,80	59,28	96,04	2,60
	5.Kat 502	36,33	94,46	135,58	2,60
	5. Kat 507	15,10	39,27	73,62	2,60
	5. Kat 508	36,33	94,46	135,58	2,60
	7. Kat 701	25,42	66,09	104,4	2,60
	7. Kat 702	17,67	45,94	82,40	2,60
	7. Kat 703	17,67	45,94	82,40	2,60
	7. Kat 704	17,67	45,94	82,40	2,60
	7. Kat 705	42,80	111,28	115,02	2,60
	7. Kat 706	17,67	45,94	82,40	2,60
	7. Kat 707	21,68	56,37	96,92	2,60
	7. Kat 709	17,67	45,94	82,40	2,60
	7. Kat 710	17,67	45,94	82,40	2,60
	7. Kat 711	17,67	45,94	82,40	2,60
DERSLİKLER	2. Kat B201	76,47	198,84	247,32	2,60
	2. Kat B202	76,47	198,84	247,32	2,60
	MİMARLIK STÜDYOSU	23,17	74,35	111,04	2,60
	LABORATUVAR	82,60	214,76	262,96	2,60
	7. Kat 708	42,80	111,28	115,02	2,60



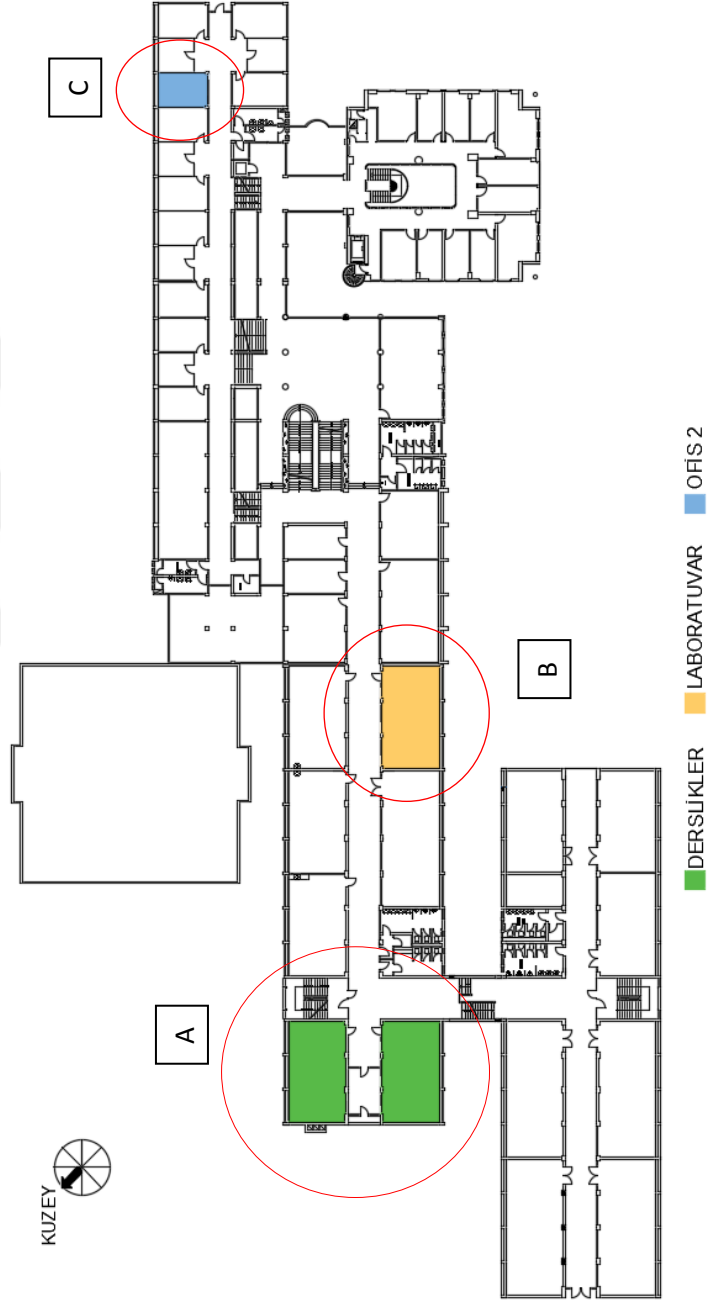
Şekil 4.3. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi ölçüm yapılan ofisler 5. kat planı



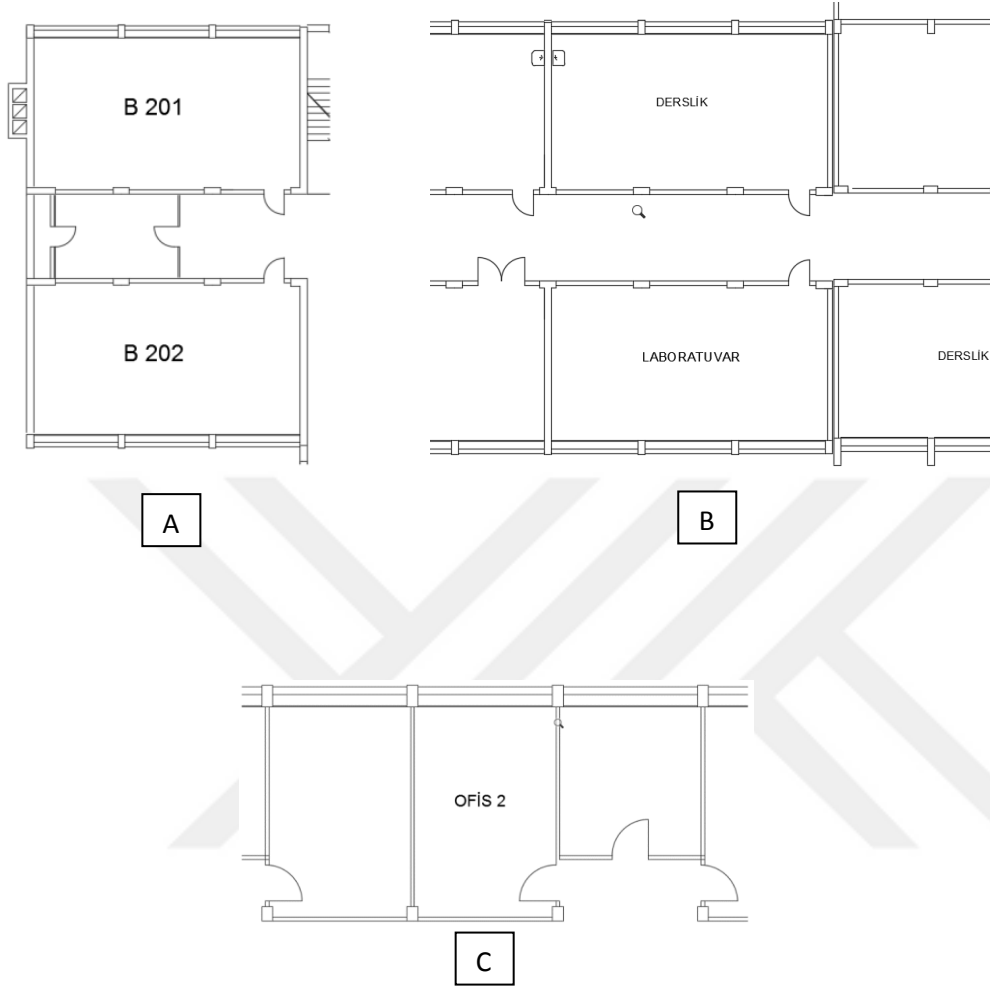
Şekil 4.4. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi ölçüm yapılan ofisler 7. kat planı



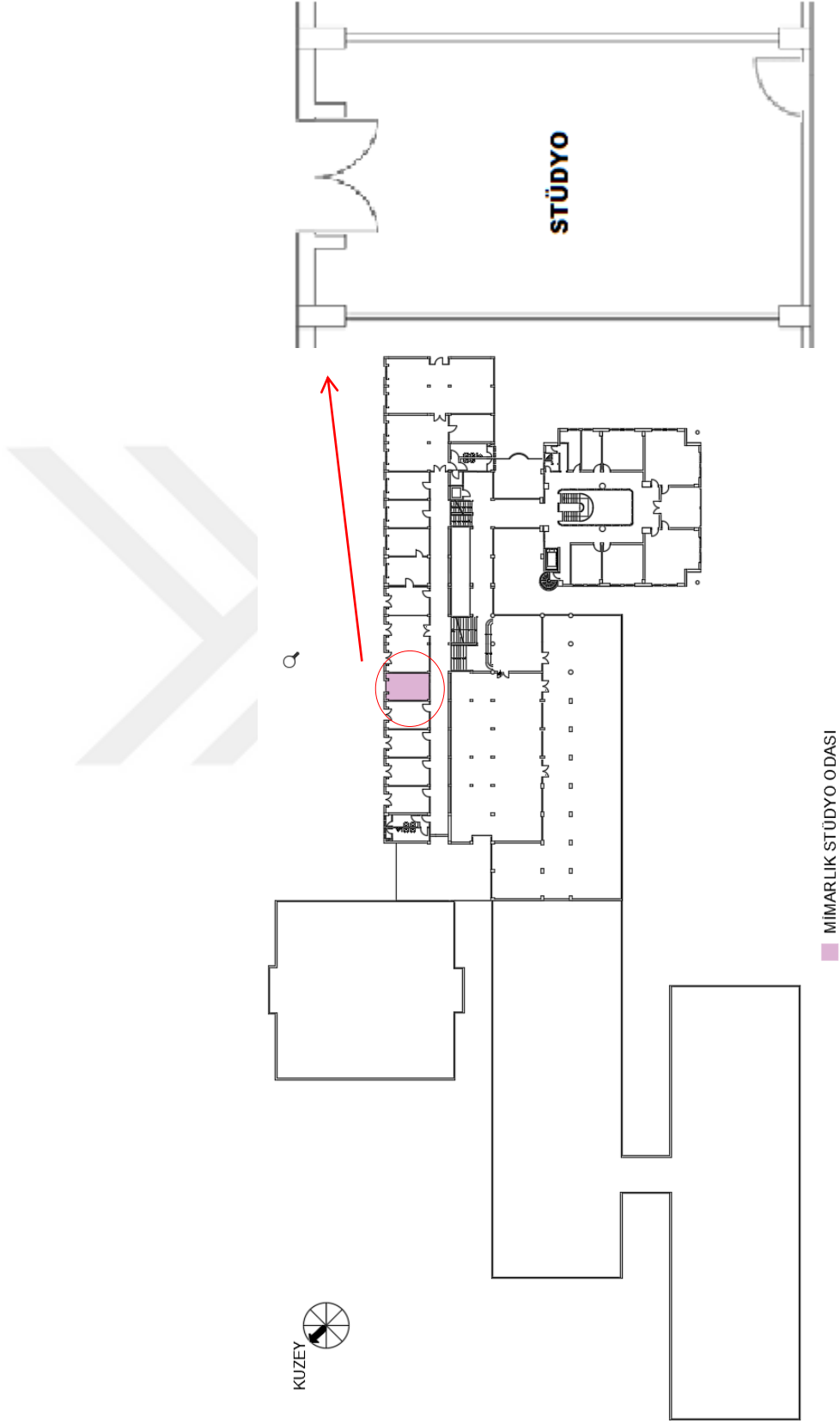
Şekil 4.5. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi ölçüm yapılan Ofis 1, Kat Planı



Şekil 4.6. Balıkesir Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi Ölçüm yapılan mekanlar B 201, B 202, Laboratuvar ve Ofis 2, 2. Kat Planı



Şekil 4.7. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fak. B 201, B 202, Laboratuvar ve Ofis-2 Planları



Şekil 4.8. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Ölçüm Yapılan Mimarlık Stüdyosu, 3. Kat Planı

4.1.1.2. Ege Üniversitesi İnşaat-Makine Mühendisliği Bina Bilgileri

Alan çalışmasının yapıldığı Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ve Makine Mühendisliği eğitim binaları planlama ve yapısal açıdan birbirinin aynısı olmakla birlikte iç mekân kullanımına bağlı olarak bazı değişiklikler mevcuttur. İnşaat Mühendisliği binası Doğu-Batı aksında, Makine Mühendisliği Binası ise Kuzey-Güney aksında yer almakta olup binaların uydu görüntüsü Şekil 4.9'da ön cephe dış görünüşleri ise Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.9. Ege Üniversitesi İnşaat ve Makine Mühendisliği Bölüm Binaları Google Uydu Görüntüsü



Şekil 4.10. Ege Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü Giriş Cephesi - Kuzey Görünüşü



Şekil 4.11. Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Binası Giriş Cephesi - Doğu Görünüşü

Binalar betonarme karkas taşıyıcı sisteme sahiptir. Dış duvar kuruluşları içten ve dıştan 2 cm sıvalı, 30 cm kalınlığında betonarme perde ve 20 cm kalınlığında bims bloktan oluşmaktadır. Pencereleer çift camlı, sürme sistem, alüminyum doğramaya sahiptir. Binada ısıtma/soğutma merkezi sistemden beslenen fan-coil ünitesi ile yapılmakta olup mekanik havalandırma sistemi yoktur, havalandırma doğal olarak pencereler ile yapılmaktadır. Sızdırmazlık ölçümlerinin gerçekleştirildiği Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ve Makine Mühendisliği Bölümü binalarına ait yapı elemanları malzeme bilgileri mimari proje ve bölüm idaresinden elde edilmiş olup Tablo 4.3'te yer almaktadır.

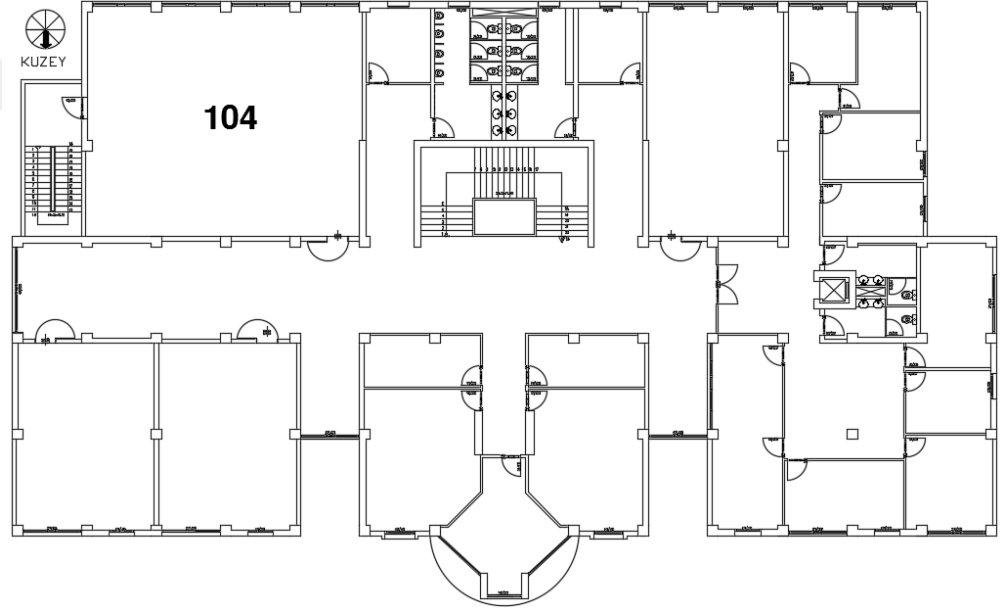
Tablo 4.3. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ve Makine Mühendisliği Bölümü binalarına ait yapı elemanları malzeme bileşenleri

Yapı Elemanları	Malzeme bileşenleri	U değeri (W/m ² K)
Dış duvar -1-	- 20 mm Dış Sıva - 300 mm Betonarme Perde - 20 mm İç Sıva	2,856
Dış duvar -2-	- 20 mm Dış Sıva - 200 mm Bims Blok - 20 mm İç Sıva	1,054
Teras çatı	- 15 mm sıva - 150 mm Betonarme Döşeme - 40 mm Çimento Harçlı Şap - 5 mm Su Yalıtımı - 30 mm Çimento Harçlı Şap - 50 mm XPS Isı Yalıtımı - 20 mm Çimento Harçlı Şap - 15 mm Seramik Kaplama	0,45
Zemine Oturan Döşeme	- 200 mm Betonarme Döşeme - 40 mm Çimento Harçlı Şap - 2 mm Su Yalıtımı - 30 mm Çimento Harçlı Şap - 15 mm Yapıştırma Harcı - 20 mm Çimento Harçlı Şap - 10 mm Kaplama Malzemesi	2,9
Pencereler	Alüminyum Çerçeve: Çift Cam - 4 mm cam - 12 mm hava boşluğu - 4 mm cam	2,4

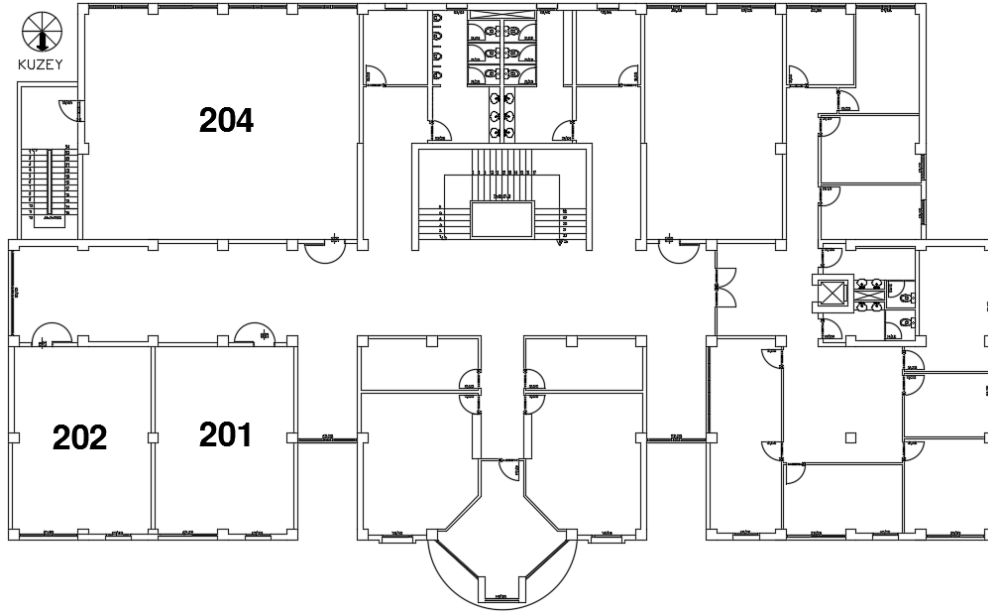
Deneysel çalışmanın yapıldığı Ege Üniversitesi eğitim binalarında Blower Door ölçümlerinin gerçekleştirildiği mekânların boyutsal özelliklerini Tablo 4.4 içermektedir. Ölçümü gerçekleştirilen mekânların yer aldığı kat planları Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de görülmektedir.

Tablo 4.4. Ege Üniversitesi Ölçüm Yapılan Mekanların Boyutsal Özellikleri

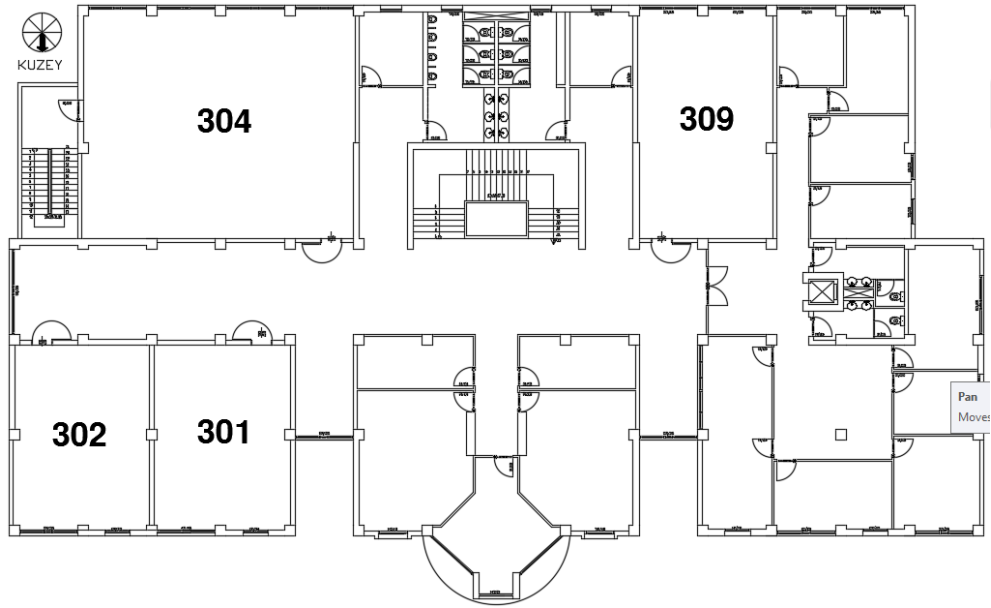
	Mekân/Yön	Taban Alanı (m ²)	Hacim (m ³)	Yüzey Alanı (m ²)	Net Yükseklik (m)
İNŞAAT	Derslik 104 - Güney	136,63	375,73	403,06	2,75
	Derslik 201- Kuzey	55,90	153,72	191,75	2,75
	Derslik 202 - Kuzey	55,50	152,63	192,13	2,75
	Derslik 204 - Güney	136,63	375,73	403,06	2,75
	Derslik 301 - Kuzey	55,90	153,72	191,75	2,75
	Derslik 302 - Kuzey	55,50	152,63	192,13	2,75
	Derslik 304 – Güney	136,63	375,73	403,06	2,75
	Derslik 309 - Güney	67,90	186,73	230,40	2,75
MAKİNE	Derslik 104 - Batı	136,63	375,73	403,06	2,75
	Derslik 112 - Batı	67,90	186,73	230,40	2,75
	Derslik 201 – Doğu	55,90	153,72	191,75	2,75
	Derslik 202 - Doğu	55,50	152,63	192,13	2,75



Şekil 4.12. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü 1. Kat Planı, Ölçüm Yapılan Derslik 104

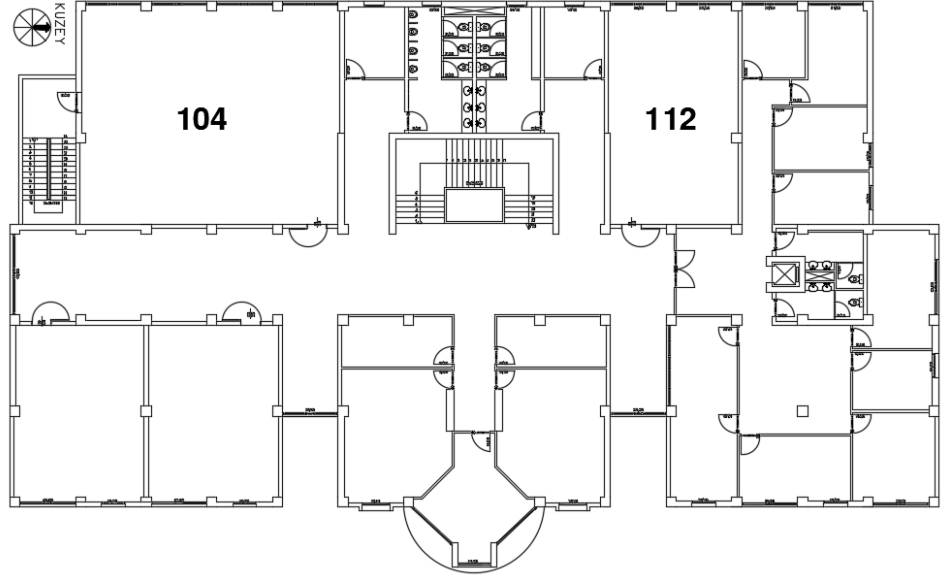


Şekil 4.13. Ege Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü 2. Kat Planı, Ölçüm Yapılan Derslikler 201, 202 ve 204

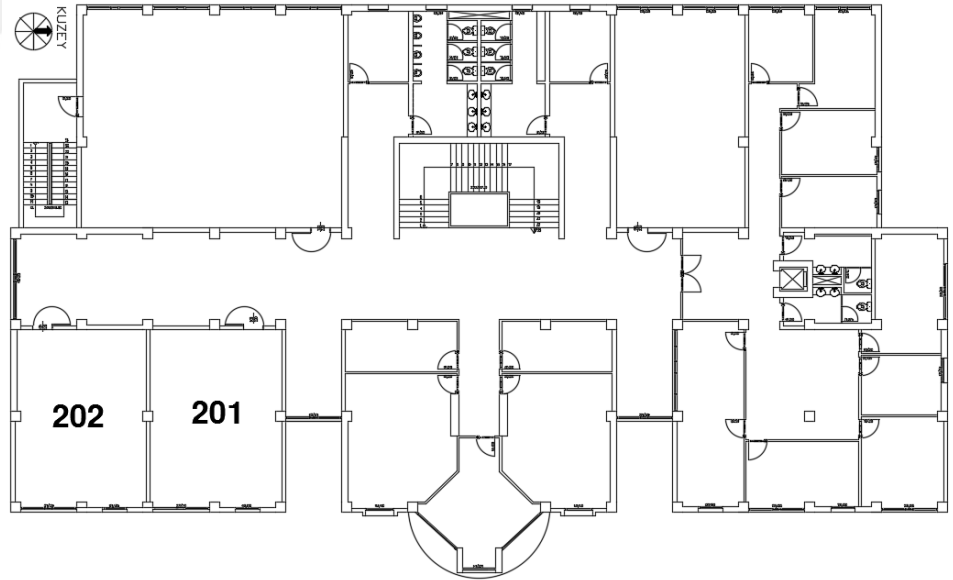


Şekil 4.14. Ege Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü 3. Kat Planı, Ölçüm Yapılan Derslikler 301, 302, 304 ve 309

Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde ölçümü gerçekleştirilen mekanların bulunduğu kat planları Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’de görülmektedir.



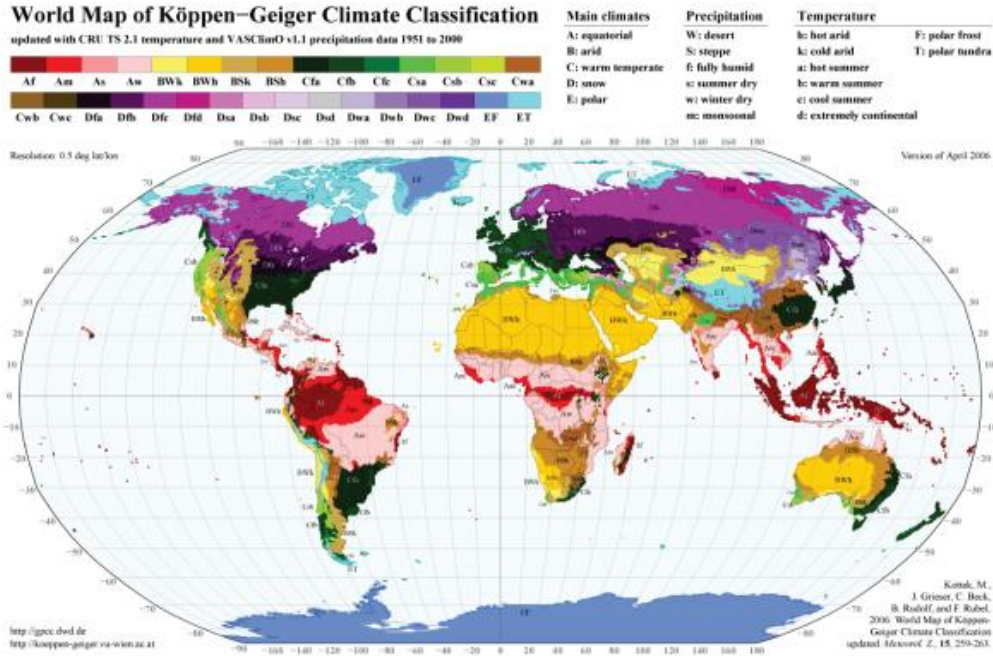
Şekil 4.15. Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü 1. Kat Planı, 104 ve 112 Nolu Derslik



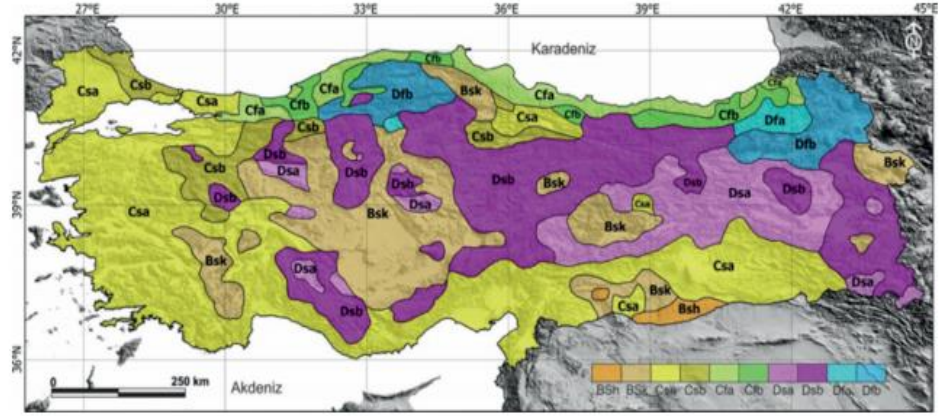
Şekil 4.16. Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü 2. Kat Planı, 201 ve 202 Nolu Derslik

4.1.2. İklimsel Veriler

Balıkesir, 39° 40' Kuzey Enlem ile 26° 28' Doğu Boylamında Türkiye'nin batı kıyı şeridi Ege Bölgesi'nde bulunmaktadır. Balıkesir ilinde genel olarak Akdeniz iklimi etkisinde yarı kurak bir iklim hüküm sürer, yazları sıcak, kışları serin ve deniz etkisine yakın bir iklim hâkimdir. Kış aylarında düşen yağış miktarı yaz aylarına göre oldukça fazladır (İMGGM 2020). Köppen–Geiger Dünya iklim sınıflandırmasına göre Csa bölgesinde konumlanır (Şekil 4.17 ve 4.18). TS 825 Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları Standardına göre ise Balıkesir ili Türkiye'nin 2. derece-gün bölgesinde yer almaktadır.



Şekil 4.17. Köppen–Geiger Dünya İklim Sınıflandırması
(MGM 2021)



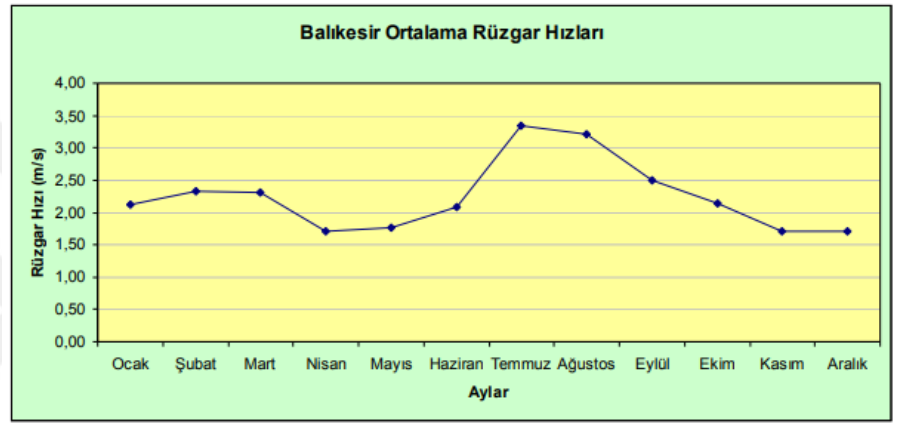
Şekil 4.18. Köppen–Geiger Türkiye İklim Sınıflandırması (Öztürk, vd. 2017)

Balıkesir iline ait 1938-2019 yılları arasında aylık ortalama sıcaklık ve aylık ortalama yağış dağılımı verileri Tablo 4.5’de görülmektedir.

Tablo 4.5. 1938-2019 yılları arası Balkesir ili İklimsel Veriler (MGM 2020a)

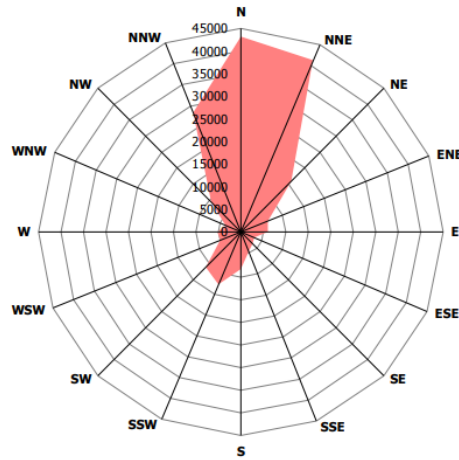
Balıkesir ilinin 1938-2019 yılları arasındaki ortalama sıcaklığı 14,6 °C'dir ve sıcaklık artış trendine sahiptir. 2019 yılına kadar ölçülen maksimum sıcaklık 43,7 °C ve minimum sıcaklık ise -21,8 °C'dir. Günlük toplam en yüksek yağış miktarı ise 16.11.2004 tarihinde 126,8 mm, en yüksek kar seviyesi ise 14.02.2004 tarihinde 32,0 cm olarak kayıtlara geçmiştir (MGM 2020a).

Balıkesir'de ortalama rüzgâr hızı 1,4 m/sn'dir (İzmir MGM 2021a). Bu güne kadar ölçülen günlük en yüksek rüzgâr hızı ise 103,0 km/saat olarak kayıtlara geçmiştir (MGM 2020a). Balıkesir ili aylık ortalama rüzgâr hızları Şekil 4.19'da görülmektedir.



Şekil 4.19. Balıkesir İli Aylık Ortalama Rüzgâr Hızları (İzmir MGM 2021)

Balıkesir'in hâkim rüzgâr yönü Kuzey, mevsimsel değişimlere bağlı olarak ikincil derece hâkim rüzgâr yönü Kuzey-Kuzeydoğudur (İzmir MGM 2020a) (Şekil 4.20).



Şekil 4.20. Balıkesir İli Rüzgâr Yönü ve Şiddeti (İzmir MGM 2021)

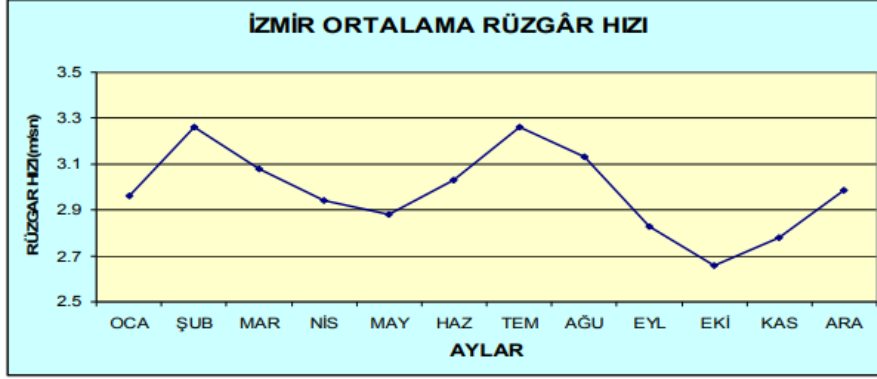
İzmir, Türkiye'nin Ege batı kıyı şeridi 38° 25' Kuzey Enlemi ve 27° 09' Doğu Boylamında yer almaktadır. İzmir ili bulunduğu Orta Enlem kuşağı ve kıyı şeridi sebebiyle sıcak ve ılıman olan Akdeniz iklimi etkisine sahiptir. Akdeniz ikliminin sıcak ve nemli olma özelliğini barındıran İzmir ilinde Ekim-Mayıs ayları arasında ısıtma ihtiyacı ve geri kalan yılın diğer aylarında soğutma ihtiyacı görülmektedir (Yildiz vd. 2011). Kış aylarında düşen yağış miktarı yaz aylarına göre oldukça fazladır. Köppen–Geiger Dünya iklim sınıflandırmasına göre “Csa” bölgesinde konumlanır.

İzmir ilinin 1938-2019 yılları arasındaki ortalama sıcaklığı 17,8 °C'dir ve sıcaklık artış trendine sahiptir. 2019 yılına kadar ölçülen maksimum sıcaklık 43 °C ve minimum sıcaklık ise -8,2 °C'dir. İzmir iline ait 1938-2019 yılları arasında aylık ortalama sıcaklık ve aylık ortalama yağış dağılımı verileri Tablo 4.6'da görülmektedir.

Tablo 4.6. 1938-2019 Yılları Arası İzmir İline Ait İklimsel Veriler (MGM 2020b)

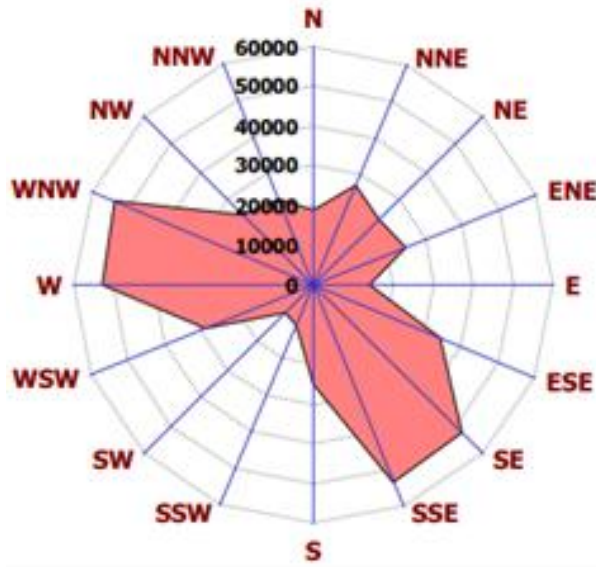
İZMİR	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Ölçüm Periyodu (1938-2019)													
Ortalama Sıcaklık (°C)	8,7	9,5	11,6	15,8	20,7	25,3	27,8	27,6	23,6	18,8	14,2	10,4	17,8
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	12,3	13,5	16,2	20,8	26,0	30,7	33,1	32,9	29,1	23,9	18,5	14,0	22,6
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	5,7	6,1	7,6	11,1	15,4	19,8	22,4	22,3	18,6	14,5	10,6	7,4	13,5
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	4,2	5,1	6,4	7,9	9,8	11,5	12,2	11,9	10,1	7,5	5,5	4,1	96,2
Ortalama Yağışlı Gün Sayısı	12,7	10,8	9,2	7,9	5,3	2,2	0,5	0,5	2,0	5,4	8,8	12,8	78,1
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)	136,1	102,3	75,6	46,0	31,3	11,6	4,1	5,7	15,8	44,6	93,7	144,3	711,1
En Yüksek Sıcaklık (°C)	22,4	27,0	30,5	32,5	37,6	41,3	42,6	43,0	40,1	36,0	30,3	25,2	43,0
En Düşük Sıcaklık (°C)	-8,2	-5,2	-3,8	0,6	4,3	9,5	15,4	11,5	10,0	3,6	-2,9	-4,7	-8,2
Günlük Toplam En Yüksek Yağış Miktarı	Günlük En Hızlı Rüzgâr						En Yüksek Kar						
29.09.2006	145,3 mm	29.03.1970						31.01.1945					
							127,1 km/sa	32,0 cm					

İzmir’de ortalama rüzgâr hızı 3,0 m/sn’dir (İzmir MGM 2020b). Bu güne kadar ölçülen günlük en yüksek rüzgâr hızı ise 29.03.1970 tarihinde 127,1 km/saat olarak kaydedilmiştir (MGM 2020b). İzmir ili aylık ortalama rüzgâr hızları Şekil 4.21’de görülmektedir.



Şekil 4.21. İzmir İli Aylık Ortalama Rüzgâr Hızları (İzmir MGM 2020b)

İzmir’in hâkim rüzgâr yönü Güney-Güneydoğu, mevsimsel değişimlere bağlı olarak ikincil derece hâkim rüzgâr yönü Batı-Kuzeybatıdır (Şekil 4.22).



Şekil 4.22. İzmir İli Aylık Ortalama Rüzgâr Hızları (İzmir MGM 2020b)

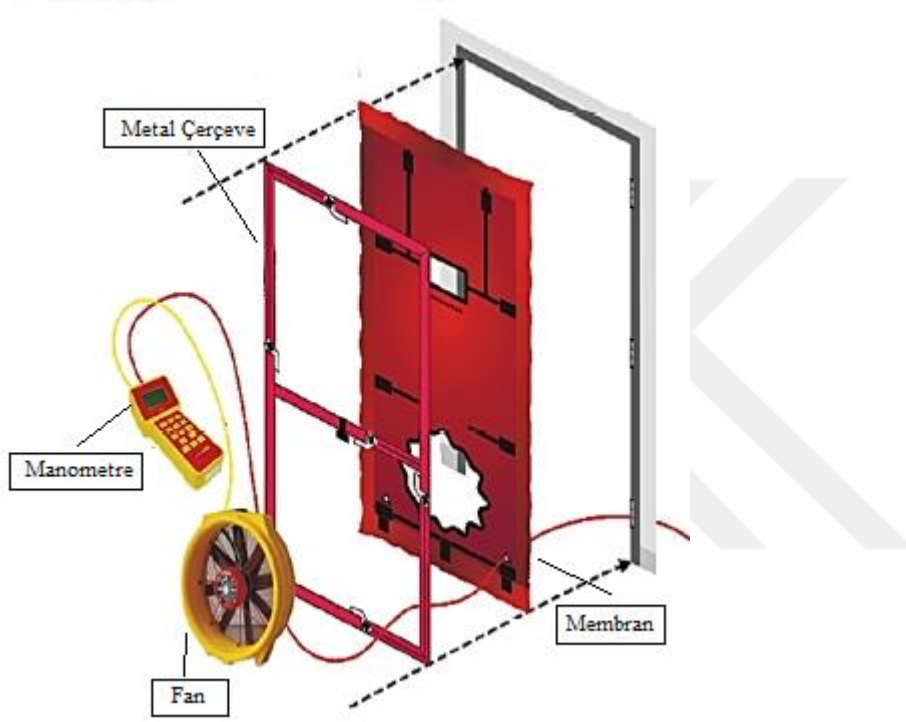
4.1.3. Minneapolis Blower Door Test Cihazı

Minneapolis Blower Door, uzun zamandır dünyanın en iyi tasarlanmış ve desteklenen bina hava sızdırmazlık test sistemlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Energy Conservatory tarafından geliştirilen özel aksesuarlar ve test prosedürleriyle birleştirilen Minneapolis Blower Door test cihazı, DSM programları, enerji derecelendiricileri, HVAC yüklenicileri ve hava şartlandırma uzmanları için tercih edilen sistemdir. Hem 110V / 60 Hz hem de 220V / 50 Hz modelleri, tek bir fan, kontrol edilebilir özellikli DG-700 basınç ve akış ölçer manometre ve ayarlanabilir alüminyum çerçeve ile naylon panel içerir. Tek fanlı sistemlerin yanında çok fanlı sistemleri de mevcuttur. Şekil 4.23’de sızdırmazlık ölçümü yapılan örnek mekânlardan birinde kurulumu tamamlanan Blower Door Test cihazı görülmektedir.



Şekil 4.23. Tek Fanlı Blower Door Sistemi

Şekil 4.24'te Blower Door Test cihazına ait elemanlar görülmekte olup, metal çerçeveler Blower Door Test cihazının ölçüm yapılacak mekan kapısına sabit bir şekilde yerleştirilmesini sağlar. DG 700 model manometre Blower Door Test cihazının basınç ve akış ölçümünü yapan ve kaydeden gerekli olduğu yerlerde verilerin bilgisayara aktarımına olanak veren önemli bir parçasıdır. Naylon panel (membran) ise sızdırmazlık ölçümlerinin yapıldığı mekânda Blower Door Test cihazının kurulduğu kapı çerçevesinde fanın hava akışını sağladığı bölge dışında herhangi bir hava sızıntısı olmaması için kullanılmaktadır.



Şekil 4.24. Blower Door Test Cihazına ait Elemanlar (Shielder)

4.1.4. Termal Kamera

Çalışmada Blower Door Test cihazı ile hava sızdırmazlık ölçümü esnasında TESTO 875 kızılötesi termal kamera ile ısı köprüleri ve hava sızıntı bölgeleri görüntülenmiştir. Kızılötesi termal kameranın başlıca teknik özellikleri Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Ölçümlerde kullanılan Testo 875 Termal Kamera Teknik Özellikleri

Infrared Görüntü Çıkışı		
Odak	Manüel	
Infrared Çözünürlük	160 x 120 piksel	
Görüntü Yenileme Oranı	33 Hz	
SuperResolution (IFOV)	2.1 mrad (Tele: 0,6 mrad)	
SuperResolution (Piksel)	320 x 240 Piksel	
Geometrik Çözünürlük (IFOV)	3,3 mrad (Tele: 1,0 mrad)	
Minimum Odak Mesafesi	0,1 m	
Görüş Alanı	32° x 23°	
Termal duyarlılık	< 50 mK (30°C’de)	
Görüntü çıkış görseli		
Minimum Odak Mesafesi	0,4 m	
Görüntü boyutu	640 x 480 Piksel	
Görüntü Sunumu		
Ekran Seçeneği	Sadece IR, sadece gerçek, IR, gerçek görüntü	
Renk Sayısı	10	
Ekran Tipi	3,5 " LCD, 320 x 240 Piksel	
Video Çıkışı	USB 2.0	

4.2. Metodoloji

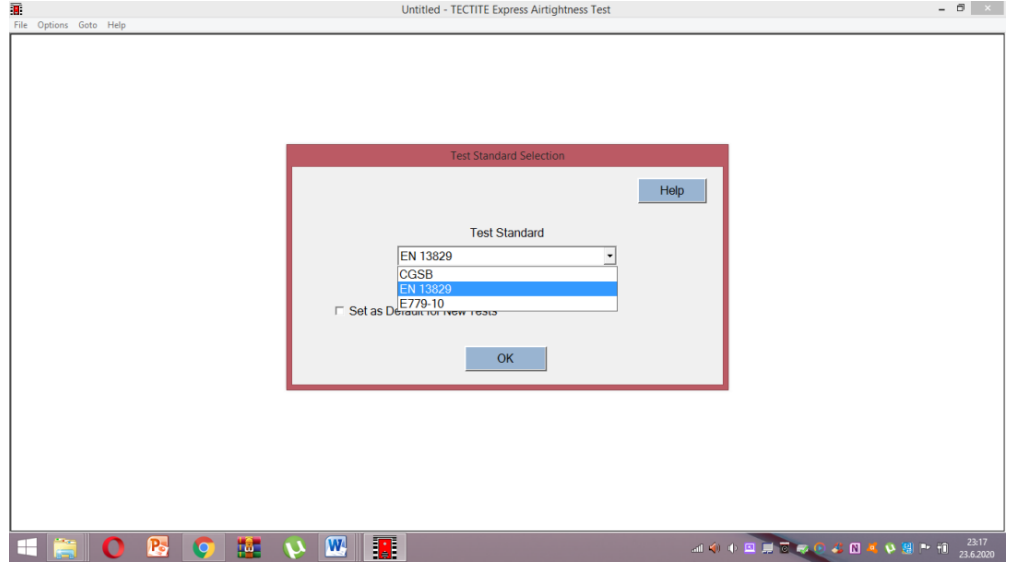
Sızdırmazlık ölçümlerinin yapılacağı mekânların öncelikli olarak alan, hacim ve yüzey alanlarının saptanması gerekir. Bu hesaplamalarda binalara ait mimari uygulama projelerinden yararlanılmıştır.

Blower Door Test cihazı ile sızdırmazlık ölçümleri manuel (fan hızlandırma butonu yardımıyla) ya da cihaza ait olan TECTITE Express yazılımı desteği yapılabilir ve sonuçlar grafik görsel ile elde edilir. Ancak ölçümlerin manuel yapılması durumunda sadece hava debisi bulunur ve diğer sızdırmazlık göstergelerine basit hesaplamalar yapılarak ulaşılır. Şekil 4.25’de Blower Door Test cihazının kurulum işlemine ait adımlar görülmektedir.



Şekil 4.25. Blower Door Test Ünitesi Kurulum Aşamaları

Bilgisayar destekli ölçümde TECTITE Express 4.1 sürüm program kullanılmıştır. Programda öncelikle testin yapılacağı standart belirlenir. Çalışmada ölçümler EN13829 standardına göre yapılmıştır. Standart seçiminin ardından testin gerçekleşmesi için mekân boyutuna ilişkin bilgilerin (taban alanı, hacim ve yüzey alanı) girişi sızdırmazlık indekslerine ulaşmak açısından önemlidir. Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de programa ait bilgi giriş ekranları, Şekil 4.29’da ise ısı köprüleri ve hava sızıntı bölgelerini tespit etmek amacı ile kızılötesi termal kamera ile görüntüleme işlemi yer almaktadır.



Şekil 4.26. TECTITE Program Bilgi Giriş Ekranı

Building Test Info

Test Date: 23.6.2020

Technician:

Customer Information

Customer Name: ERMAN ÇOĞAL

Name Line 2:

Address: BORNOVA

Address Line 2:

City: İZMİR

State/Province:

Zip/Postal Code:

Phone:

Fax:

Email:

Website:

Building Information

Project Number:

Building: EGE ÜNİVERSİTESİ

Building Address:

Address Line 2:

City:

State/Province:

Zip/Postal Code:

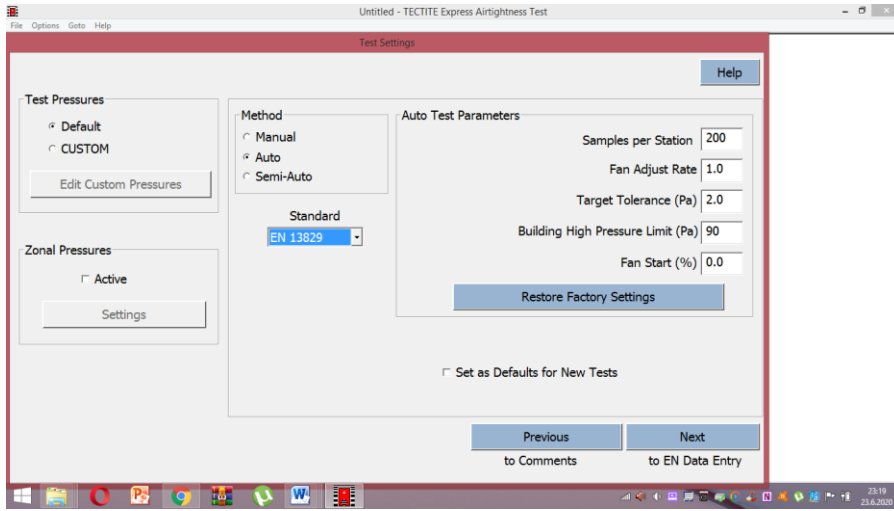
Year of Construction:

Building Dimensions

Volume	136.63	m ³
Floor Area	65.50	m ²
Surface Area	182.75	m ²
Height	2.75	m
Uncertainty of Building Dimensions		%

Buttons: Clear, Next, to Comments

Şekil 4.27. TECTITE Program Bilgi Giriş Ekranı



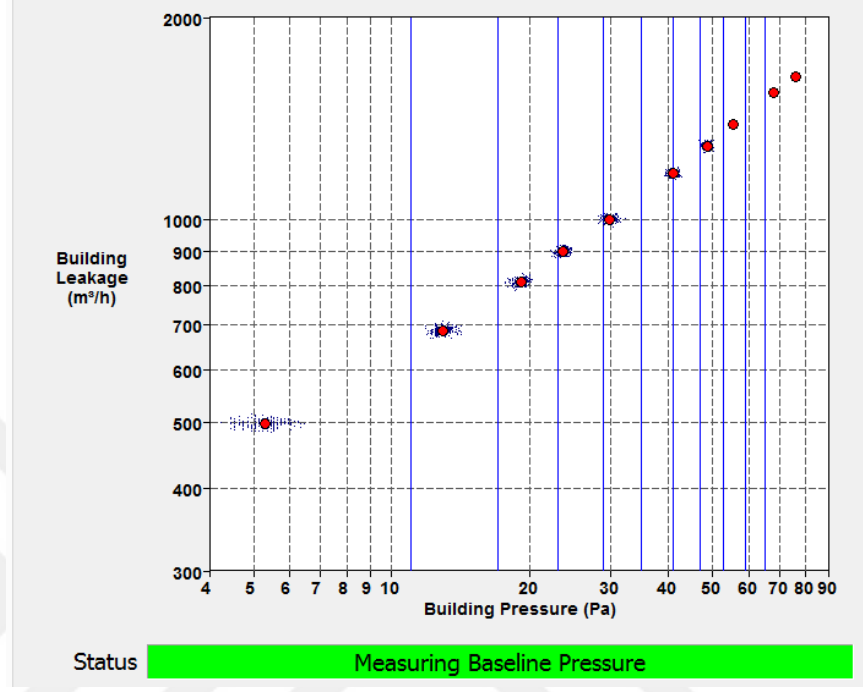
Şekil 4.28. TECTITE Program Bilgi Giriş Ekranı



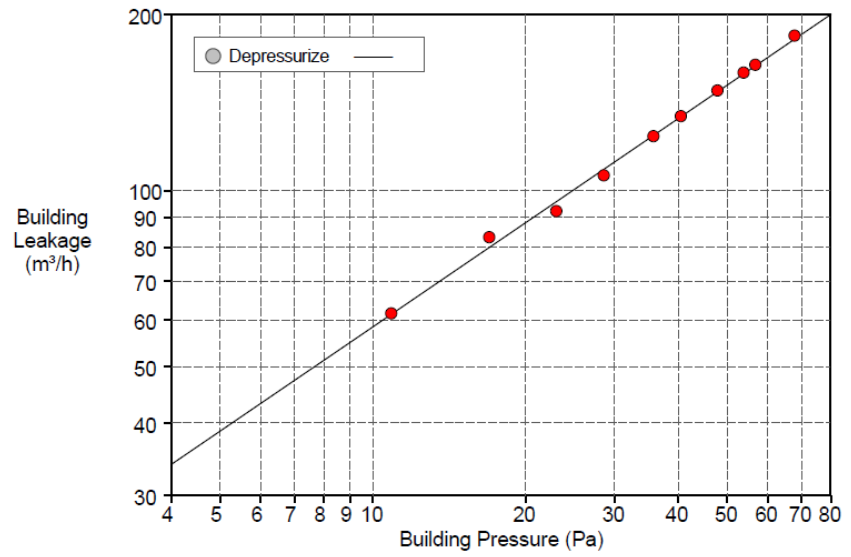
Şekil 4.29. Kızılötesi Termal Kamera ile Görüntüleme

Test sırasında fan hızlı bir biçimde içerideki havayı dışarı aktarır. Bu yöntem negatif basınçlandırma'dır. Bina kabuğunda (iç-dış ortam arasında) yaklaşık 70 Pascal basınç farkı oluşturulur. Basınç farkı yaklaşık olarak 10 Pascal düşüşler ile azaltılarak kaydedilir ve elde edilen lineer doğru ile 50 Pascal basınç farkındaki hava debisi belirlenerek hava sızdırmazlık göstergeleri bulunur (Şekil 4.30). Testin tamamlanmasının ardından oluşan grafik Şekil 4.31'de görülmektedir. Ayrıca testin gerçekleştirildiği bilgisayar programı tarafından test

sonucunda elde edilen sızdırmazlık göstergeleri raporu Şekil 4.32 ve test anında fan basıncı bilgilerinin içeren test raporu örneği Şekil 4.33'te yer almaktadır.



Şekil 4.30. Numune Alma İşleminde Test Grafiği Görüntüsü



Şekil 4.31. Test Sonunda Elde Edilen Grafik



BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 7.11.2019 Technician: erman
 Test File: 7. kat 704 cur Project Number: 7. kat 704
 Customer: 7. kat 704 Building Address:

Phone:
 Fax:

Test Results at 50 Pascals:

V50: m³/h Airflow 189 (+/- 1.2 %)
 n50: 1/h (Air Change Rate) 4.12
 w50: m³/(h·m² Floor Area) 10.71
 q50: m³/(h·m² Envelope Area) 2.30

Leakage Areas: 77.1 cm² (+/- 2.3 %) Canadian EqLA @ 10 Pa or 0.94 cm²/m² Surface Area
 42.0 cm² (+/- 3.9 %) LBL ELA @ 4 Pa or 0.51 cm²/m² Surface Area

Building Leakage Curve:

Air Flow Coefficient (Cenv) = 16.3 m³/(h·Paⁿ) (+/- 6.3 %)
 Air Leakage Coefficient (CL) = 16.3 m³/(h·Paⁿ) (+/- 6.3 %)
 Exponent (n) = 0.626 (+/- 0.018)
 Correlation Coefficient = 0.99940

Test Standard: EN 13829
 Test Mode: Depressurization
 Type of Test Method: A
 Regulation complied with: n50 ≤ 1.5 1/h

Şekil 4.32. Ölçüm Sonucu BDT Sızdırmazlık Göstergeleri Raporu, BAUN 704

BUILDING LEAKAGE TEST Page 3 of 4

Date of Test: 7.11.2019 Test File: 7. kat 704 cur

Depressurization Test:

Environmental Data

Indoor Temperature (°C)	Outdoor Temperature (°C)	Barometric Pressure (Pa)
23.0	20.0	101325.0

Pre-Test

Baseline Pressure Data

Post-Test

$\Delta p_{0,1^-}$	$\Delta p_{0,1^+}$	$\Delta p_{0,1}$	$\Delta p_{0,2^-}$	$\Delta p_{0,2^+}$	$\Delta p_{0,2}$
-1.1	0.0	-1.1	-1.7	0.0	-1.7

Data Points

Nominal Building Pressure (Pa)	Baseline Adjusted Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (m ³ /h)	Adjusted Flow (m ³ /h)	% Error	Fan Configuration
-1.1	n/a	n/a				
-65.6	-64.2	114.5	222	221	0.0	Ring C
-60.5	-59.1	100.1	208	207	-1.8	Ring C
-54.4	-53.0	92.2	199	198	0.8	Ring C
-48.0	-46.6	78.9	184	183	0.9	Ring C
-42.2	-40.8	66.6	168	167	0.3	Ring C
-36.6	-35.2	53.7	151	150	-1.3	Ring C
-28.9	-27.5	40.5	130	129	-0.5	Ring C
-24.6	-23.2	34.7	120	120	2.0	Ring C
-18.5	-17.1	23.5	98	98	1.2	Ring C
-11.7	-10.3	31.4	70	69	-1.5	Ring D
-1.7	n/a	n/a				

Şekil 4.33. Ölçüm Anında BDT Fan Basıncı Değerleri, BAUN 704

5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Alan çalışması olarak belirlenen Ege Üniversitesi ve Balıkesir Üniversitesi kampüslerinde yer alan eğitim binalarında ölçümler Blower Door Test ünitesi aracılığı yapılmış ve öğretim elemanları ofisleri ve dersliklerin hava sızdırmazlık değerleri, hava değişim oranı (n_{50}), hava geçirgenliği (q_{50}) ve özgül sızıntı oranı (w_{50}) belirlenmiştir. Ayrıca test edilen mekânlarda termal görüntüleme yapılmıştır. Bazı test mekânlarında termal görüntü elde edilememiştir. Bunun nedeni ise ısıtma sisteminin kapalı olması ve dış ortam sıcaklığının ölçüm yapılan günlerde yüksek olmasından dolayı iç ve dış ortam arasında sıcaklık farkının görüntü elde edecek düzeyde olmamasıdır.

5.1. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Blower Door Test Bulguları

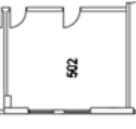
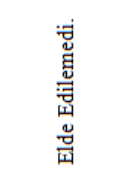
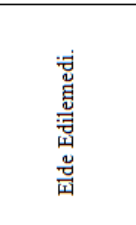
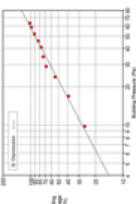
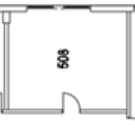
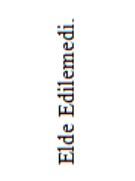
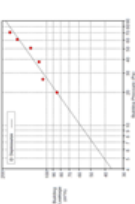
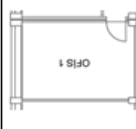
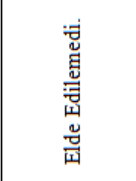
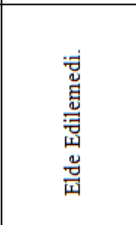
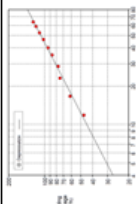
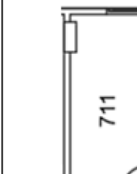
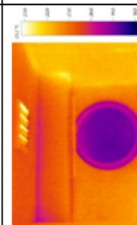
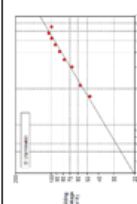
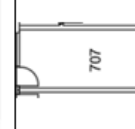
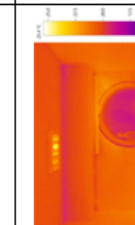
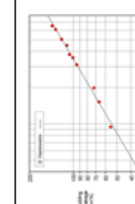
5.1.1. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Ofisler

Balıkesir Üniversitesi (BAUN) Mimarlık Fakültesi ofislerinde yapılan testlerde elde edilen bulgular ve görüntüler Tablo 5.1, Tablo 5.2, Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'te görülmektedir.

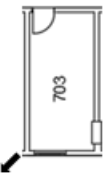
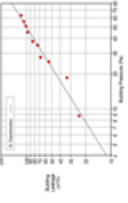
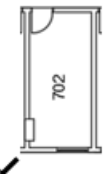
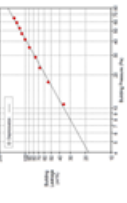
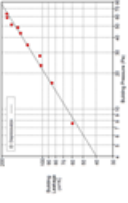
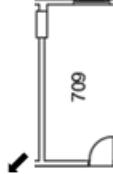
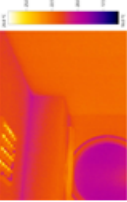
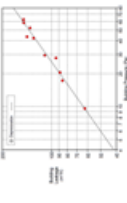
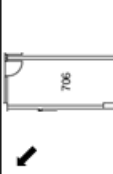
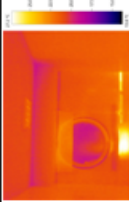
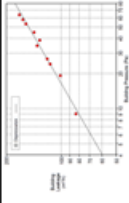
Tablo 5.1. BAUN Mimarlık Fakültesi Ofislere ait Test Bulguları

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ MİMARLIK FAKÜLTESİ OFİSLER									
Mekan	Hacim (m ³)	Taban Alanı(m ²)	Yüzey Alanı(m ²)	Y.A./V	Y.A./T.A.	V50 (m ³ /h)	n50 (h ⁻¹)	q50 (m ³ /h·m ²)	w50 (m ³ /h·m ²)
Ofis 502	94,46	36,33	135,58	1,44	3,73	90,00	0,95	0,66	2,48
Ofis 508	94,46	36,33	135,58	1,44	3,73	139,00	1,47	1,03	3,83
Ofis 1	60,32	23,20	97,36	1,61	4,20	108,00	1,79	1,11	4,66
Ofis 711	45,94	17,67	82,40	1,79	4,66	94,00	2,05	1,14	5,32
Ofis 707	56,37	21,68	96,92	1,72	4,47	120,00	2,13	1,24	5,54
Ofis 703	45,94	17,67	82,40	1,79	4,66	100,00	2,18	1,21	5,66
Ofis 2	62,36	23,98	100,22	1,61	4,18	137,00	2,20	1,37	5,71
Ofis 702	45,94	17,67	82,40	1,79	4,66	114,00	2,48	1,38	6,45
Ofis 501	59,28	22,80	96,04	1,62	4,21	158,00	2,67	1,65	6,93
Ofis 709	45,94	17,67	82,40	1,79	4,66	137,00	2,98	1,66	7,75
Ofis 706	45,94	17,67	82,40	1,79	4,66	151,00	3,29	1,83	8,55
Ofis 710	45,94	17,67	82,40	1,79	4,66	153,00	3,33	1,86	8,66
Ofis 701	66,09	25,42	104,40	1,58	4,11	240,00	3,63	2,30	9,44
Ofis 507	39,27	15,10	73,62	1,87	4,88	152,00	3,87	2,06	10,07
Ofis 704	45,94	17,67	82,40	1,79	4,66	189,00	4,11	2,29	10,70
Ofis 705	111,28	42,80	115,02	1,03	2,69	1771,00	15,91	15,40	41,38

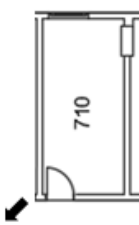
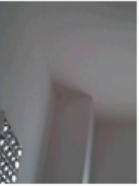
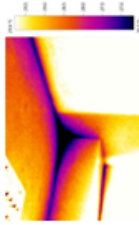
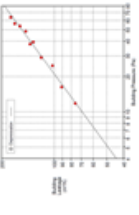
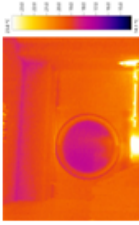
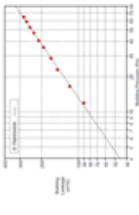
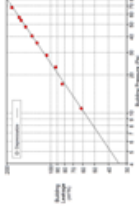
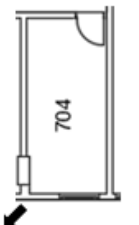
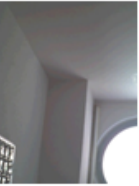
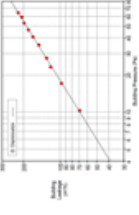
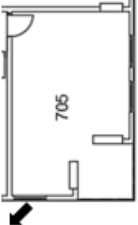
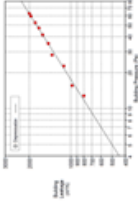
Tablo 5.2. BAUN Mimarlık Fakültesi Ofislerinde Yapılan Blower Door Ölçümlerinde Elde Edilen Bulgular ve Görüntüler

Ölçüm Yapılan Mekan	Ölçüm Yapılan Mekan Planı	Gerçek Görüntü	Termal Görüntü	BDT – Grafik	Türkiye TS 825 (n50)	Fransa (n50)	Birleşik Krallık (q50)	Pasif Ev Standardı (n50)
OFİS 502 36,33 m ²					0,95 < 2,00 Yüksek Sızdırmaz	0,95 ≤ 5,80 Uygun	0,66 ≤ 3,00 En İyi Uygulama	0,95 > 0,60 Uygun Değil
OFİS 508 36,33 m ²					1,47 < 2,00 Yüksek Sızdırmaz	1,47 ≤ 5,80 Uygun	1,03 ≤ 3,00 En İyi Uygulama	1,47 > 0,60 Uygun Değil
OFİS 1 23,20 m ²					1,79 < 2,00 Yüksek Sızdırmaz	1,79 ≤ 5,80 Uygun	1,11 ≤ 3,00 En İyi Uygulama	1,79 > 0,60 Uygun Değil
OFİS 711 17,67 m ²					2 ≤ 2,05 ≤ 5 Orta Sızdırmaz	2,05 ≤ 5,80 Uygun	1,14 ≤ 3,00 En İyi Uygulama	2,05 > 0,60 Uygun Değil
OFİS 707 21,68 m ²					2 ≤ 2,13 ≤ 5 Orta Sızdırmaz	2,13 ≤ 5,80 Uygun	1,24 ≤ 3,00 En İyi Uygulama	2,13 > 0,60 Uygun Değil

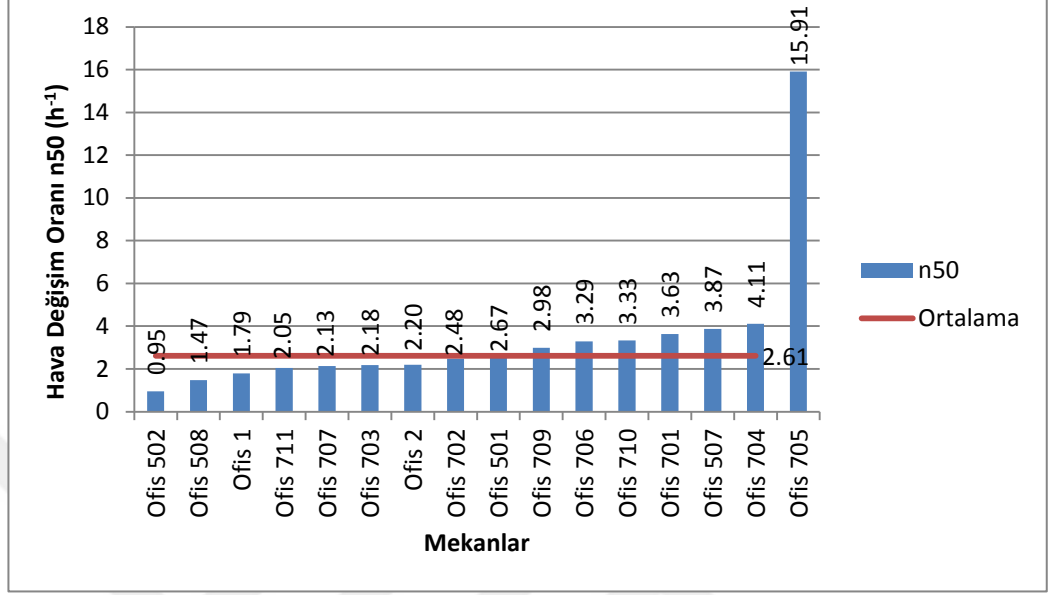
Tablo 5.3. BAUN Mimarlık Fakültesi Ofislerinde Yapılan Blower Door Ölçümlerinde Elde Edilen Bulgular ve Görüntüler

Ölçüm Yapılan Mekan	Ölçüm Yapılan Mekan Planı	Gerçek Görüntü	Termal Görüntü	BDT - Grafik	Türkiye TS 825 (n50)	Fransa (n50)	Birleşik Krallık (q50)	Pasif Ev Standardı (n50)
OFİS 703 17,67 m ²					$2 \leq 2,18 \leq 5$ Orta Sızdırmaz	$2,18 \leq 5,80$ Uygun	$1,21 \leq 3,00$ En İyi Uygulama	$2,18 > 0,60$ Uygun Değil
OFİS 2 23,98 m ²		Elde Edilemedi.	Elde Edilemedi.		$2 \leq 2,20 \leq 5$ Orta Sızdırmaz	$2,20 \leq 5,80$ Uygun	$1,37 \leq 3,00$ En İyi Uygulama	$2,20 > 0,60$ Uygun Değil
OFİS 702 17,67 m ²					$2 \leq 2,48 \leq 5$ Orta Sızdırmaz	$2,48 \leq 5,80$ Uygun	$1,38 \leq 3,00$ En İyi Uygulama	$2,48 > 0,60$ Uygun Değil
OFİS 501 22,80 m ²		Elde Edilemedi.	Elde Edilemedi.		$2 \leq 2,67 \leq 5$ Orta Sızdırmaz	$2,67 \leq 5,80$ Uygun	$1,65 \leq 3,00$ En İyi Uygulama	$2,67 > 0,60$ Uygun Değil
OFİS 709 17,67 m ²					$2 \leq 2,98 \leq 5$ Orta Sızdırmaz	$2,98 \leq 5,80$ Uygun	$1,66 \leq 3,00$ En İyi Uygulama	$2,98 > 0,60$ Uygun Değil
OFİS 706 17,67 m ²					$2 \leq 3,29 \leq 5$ Orta Sızdırmaz	$3,29 \leq 5,80$ Uygun	$1,83 \leq 3,00$ En İyi Uygulama	$3,29 > 0,60$ Uygun Değil

Tablo 5.4. BAUN Mimarlık Fakültesi Ofislerinde Yapılan Blower Door Ölçümlerinde Elde Edilen Bulgular ve Görüntüler

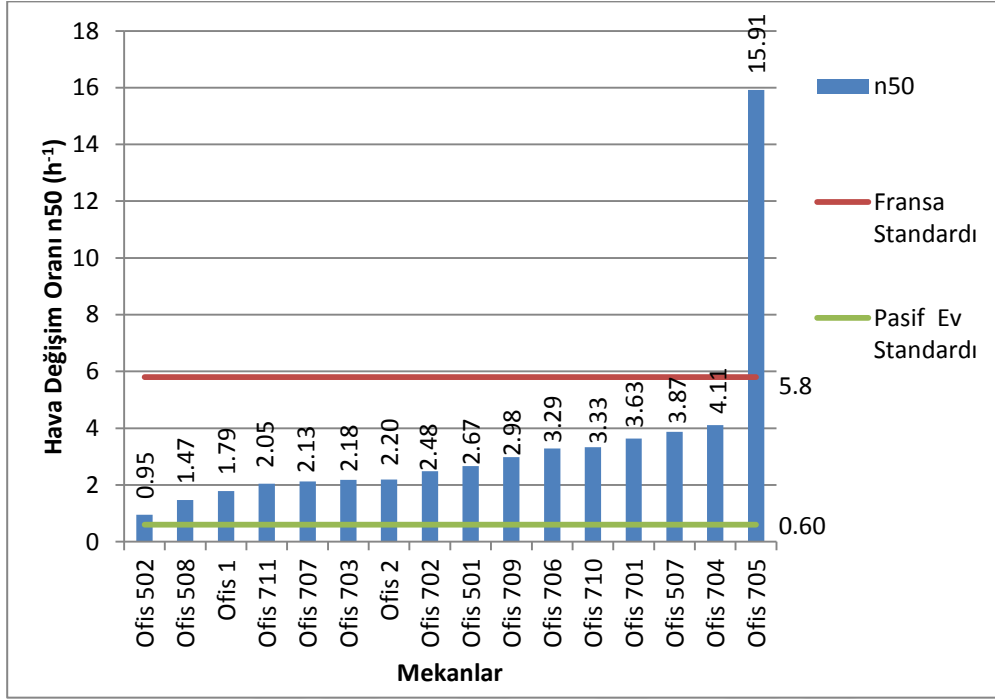
Ölçüm Yapılan Mekan	Ölçüm Yapılan Mekan Planı	Gerçek Görüntü	Termal Görüntü	BDT - Grafik	Türkiye TS 825 (n50)	Franza (n50)	Birleşik Kralılık (q50)	Pasif Ev Standardı (n50)
OFİS 710 17,67 m ²					2 ≤ 3,33 ≤ 5 Orta Sızdırmaz	3,33 ≤ 5,80 Uygun	1,86 ≤ 3,00 En İyi Uygulama	3,33 > 0,60 Uygun Değil
OFİS 701 25,42 m ²					2 ≤ 3,63 ≤ 5 Orta Sızdırmaz	3,63 ≤ 5,80 Uygun	2,30 ≤ 3,00 En İyi Uygulama	3,63 > 0,60 Uygun Değil
OFİS 507 15,10 m ²		Elde Edilemedi.	Elde Edilemedi.		2 ≤ 3,87 ≤ 5 Orta Sızdırmaz	3,87 ≤ 5,80 Uygun	2,06 ≤ 3,00 En İyi Uygulama	3,87 > 0,60 Uygun Değil
OFİS 704 17,67 m ²					2 ≤ 4,11 ≤ 5 Orta Sızdırmaz	4,11 ≤ 5,80 Uygun	2,29 ≤ 3,00 En İyi Uygulama	4,11 > 0,60 Uygun Değil
OFİS 705 42,80 m ²					15,91 > 5 Düşük Sızdırmaz	15,91 > 5,80 Uygun Değil	15,40 > 9,00 Uygun Değil	15,91 > 0,60 Uygun Değil

Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi öğretim elemanlarına ait ofislerde yapılan test sonuçlarına göre elde edilen hava değişim oranları ve ortalama değer Şekil 5.1’de yer almaktadır.



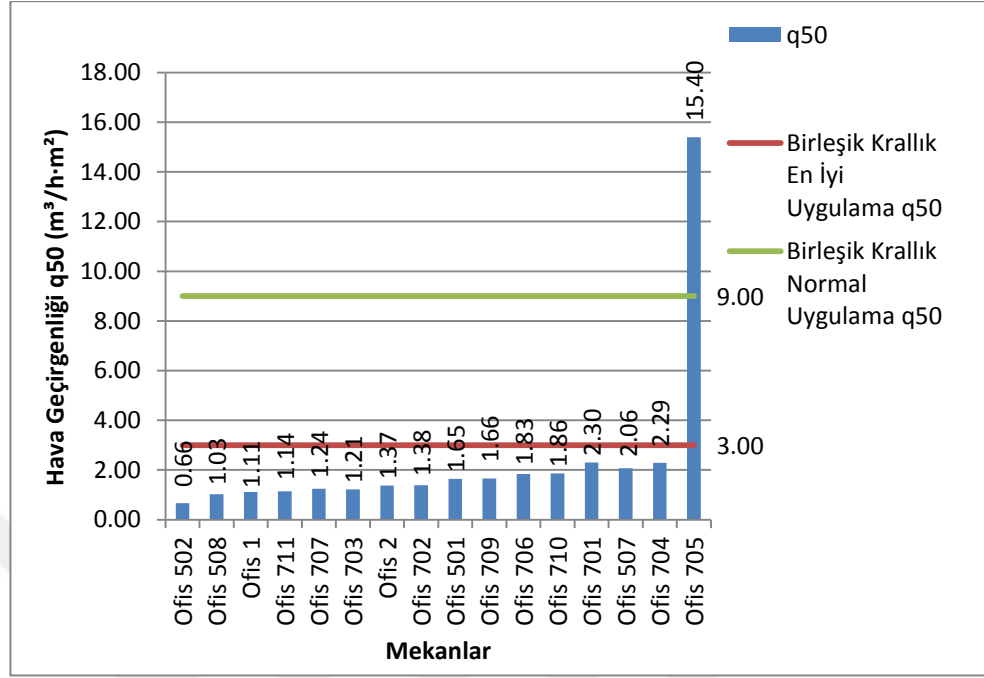
Şekil 5.1. BAUN Mimarlık Fakültesi Öğretim Elemanları Ofislere ait Hava Değişim Oranları

Öğretim elemanlarına ait ofislerin hava değişim oranlarına bakıldığında en düşük değer $0,95 \text{ h}^{-1}$ ile 502 numaralı ofis ve en yüksek değer ise $15,91 \text{ h}^{-1}$ ile 705 numaralı ofiste ölçülmüştür. 705 numaralı ofisin sızdırmazlık değeri ortalamanın oldukça üstündedir ve bu nedenle ortalamaya dâhil edilmemiştir. Bunun nedeni en üst katta yer alan ofis cephesinin farklı kuruluşa sahip olmasıdır; binanın üst 2 katında giydirme cephe uygulanmış olup farklı duvar kesiti ve malzeme kullanımı söz konusudur. Ofislerin ölçülen n_{50} değerleri Pasif Ev standardı (Passive House) sınır değerinin ($n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$) üzerindedir. Fransa sızdırmazlık sınır değeri ($n_{50} \leq 5,8 \text{ h}^{-1}$) ile kıyaslandıklarında 705 numaralı ofis ($n_{50}: 15,91 \text{ h}^{-1}$) dışında ölçülen tüm mekanların Fransa sızdırmazlık sınır değerinin altında ve uygun olduğu saptanmıştır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. BAUN Mimarlık Fakültesi Öğretim Elemanları Ofislerine ait Hava Değişim Oranlarının, Pasif Ev ve Fransa Sızdırmazlık Sınır Değerleri ile karşılaştırılması

Birleşik Krallık ATTMA TSL2 standardında yer alan eğitim binaları sızdırmazlık değerleri en iyi uygulama ($q_{50} \leq 3,00 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$) ve normal uygulama ($3,00 < q_{50} \leq 9,00 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$) olmak üzere iki farklı grup sınır değerleri ile tanımlanmıştır. Ayrıca başta Pasif Ev Standardı olmak üzere Fransa vb. başlıca Avrupa ülkelerinde kıyas değer olarak hava değişim oranı (n_{50}) kabul edilmesine karşın Birleşik Krallık standardında kıyas değer olarak hava geçirgenliği (q_{50}) kabul görür. Ölçüm yapılan öğretim elemanlarına ait ofislerin hava geçirgenlik değerlerine göre 705 numaralı ofis dışında diğer ofisler $0,66\text{--}2,29 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ aralığında yer almakta olup en iyi uygulama ($q_{50} \leq 3,0 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$) sınıfındadır; ancak 705 numaralı ofis $15,40 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ hava geçirgenlik değeri ile normal uygulama ($q_{50} \leq 9,0 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$) sınır değerini aşmakta olup standardı karşılamamaktadır. (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Öğretim Elemanları Ofislerine ait Hava Geçirgenlik Değerleri ve Birleşik Krallık Sızdırmazlık Sınır Değerleri

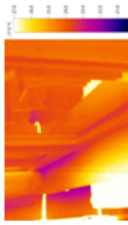
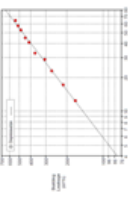
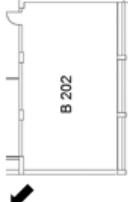
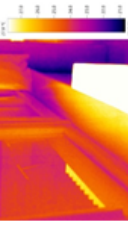
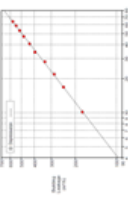
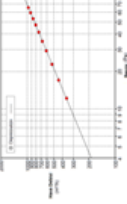
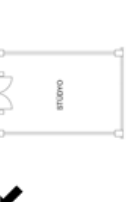
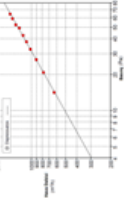
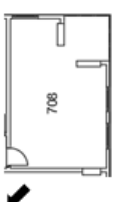
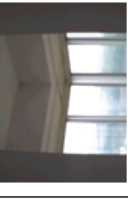
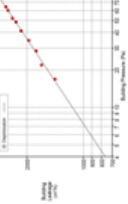
5.1.2. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Derslikler

Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi dersliklerinde yapılan ölçümlerde elde edilen bulgular ve termal görüntüler Tablo 5.5 ve Tablo 5.6'da yer almaktadır.

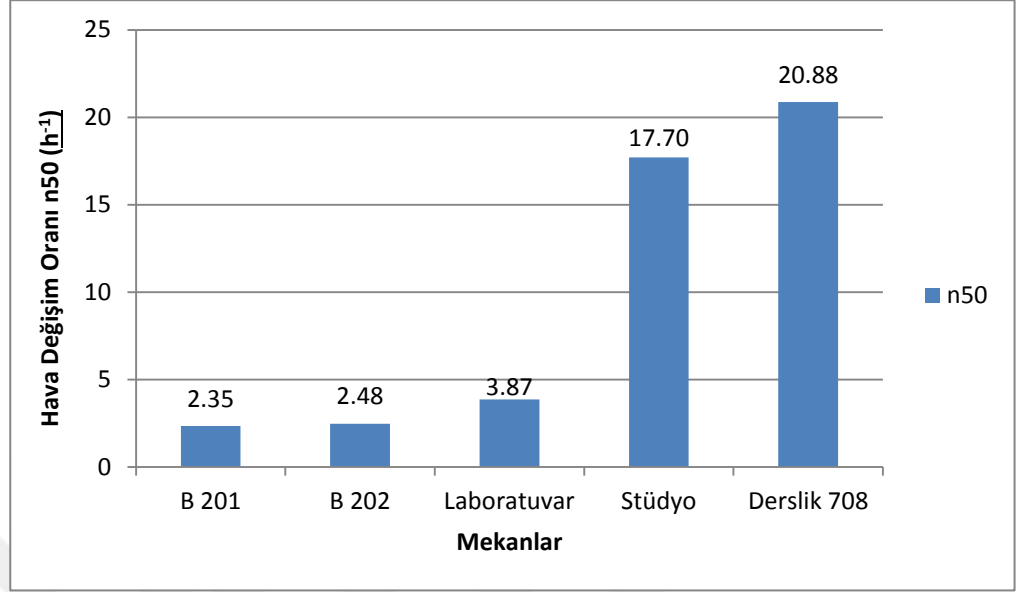
Tablo 5.5. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dersliklerine ait BDT Ölçüm Sonuçları

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ MİMARLIK FAKÜLTESİ DERSLİKLER									
Mekan	Hacim (m³)	Taban Alanı (m²)	Yüzey Alanı (m²)	Y.A./V	Y.A./T.A.	V ₅₀ (m³/h)	n ₅₀ (h ⁻¹)	q ₅₀ (m³/h·m²)	w ₅₀ (m³/h·m²)
B 201	198,84	76,47	247,32	1,24	3,23	467,00	2,35	1,89	6,11
B 202	198,84	76,47	247,32	1,24	3,23	494,00	2,48	2,00	6,46
Laboratuvar	214,76	82,60	262,96	1,22	3,18	832,00	3,87	3,16	10,07
Mimarlık Stüdyosu	74,35	23,17	111,04	1,49	4,79	1316,00	17,70	11,85	56,80
708	111,28	42,80	115,02	1,03	2,69	2323,00	20,88	20,20	54,28

Tablo 5.6. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dersliklerinde Yapılan Blower Door Ölçümlerinde Elde Edilen Bulgular ve Görüntüler

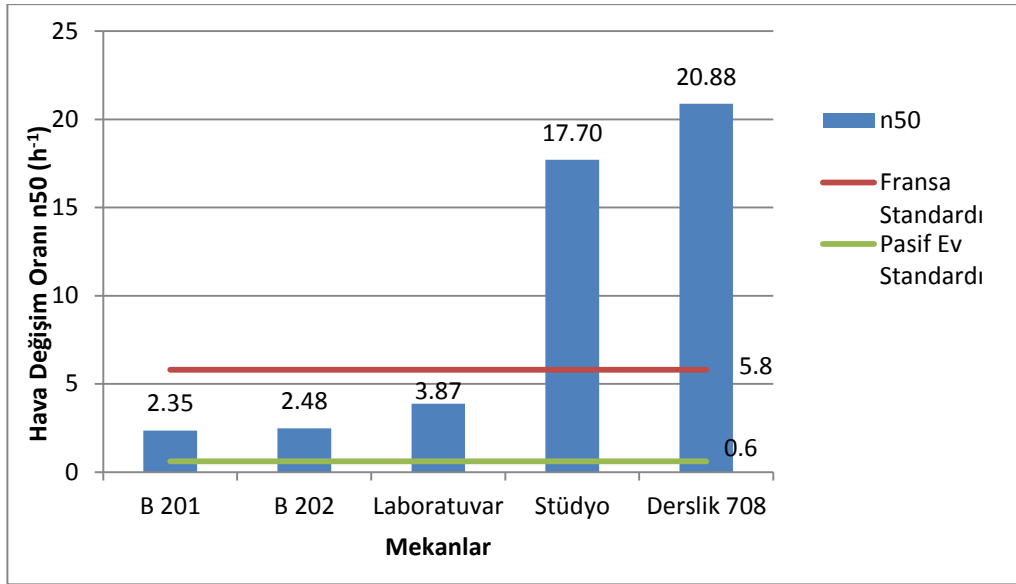
Ölçüm Yapılan Mekan	Ölçüm Yapılan Mekan Planı	Gerçek Görüntü	Termal Görüntü	BDI - Grafik	Türkiye TS 825 (n50)	Fransa (n50)	Birleşik Krallık (q50)	Pasif Ev Standardı (n50)
B 201 76,47 m ²					$2 \leq 2,35 \leq 5$ Orta Sızdırmaz	$2,35 \leq 5,80$ Uygun	$1,89 \leq 3,00$ En İyi Uygulama	$2,35 > 0,60$ Uygun Değil
B 202 76,47 m ²					$2 \leq 2,48 \leq 5$ Orta Sızdırmaz	$2,48 \leq 5,80$ Uygun	$2,00 \leq 3,00$ En İyi Uygulama	$2,48 > 0,60$ Uygun Değil
LABORATUVAR 82,60 m ²			Elde Edilemedi.		$2 \leq 3,87 \leq 5$ Orta Sızdırmaz	$3,87 \leq 5,80$ Uygun	$3,00 \leq 3,16 \leq 9,00$ Normal Uygulama	$3,87 > 0,60$ Uygun Değil
MİMARLIK STÜDYOSU 23,17 m ²			Elde Edilemedi.		$17,70 > 5$ Düşük Sızdırmaz	$17,70 > 5,80$ Uygun Değil	$11,85 > 9,00$ Uygun Değil	$17,70 > 0,60$ Uygun Değil
DERSLİK 708 42,80 m ²					$20,88 > 5$ Düşük Sızdırmaz	$20,88 > 5,80$ Uygun Değil	$20,20 > 9,00$ Uygun Değil	$20,88 > 0,60$ Uygun Değil

Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesinde bulunan dersliklerde yapılan test sonuçlarından elde edilen hava değişim oranları Şekil 5.4'te yer almaktadır.



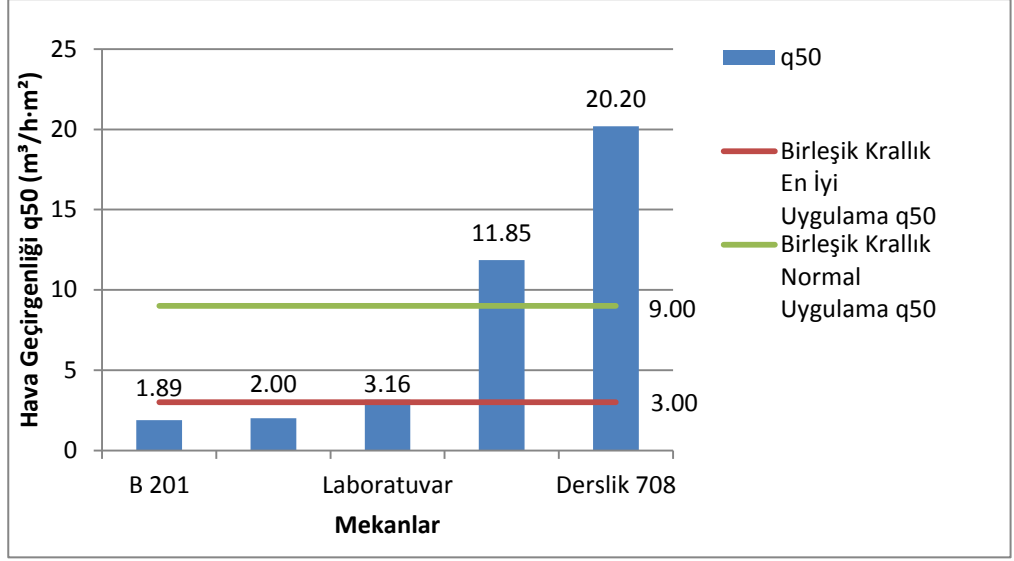
Şekil 5.4. BAUN Mimarlık Fakültesi Dersliklerine ait Hava Değişim Oranları (n50)

Dersliklere ait hava değişim oranlarına bakıldığında hiçbir derslik Pasif Ev standardına uygun değildir ($n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$), n_{50} değerleri 2,35–20,88 h^{-1} aralığında yer almaktadır. 708 numaralı dersliğin cephe kuruluşunun (cam giydirme cephe) farklı olması termal kamera görüntülerinden de görüldüğü üzere yüksek sızdırmazlık değerine ($n_{50}:20,88 \text{ h}^{-1}$) sahip olmasında oldukça etkili olduğu düşünülmektedir. Fransa sızdırmazlık sınır değeri ($n_{50} \leq 5,8 \text{ h}^{-1}$) ile kıyaslandığında B201, B202 derslikleri ve laboratuvar 2,35 h^{-1} , 2,48 h^{-1} , 3,87 h^{-1} değerleri ile standarda uygun olup; mimarlık stüdyosu ($n_{50}:17,70 \text{ h}^{-1}$) ve 708 numaralı derslik ($n_{50}:20,88 \text{ h}^{-1}$) Fransa sızdırmazlık standardına ait sınır değerinin oldukça üzerindedir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. BAUN Mimarlık Fakültesi Dersliklerine ait n50 Değerlerinin Pasif Ev Standardı ve Fransa Standardı ile Karşılaştırılması

Birleşik Krallık standardında eğitim binalarına ait en iyi uygulama ($q_{50} \leq 3,00 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$) ve normal uygulama ($3,00 < q_{50} \leq 9,00 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$) sızdırmazlık sınır değerleri ile ölçüm yapılan dersliklerin hava geçirgenlikleri kıyaslandığında B201 ($q_{50}: 1,89 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$) ve B202 ($q_{50}: 2,00 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$) dersliklerinin en iyi uygulama sınıfında olduğu; laboratuvarın da $3,16 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$ hava geçirgenlik değeri ile bu sınıfta değerlendirilebileceği öngörülmektedir. Mimarlık Stüdyosu ($q_{50}: 11,85 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$) ve 708 numaralı dersliğin ($q_{50}: 20,20 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$) hava geçirgenlik değerleri ise normal uygulama ($3,00 < q_{50} \leq 9,00 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$) sınır değerinin dışında olup Birleşik Krallık standardını karşılamamaktadır (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dersliklerine ait q50 Değerlerinin Birleşik Krallık Standardı ile Karşılaştırılması

5.2. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ve Makine Mühendisliği Bölümü Binaları Bulguları

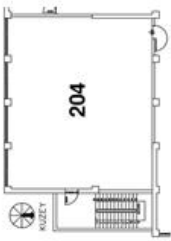
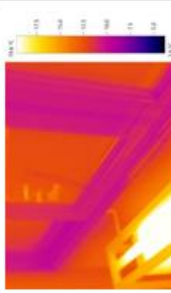
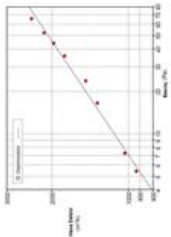
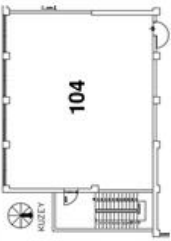
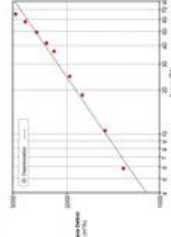
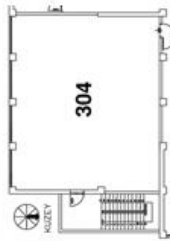
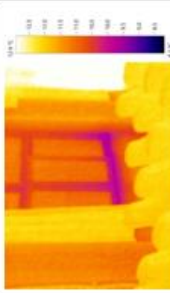
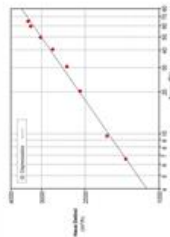
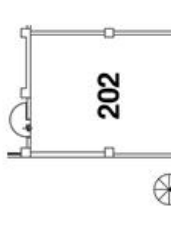
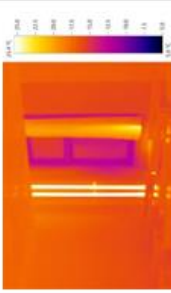
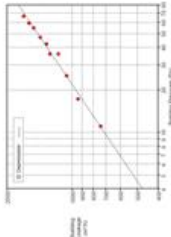
5.2.1. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Binası Derslikleri Blower Door Test Ölçüm Sonuçları

Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği binası dersliklerinde yapılan testlerde elde edilen bulgular ve görüntüler Tablo 5.7, Tablo 5.8 ve Tablo 5.9’da görülmektedir.

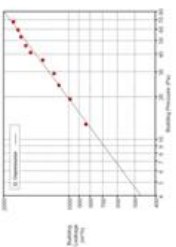
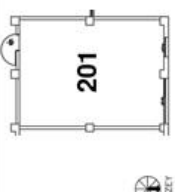
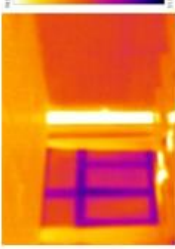
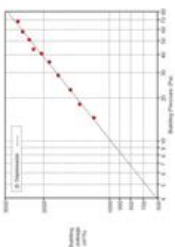
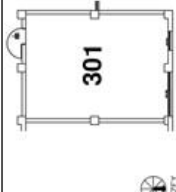
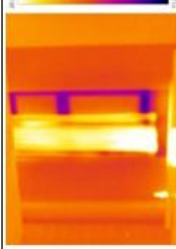
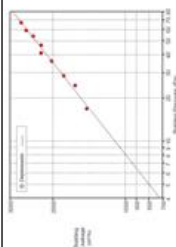
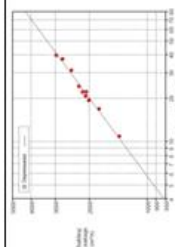
Tablo 5.7. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Binası Dersliklere ait BDT Ölçüm Sonuçları

EGE ÜNİVERSİTESİ İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BİNASI DERSLİKLER									
Mekân	Hacim (m³)	Taban Alanı (m²)	Yüzey Alanı (m²)	Y.A./V	Y.A./T.A.	V ₅₀ (m³/h)	n ₅₀ (h ⁻¹)	Q ₅₀ (m³/h·m²)	W ₅₀ (m³/h·m²)
204	375,73	136,63	403,06	1,07	2,95	2065,00	5,50	5,12	15,11
104	375,73	136,63	403,06	1,07	2,95	2537,00	6,75	6,29	18,57
304	375,73	136,63	403,06	1,07	2,95	3018,00	8,03	7,49	22,09
202	152,63	55,5	192,13	1,26	3,46	1443,00	9,45	7,51	26,00
302	152,63	55,5	191,13	1,25	3,44	1589,00	10,41	8,31	28,63
201	153,72	55,9	191,75	1,25	3,43	2292,00	14,91	11,95	41,00
301	153,72	55,9	191,75	1,25	3,43	2352,00	15,30	12,27	42,08
309	186,73	67,9	230,4	1,23	3,39	3311,00	17,73	14,37	48,76

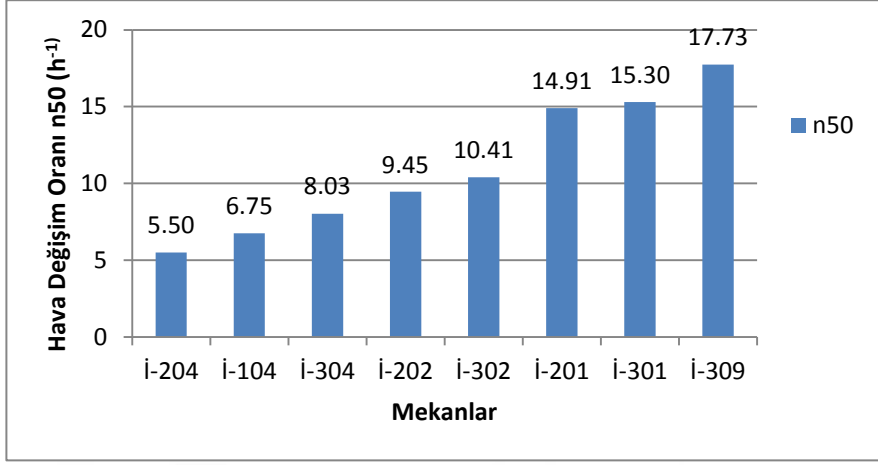
Tablo 5.8. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Binası Dersliklerinde Yapılan Blower Door Ölçümlerinde Elde Edilen Bulgular ve Görüntüler

Ölçüm Yapılan Mekan	Ölçüm Yapılan Mekan Planı	Gerçek Görüntü	Termal Görüntü	BDI - Grafik	Türkiye TS 825 (n50)	Fransa (n50)	Birleşik Krallık (q50)	Pasif Ev Standardı (n50)
DERSLİK 204 136,63 m ²					5,50 > 5,00 Düşük Sızdırmaz	5,50 ≤ 5,80 Uygun	3 < 5,12 ≤ 9 Normal Uygulama	5,50 > 0,60 Uygun Değil
DERSLİK 104 136,63 m ²					6,75 > 5,00 Düşük Sızdırmaz	6,75 > 5,80 Uygun Değil	3 < 6,29 ≤ 9 Normal Uygulama	6,75 > 0,60 Uygun Değil
DERSLİK 304 136,63 m ²					8,03 > 5,00 Düşük Sızdırmaz	8,03 > 5,80 Uygun Değil	3 < 7,49 ≤ 9 Normal Uygulama	8,03 > 0,60 Uygun Değil
DERSLİK 202 55,50 m ²					9,45 > 5,00 Düşük Sızdırmaz	9,45 > 5,80 Uygun Değil	3 < 7,51 ≤ 9 Normal Uygulama	9,45 > 0,60 Uygun Değil

Tablo 5.9. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Binası Dersliklerinde Yapılan Blower Door Ölçümlerinde Elde Edilen Bulgular ve Görüntüler

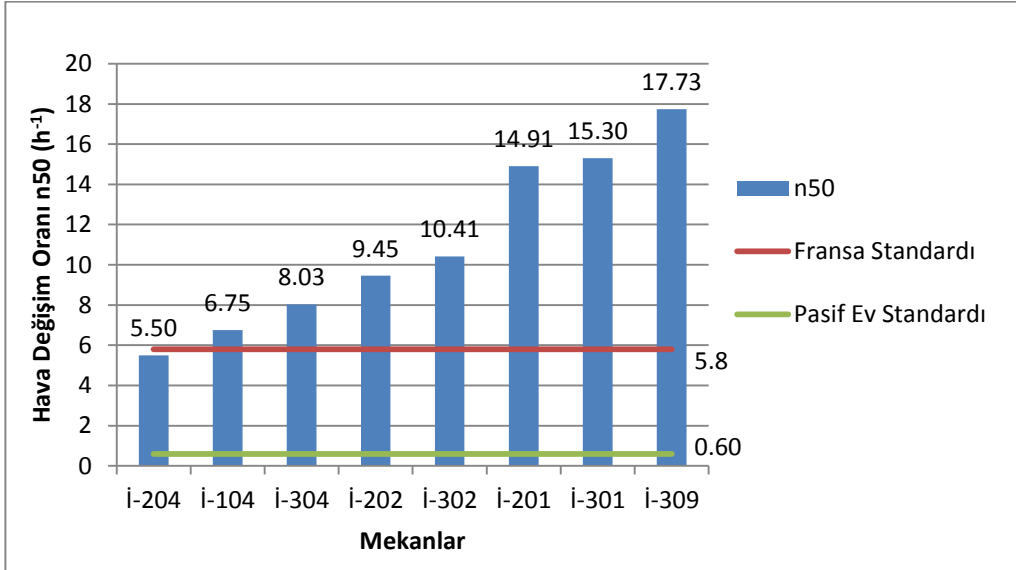
Ölçüm Yapılan Mekan	Ölçüm Yapılan Mekan Planı	Gerçek Görüntü	Termal Görüntü	BDT - Grafik	Türkiye TS 825 (n50)	Fransa (n50)	Birleşik Krallık (q50)	Pasif Ev Standardı (n50)
DERSLİK 302 55,50 m ²					10,41 > 5,00 Düşük Sızdırmaz	10,41 > 5,80 Uygun Değil	3 < 8,31 ≤ 9 Normal Uygulama	10,41 > 0,60 Uygun Değil
DERSLİK 201 55,90 m ²					14,91 > 5,00 Düşük Sızdırmaz	14,91 > 5,80 Uygun Değil	11,95 > 9,00 Uygun Değil	14,91 > 0,60 Uygun Değil
DERSLİK 301 55,90 m ²					15,30 > 5,00 Düşük Sızdırmaz	15,30 > 5,80 Uygun Değil	12,27 > 9,00 Uygun Değil	15,30 > 0,60 Uygun Değil
DERSLİK 309 67,90 m ²			Elde Edilemedi.		17,73 > 5,00 Düşük Sızdırmaz	17,73 > 5,80 Uygun Değil	14,37 > 9,00 Uygun Değil	17,73 > 0,60 Uygun Değil

Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği binasında bulunan dersliklere ait hava değişim oranları Şekil 5.7’de yer almaktadır.



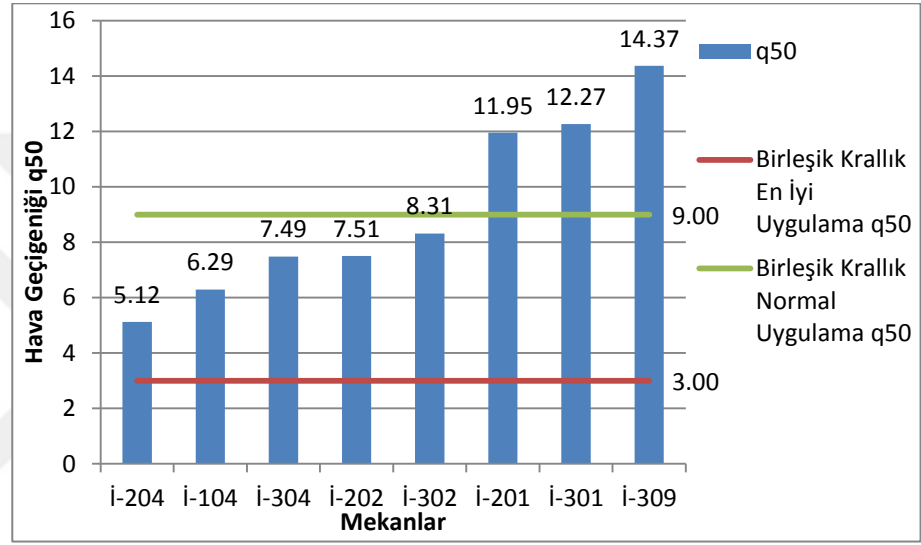
Şekil 5.7. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Binasına ait Hava Değişim Oranları

Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği binasında ölçümü gerçekleştirilen hiçbir dersliğin hava değişim oranı (n_{50}) Pasif Ev standardına ($n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$) uygun değildir. Fransa standardı sınır değeri ($n_{50} \leq 5,8 \text{ h}^{-1}$) ile kıyaslandığında sadece İ-204 numaralı derslik $5,50 \text{ h}^{-1}$ hava değişim oranı ile uygunluk göstermektedir. İ-104, İ-304, İ-202, İ-302, İ-201, İ-301, İ-309 numaralı derslikler sırası ile $6,75 \text{ h}^{-1}$, $8,03 \text{ h}^{-1}$, $9,45 \text{ h}^{-1}$, $10,41 \text{ h}^{-1}$, $14,91 \text{ h}^{-1}$, $15,30 \text{ h}^{-1}$ ve $17,73 \text{ h}^{-1}$ sızdırmazlık değerleri ile Fransa sızdırmazlık sınır değerinin üstünde yer almaktadır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Binasına ait n_{50} Değerlerinin Pasif Ev Standardı ve Fransa Standardı ile Karşılaştırılması

Birleşik Krallık ATTMA-TSL2 standardı hava geçirgenliği (q_{50}) sınır değerlerine bakıldığında Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü binasında bulunan dersliklerin hiçbiri en iyi uygulama sınıfına ($q_{50} \leq 3,00 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$) ait değerleri yakalayamamıştır. İ-204, İ-104, İ-304, İ-202, İ-302 dersliklerinin ise sırası ile $5,12 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$, $6,29 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$, $7,49 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$, $7,51 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$, $8,31 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ hava geçirgenlik değerleri (q_{50}) ile normal uygulama ($3,00 < q_{50} \leq 9,00 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$) sınıfındadır. İ-201, İ-301, İ-309 numaralı derslikler sırası ile $11,95 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$, $12,27 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$, $14,37 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ hava geçirgenlik değerleri (q_{50}) ile Birleşik Krallık sınır değerini ($q_{50} \leq 9,00 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$) aşmakta olup standardı karşılamamaktadır (Şekil 5.9).



Şekil 5.9. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Binası Dersliklere ait q_{50} Değerlerinin Birleşik Krallık Standardı ile Karşılaştırılması

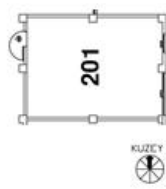
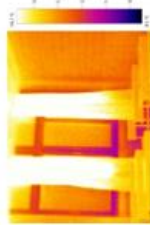
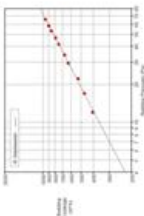
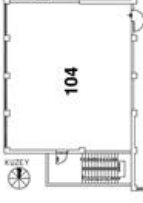
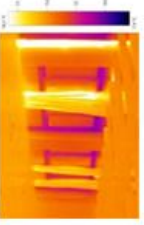
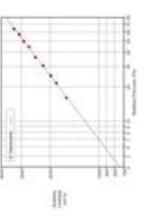
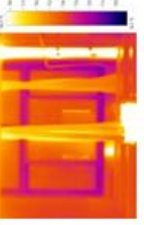
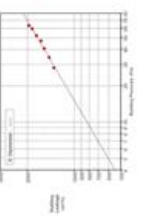
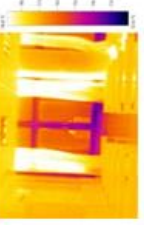
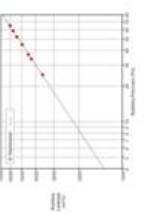
5.2.2. Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Binası Derslikleri Blower Door Test Ölçüm Sonuçları

Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği binası dersliklerinde yapılan ölçümlerde elde edilen bulgular ve görüntüler Tablo 5.10 ve Tablo 5.11'de görülmektedir.

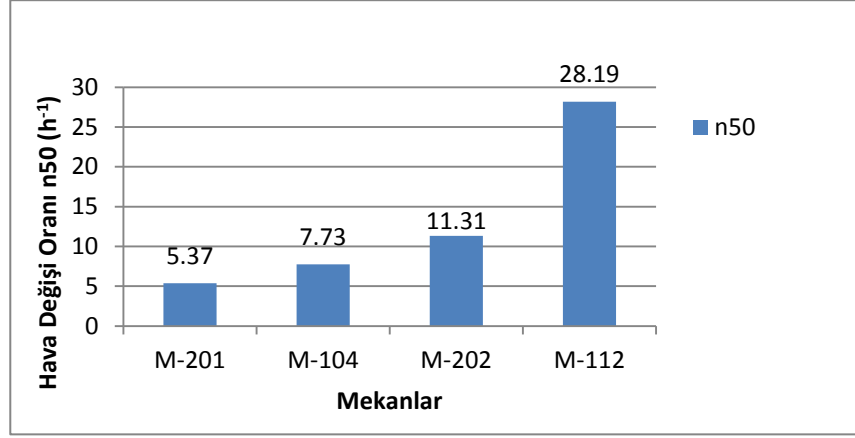
Tablo 5.10. Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Binası Dersliklere ait BDT Ölçüm Sonuçları

EGE ÜNİVERSİTESİ MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BİNASI DERSLİKLER									
Mekân	Hacim (m³)	Taban Alanı (m²)	Yüzey Alanı (m²)	Y.A./V	Y.A./T.A.	V ₅₀ (m³/h)	n ₅₀ (h ⁻¹)	Q ₅₀ (m³/h·m²)	W ₅₀ (m³/h·m²)
M-201	153,72	55,90	191,75	1,25	3,43	826,00	5,37	4,31	14,78
M-104	375,73	136,63	403,06	1,07	2,95	2904,00	7,73	7,20	21,25
M-202	152,63	55,50	192,13	1,26	3,46	1726,00	11,31	8,98	31,10
M-112	186,73	67,90	230,40	1,23	3,39	5264,00	28,19	22,85	77,53

Tablo 5.11. Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Binası Dersliklerinde Yapılan Blower Door Ölçümlerinde Elde Edilen Bulgular ve Görüntüler

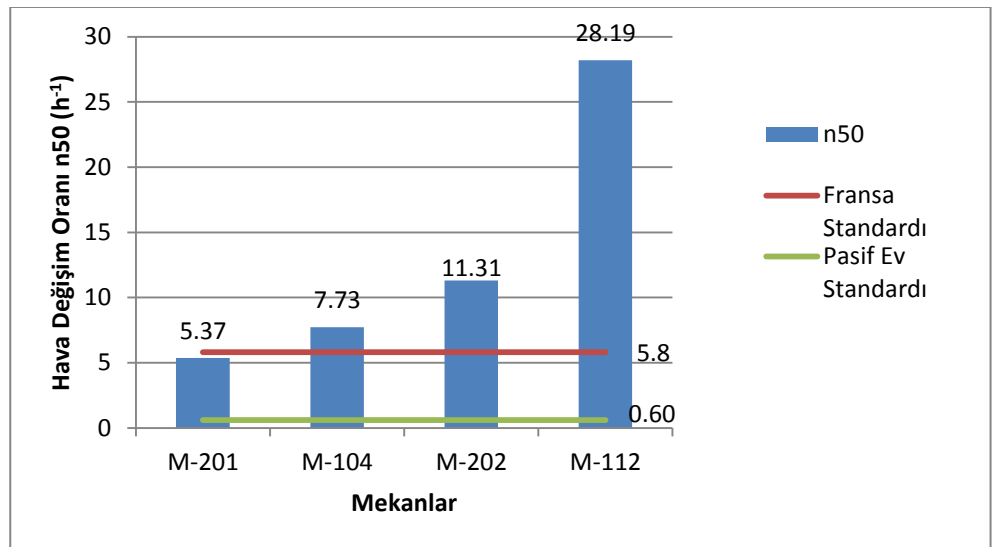
Ölçüm Yapılan Mekan	Ölçüm Yapılan Mekan Planı	Gerçek Görüntü	Termal Görüntü	BDI - Grafik	Türkiye TS 825 (n50)	Fransa (n50)	Birleşik Krallık (q50)	Pasif Ev Standardı (n50)
DERSLİK 201 55,50 m ²					5,37 > 5,00 Düşük Sızdırmaz	5,37 ≤ 5,80 Uygun	3 < 4,31 ≤ 9 Normal Uygulama	5,37 > 0,60 Uygun Değil
DERSLİK 104 136,63 m ²					7,73 > 5,00 Düşük Sızdırmaz	7,73 > 5,80 Uygun Değil	3 < 7,20 ≤ 9 Normal Uygulama	7,73 > 0,60 Uygun Değil
DERSLİK 202 55,70 m ²					11,31 > 5,00 Düşük Sızdırmaz	11,31 > 5,80 Uygun Değil	3 < 8,98 ≤ 9 Normal Uygulama	11,31 > 0,60 Uygun Değil
DERSLİK 112 67,90 m ²					28,19 > 5,00 Düşük Sızdırmaz	29,19 > 5,80 Uygun Değil	22,85 > 9,00 Uygun Değil	28,19 > 0,60 Uygun Değil

Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği binasında bulunan dersliklere ait hava değişim oranları Şekil 5.10'de yer almaktadır.



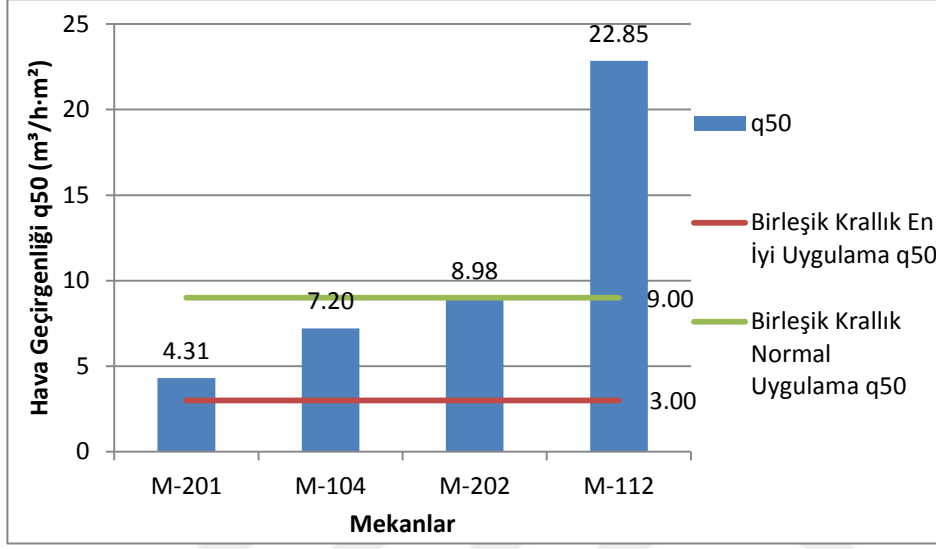
Şekil 5.10. Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Binasına ait Hava Değişim Oranları

Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği binasında ölçümü gerçekleştirilen hiçbir dersliğin hava değişim oranı (n_{50}) Pasif Ev standardına ($n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$) uygun değildir. Fransa standardı sınır değeri ($n_{50} \leq 5,8 \text{ h}^{-1}$) ile kıyaslandığında sadece M-201 numaralı derslik $5,37 \text{ h}^{-1}$ hava değişim oranı ile Fransa standardına uygunluk gösterir. M-104, M-202, M-112 derslikleri sırası ile $7,73 \text{ h}^{-1}$, $11,31 \text{ h}^{-1}$, $28,19 \text{ h}^{-1}$ hava değişim oranları ile Fransa standardına uymamaktadır. Özellikle 112 numaralı dersliğin n_{50} değeri $28,19 \text{ h}^{-1}$ oranı ile oldukça yüksektir; bunun nedeni termal kamera görüntüsünde de görüldüğü üzere doğramalarda kasa/kanat (ya da doğrama/kaba yapı) birleşimdeki sorundan kaynaklanabileceği düşünülmektedir (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Binasına ait n50 Değerlerinin Pasif Ev Standardı ve Fransa Standardı ile Karşılaştırılması

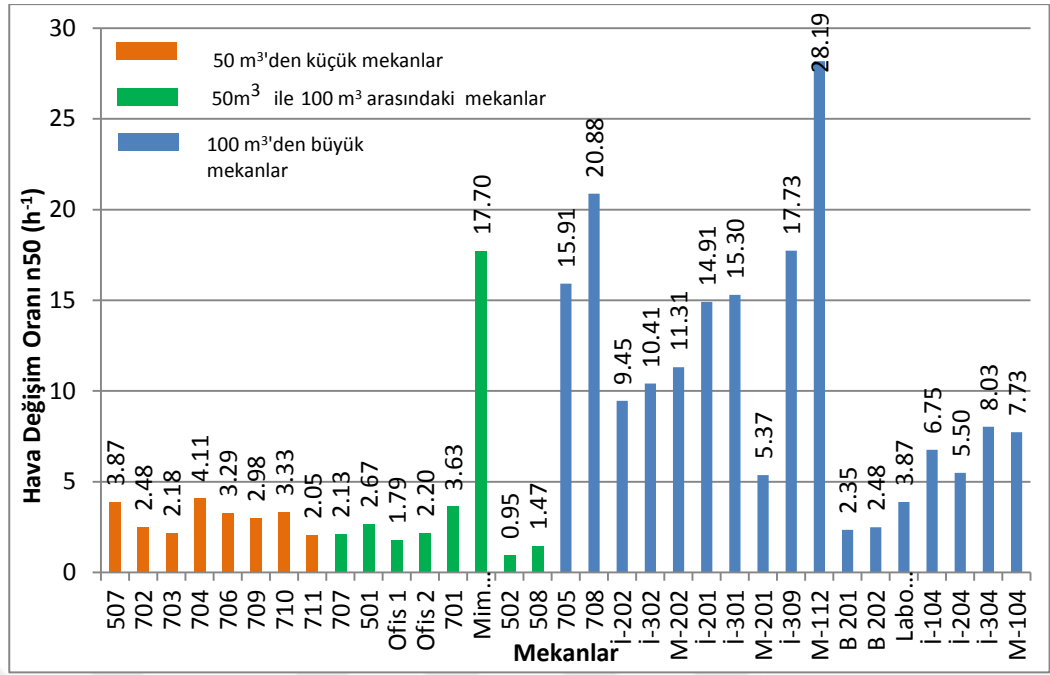
Birleşik Krallık ATTMA-TSL2 standardı hava geçirgenliği sınır değerlerine bakıldığında Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm binasında bulunan dersliklerin hiçbiri en iyi uygulama sınıfına girmemektedir. M-104, M-201, M-202 derslikleri ise sırası ile $4,31 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$, $7,20 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$, $8,98 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ hava geçirgenlik değerleri ile normal uygulama sınıfında ($3,00 < q_{50} \leq 9,00 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$) yer almakta olup M-112 numaralı derslik ise $22,85 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ q_{50} değeri ile Birleşik Krallık standardı sınır değerlerine uymamaktadır (Şekil 5.12).



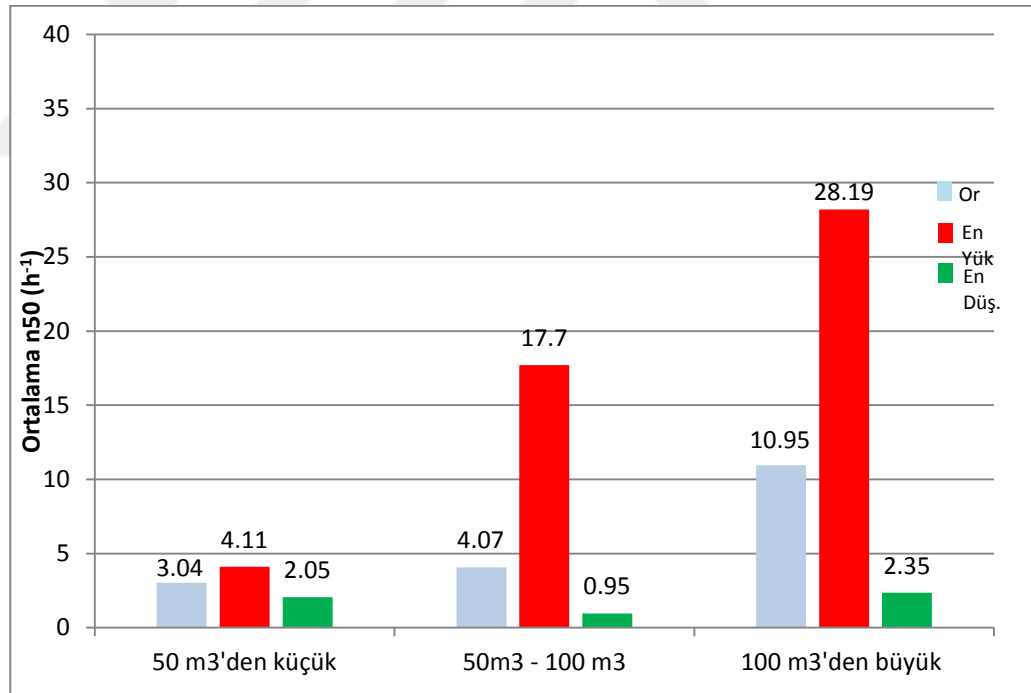
Şekil 5.12. Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Binası Dersliklere ait q_{50} Değerlerinin Birleşik Krallık Standardı ile Karşılaştırılması

5.3. Mekânların Hacim Büyüklüğü- Sızdırmazlık Değerlendirmesi

Balıkesir Üniversitesi ve Ege Üniversitesinde sızdırmazlık ölçümü gerçekleştirilen tüm mekânların iç hacmine göre 50 m^3 , 50 m^3 ile 100 m^3 arası ve 100 m^3 'ten büyük mekanlar olarak sınıflandırılmış hali ve hava değişim oranları Şekil 5.13'de yer almaktadır. Ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi sonucu sızdırmazlık ile mekanların hacim büyüklükleri arasındaki ilişki yapılan ölçüm sonuçlarında, mekânların kullanım amacına bakılmaksızın hacim büyüklüğü değerlendirildiğinde 50 m^3 , $50\text{-}100 \text{ m}^3$ arası ve 100 m^3 'den büyük olmak üzere mekan hacminin artması ile ortalama hava sızdırmazlık değerlerinin artışı dikkat çekmektedir (Şekil 5.14).



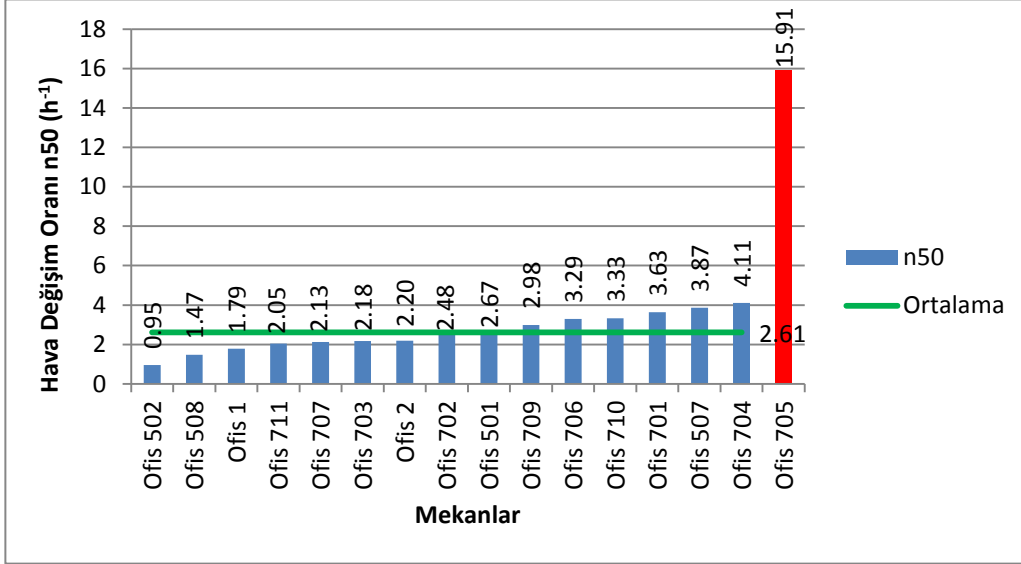
Şekil 5.13. Hava Değişim Oranlarının Hacim Büyüklüğüne Göre Sınıflandırması



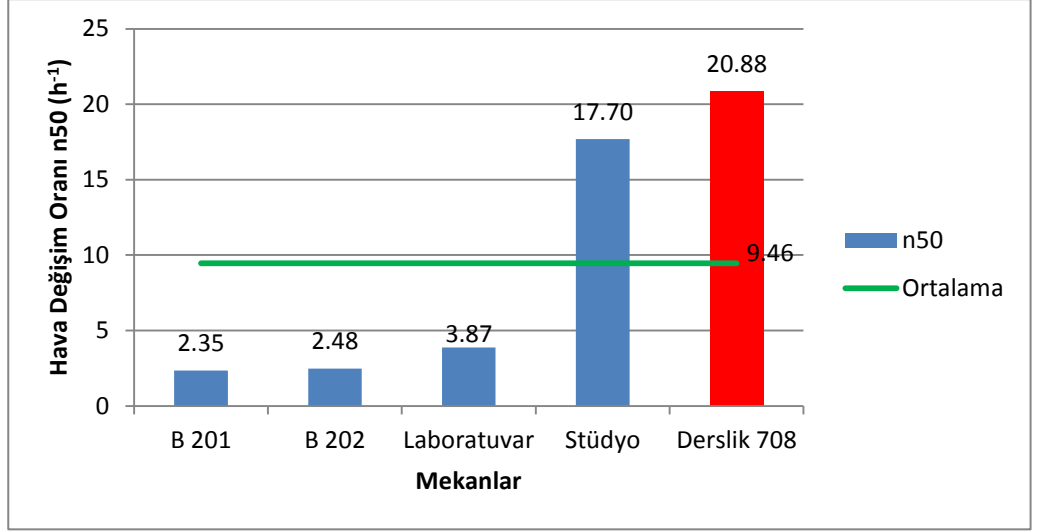
Şekil 5.14.Hava Değişim Oranlarının Hacim Büyüklüğüne Göre İncelenmesi

5.4. Cephe Kuruluşu

Balıkesir Üniversitesi öğretim elemanlarına ait ofislerin ortalama hava değişim oranının $2,61 \text{ h}^{-1}$ olmasına rağmen Ofis 705 $n_{50}:15,91 \text{ h}^{-1}$ sızdırmazlık değerine sahiptir; bunun nedeni cephe kuruluşundaki farklılaşma olarak değerlendirilmektedir. Ofis 705 en üst katta (7.) yer almakta olup cam giydirme cepheye sahiptir (Şekil 5.15). Burada uygulamalarda işçilikten kaynaklanan hataların etkili olduğu söylenebilir; ayrıca mekândaki saydam yüzeyleri oluşturan doğramalardaki conta malzemesinin de eskimeye bağlı olarak işlevini yerine getirememesi bir diğer neden olarak değerlendirilebilir. Ayrıca Şekil 5.16'da görüldüğü üzere mimarlık stüdyosu ve derslik 708'e ait n_{50} değerleri $17,70 \text{ h}^{-1}$ ve $20,88 \text{ h}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Derslik 708 de 7. katta yer almakta olup açılabilir kanat sayısı oldukça fazla olan cam giydirme cephe kuruluşuna sahiptir.



Şekil 5.15. BAUN öğretim elemanları ofislerinin hava değişim oranları

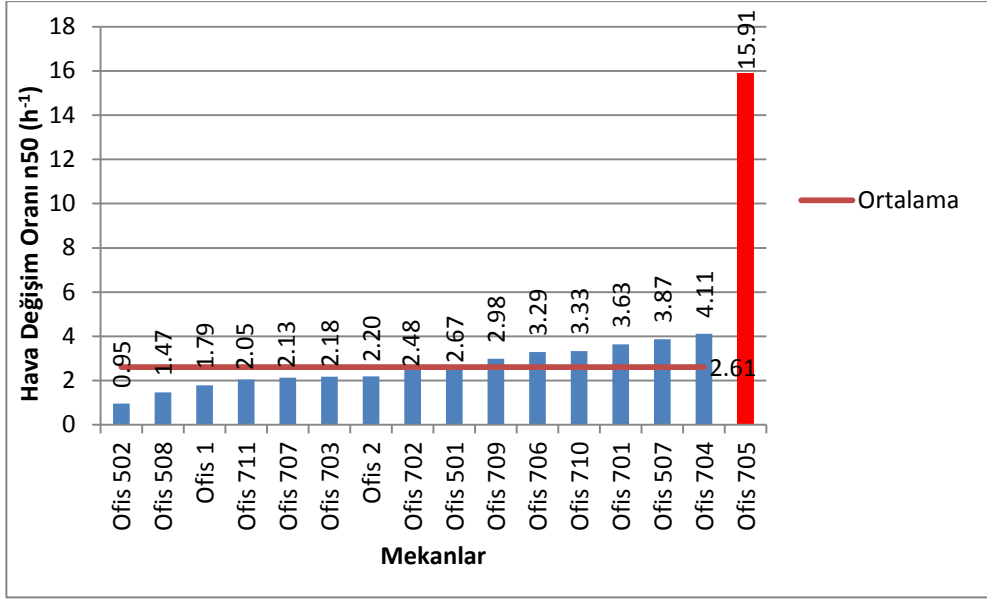


Şekil 5.16. BAUN öğretim elemanları ofislerin hava değişim oranları

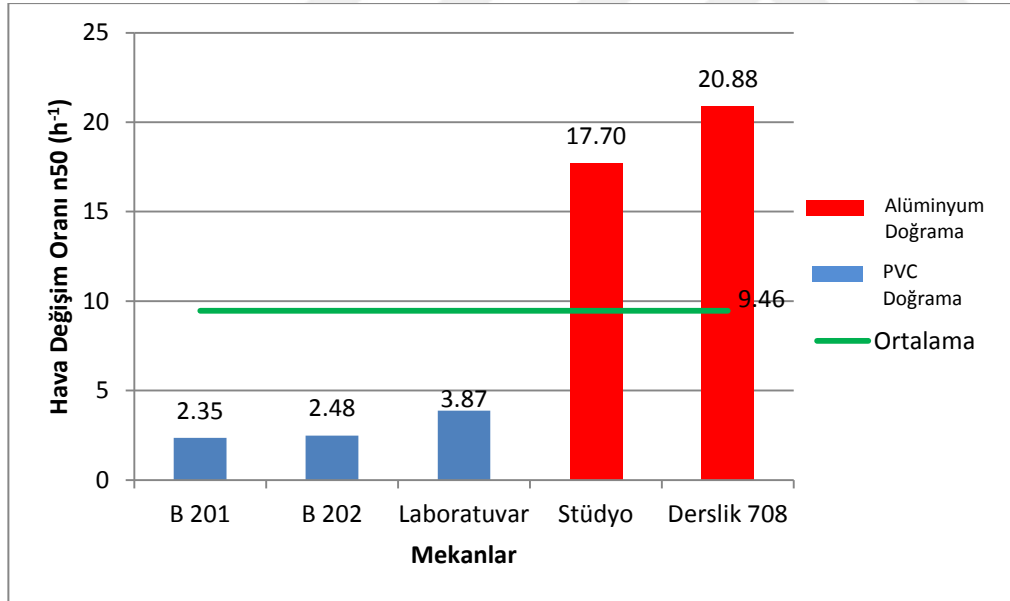
5.5. Doğrama Tipi

Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi öğretim elemanları ofislerinde alüminyum doğrama, dersliklerde ise PVC ve alüminyum doğrama mevcuttur. Ofislerin alüminyum doğramaya sahip olması sızdırmazlık değerlerinde görülen farkın diğer parametrelerden kaynaklandığını ortaya koymaktadır (Şekil 5.17 ve 5.18).

Grafik 5.18’de görüldüğü gibi alüminyum doğramaya sahip dersliklerin ortalama hava değişim oranı (n_{50}) $9,46 \text{ h}^{-1}$ iken mimarlık stüdyosunda $17,70 \text{ h}^{-1}$ ve 708 numaralı derslikte $20,88 \text{ h}^{-1}$ ’dir. Doğrama tipinin sızdırmazlık üzerindeki etkisine bakıldığında az örnek olmasına karşın kendi içlerinde derslikler kıyaslandığında PVC doğramanın daha sızdırmaz olduğu dikkat çekmektedir. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ve Makine Mühendisliği Bölümlerindeki dersliklerin sızdırmazlık değerlerinin (n_{50} : $5,50 \text{ h}^{-1}$ - $28,19 \text{ h}^{-1}$ arası) yüksek olma sebeplerinden birinin alüminyum doğramalar olduğu görülmektedir; çünkü termal kamera görüntülerinde doğrama ve cam arasındaki bölgelerde ısı köprüleri gözlemlenmiştir. Ayrıca doğramalarda açılış/kapanış sisteminin de (sürme tipi doğrama) sızdırmazlık üzerinde etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 5.17. BAUN Mimarlık Fakültesi Öğretim Görevlisi Ofisleri Sızdırmazlık Değerleri



Şekil 5.18. BAUN Mimarlık Fakültesi Doğrama Türüne Göre Sızdırmazlık Değerleri

6.SONUÇLAR

Çalışmada Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi ile Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ve Makine Mühendisliği Bölüm binalarına ait çeşitli ofis ve dersliklerde Minneapolis Blower Door Test yöntemiyle hava sızdırmazlık performansları araştırılmış ve termal kızıl ötesi kamera ile hava kaçağı bölgelerinde ısı köprüleri gözlenmiştir. Ölçümü yapılan mekanlarda 50 Pascal basınç altında hava değişim oranı değerleri (n_{50}) $0,95 \text{ h}^{-1}$ - $28,19 \text{ h}^{-1}$ arasında saptanmıştır.

TS 825 standardında eğitim binalarına özgü herhangi bir sınır değer olmadığından dolayı standartta bulunan katta çok daire şartına göre sızdırmazlık değerleri baz alınmıştır. TS 825 Standardına göre Balıkesir Üniversitesi'nde 21 mekânda yapılan ölçümlerde sadece 3 mekân yüksek sızdırmaz, 16 mekan orta sızdırmaz ve 2 mekan ise düşük sızdırmaz olarak tespit edilmiştir. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ve Makine Mühendisliği Bölümü binalarında ölçüm yapılan 12 mekanın düşük sızdırmaz sınıfında yer aldığı saptanmıştır.

Avrupa Pasif Ev standardında yer alan $n_{50} \leq 0,60 \text{ h}^{-1}$ sınır değerinin ölçüm yapılan tüm mekanlarda aşıldığı görülmüş olup hiçbir mekanın Pasif Ev standardına uygun olmadığı saptanmıştır.

Fransa'ya ait hava sızdırmazlık standardında n_{50} için sınır değer $5,80 \text{ h}^{-1}$ olarak verilmektedir. Balıkesir Üniversitesinde bulunan örnek mekanlardan sadece Ofis 705 ($n_{50}: 15,91 \text{ h}^{-1}$) ve Derslik 708 ($n_{50}: 20,88 \text{ h}^{-1}$) Fransa sızdırmazlık sınır değerine uygun değildir. Ege Üniversitesindeki mekanlara bakıldığında ise yalnızca İnşaat Mühendisliği binası Derslik 204 $n_{50}: 5,50 \text{ h}^{-1}$ değeri ile ve Makine Mühendisliği Derslik 201 $n_{50}: 5,37 \text{ h}^{-1}$ değeri ile Fransa sızdırmazlık standardına uygunluk göstermektedir.

Birleşik Krallık (ATTMA TSL-2) hava sızdırmazlık standardı ile yapılan karşılaştırmada sınır değer, hava değişim oranı (n_{50}) yerine hava geçirgenliği (q_{50}) olarak ele alınmaktadır. Standartta eğitim binaları için $q_{50} \leq 3,00 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$ için en iyi uygulama, $3,00 < q_{50} \leq 9,00 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$ için ise normal uygulama ibaresi yer almaktadır. Balıkesir Üniversitesi örnek binalardaki mekânlardan Ofis 705 ($q_{50}: 15,40 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$), Mimarlık Stüdyosu ($q_{50}: 11,85 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$) ve Derslik 708 ($q_{50}: 20,20 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$) Birleşik Krallık standardı sınır değerlerine uygun değildir.

Binalardaki mekanların karşılaştırılmasında kullanılan malzeme türü ve yapım yılı parametreleri devre dışı kalmaktadır. İki ayrı üniversite binalarının bulunduğu bölgelerde iklimsel koşulların benzer olmasından dolayı hava sızdırmazlığına ilişkin iklimin etkisine yönelik bir saptama yapılamamaktadır. Ayrıca mekanların yöneliminin hava sızdırmazlık ölçüm sonuçlarına doğrudan bir etkisi olmadığı görülmüş olup herhangi bir ilişki kurulamamıştır. Ölçümü yapılan mekânların hacim büyüklüğü ile hava sızdırmazlığı ilişkisine bakıldığında ise hacmi 0-50 m³ olan mekanların n_{50ort} değeri 3,04 h⁻¹, hacmi 50 m³-100 m³ arasında n_{50ort}: 4,07 h⁻¹ ve hacmi 100 m³'ten büyük olan mekanlarda n_{50ort}: 10,95 h⁻¹ olarak saptanmıştır; sonuç olarak mekan hacminin artışı ile ortalama n₅₀ değerlerinin arttığı görülmektedir.

Cephe kuruluş tiplerine bakıldığında sadece Ofis 705 (n₅₀:15,91 h⁻¹) ve Derslik 708 (n₅₀:20,88 h⁻¹) bulunduğu kat itibari ile cam giydirme cepheye sahiptir. Ölçüm sonuçlarına göre aynı binada yer alan diğer mekanlarla kıyaslandığında söz konusu iki mekanın n₅₀ değerlerinin oldukça yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Burada giydirme cephe uygulamasının etkili olduğu sonucuna varılabilir, yani opak ve saydam yüzey birleşimlerinde sızdırmazlık sorununun işçilik ve malzeme niteliği ile ilişkilendirilmesi olasıdır.

Hava sızdırmazlık performansının araştırılmasında önemli parametrelerden biri mekanlarda kullanılan doğrama tipidir. Balıkesir Üniversitesi örnek binalarında PVC ve alüminyum doğramaya sahip dersliklerde kısıtlı örnek sayısına karşın PVC doğramaya sahip mekanların daha sızdırmaz olduğu saptanmıştır. Dersliklerin ortalama hava sızdırmazlık değeri (n₅₀) 9,46 h⁻¹ iken alüminyum doğramaya sahip Mimarlık Stüdyosu n₅₀: 17,70 h⁻¹ ve Derslik 708 n₅₀: 20,88 h⁻¹ ortalamanın oldukça üzerinde değer sergilemektedir ve sızdırmazlık performansları düşüktür. Ege Üniversitesi örnek binalarında bulunan mekânların tümü alüminyum doğramaya sahiptir; doğramaların düşük sızdırmazlık performansına sahip olmasında sürme kanat tipi pencerenin etkili olduğu ölçüm esnasında yapılan termal görüntülemelerde de gözlenmektedir.

Dünya geneline bakıldığında sızdırmazlık konusunda farklı iklim bölgelerinde kullanım amacına bağlı olarak farklı bina türlerini kapsayan çalışmalar yapılmış ve bazı ülkeler standartlarında bina tipolojilerine göre değişen sızdırmazlık sınır değerleri belirlemişlerdir. Ülkemizde ise gerek sızdırmazlık konusunda yapılan bilimsel çalışmalar gerekse sızdırmazlık değerlerinin belirlenmesine yönelik uygulamaların sayısı oldukça azdır. Tez çalışmasında

deneysel olarak incelenen ve ölçümü yapılan örnek mekanlar eğitim binasına ait olmasına karşın bina kabuğu sızdırmazlık sonuçları, TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardında yer alan ve sadece konutlar için tanımlanmış olan sızdırmazlık sınır değerleri ile de karşılaştırılmıştır. Ayrıca çalışmanın sonuçları eğitim binalarına ait sızdırmazlık standardına sahip ülkelerden Fransa ve Birleşik Krallık sınır değerleri ile de kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçların alan çalışması bağlamında Pasif Ev standardına göre %0, TS 825'e göre %58, Fransa standardına göre %64, Birleşik Krallık standardına göre %79 oranında uygunluk gösterdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak bina kabuğu sızdırmazlığını etkileyen parametrelerin dikkate alınarak iklim bölgelerine ve bina türlerine göre sızdırmazlık sınır değerlerinin belirlenmesi, binaların enerji performansının ve iç mekan hava kalitesinin iyileştirilmesi açısından kaçınılmazdır.





KAYNAKLAR DİZİNİ

- AB Türkiye Delegasyonu 2020**, “Enerji, Avrupa Birliği Hedefleri”, <https://www.avrupa.info.tr/tr/enerji-abnin-hedefleri-58> (Erişim Tarihi: 24 Mayıs 2021)
- Almeida, R. M. S. F., Ramos, N. M. M. and Pereira, P. F.**, 2017, A contribution for the quantification of the influence of windows on the airtightness of Southern European buildings, *Energy and Buildings*, 139:174–185pp.
- American Society for Testing and Materials (Filadelfia, Pennsylvania)**, 2017, “ASTM E741-11 (Reapproved 2017): Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution”
- Association, International Passive House**, 2014. “Active for more comfort: Passive House”. www.passivehouse-international.org (Erişim tarihi: 24 Mayıs 2018)
- ATTMA TSL1**, 2010, The Air Tightness Testing & Measurement Association Technical Standard L1, Measuring Air Permeability of Buiding Envelopes.
- ATTMA TSL2**, 2010, The Air Tightness Testing & Measurement Association Technical Standard L2, Measuring Air Permeability of Buiding Envelopes.
- Axen, B. and Pettersson, B.**, 1980, Thermography Control of Heat Insulation and Tightness of Buildings, Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover Nh.
- Balaras, C.A. and Argiriou, A.A.**, 2002, Infrared thermography for building diagnostics, *Energy and Buildings*, 4:171-183pp.
- Barreira, E., Almeida R.M.S.F. and Moreira, M.**, 2017, “An infrared thermography passive approach to assess the effect of leakage points in buildings, *Energy and Buildings*, 140: 224–235pp.
- Bayındırlık ve İskanlık Bakanlığı**, 2008, Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği, *T.C. Resmi Gazete*, 2 Mayıs 2007, Sayı:2651, Ankara.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Berardi, U.**, 2013, Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery, *Intelligent Buildings International*, 5:65-66pp.
- Bekboliev M., Tavukcuoglu A. and Tanyer, A. M.**, 2018, “Assessing the airtightness performance of container houses in relation to its effect on energy efficiency”, *Building and Environment*, 134: 59–73pp.
- Berge, A.**, 2011, Analysis of methods to calculate air infiltration for use in energy calculations, Master’s Thesis, The Chalmers University, 80pp.
- BlowerDoor**, 2021. “BlowerDoor Measuring Principle”, <https://www.blowerdoor.com/measurement-systems/blowerdoor-standard/the-measuring-principle> (Erişim tarihi: 25 Mayıs 2021)
- Bornehag, C.G., Sundell, J., Weschler, C.J., Sigsgaard, T., Lundgren, B., Hasselgren, M. and Hägerhed-Engman, L.**, 2004,. The association between asthma and allergic symptoms in children and phthalates in house dust: a nested case–control study, *Environmental health perspectives* 112(14): 1393–97pp.
- Boşluk Analizi Raporu**, 2018. “Düşük Karbonlu Kalkınma için Çözümsel Tabanlı Strateji ve Eylem Geliştirilmesi Teknik Destek Projesi”, <http://www.lowcarbonturkey.org/wp-content/uploads/2018/06/LCDTR-Act-1.2-Bosluk-Analizi-Raporu.pdf> (Erişim tarihi: 24 Mayıs 2021)
- Bretzke**, 2005, Planung und Bau der Passivhaus Grundschule, Kalbacher Höhe 15, Frankfurt, a.M, https://passipedia.org/_media/picopen/fachaufsatz-riedberg.pdf (Erişim tarihi: 24 Mayıs 2021)
- Brinks, P., Oliver K. and René O.**, 2015, Air infiltration assessment for industrial buildings, *Energy and Buildings*, 86: 663–76pp.
- Brock, L.**, 2005, Designing The Exterior Wall: An Architectural Guide To The Vertical Envelope, *John Wiley & Sons Inc*, 368pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Bulut N., Pasif Ev ve Fırsatlar".
http://www.imsad.org/Uploads/Etkinlikler/Adana/izocam_nuri_bulut.pdf
 (Erişim tarihi: 8 Haziran 2021).

Capener, C.M., Burke S., ve Ott S., 2014, Hygrothermal Performance of TES Energy Façade at two European residential building demonstrations– Comparison between Field Measurements and Simulations, *10th Nordic Symposium on Building Physics*, 1244–52pp.

Chan, W.R., Nazaroff, W.W., Price, P.N., Sohn, M.D. and Gadgil, A.J., 2005, Analyzing a database of residential air leakage in the United States, *Atmospheric Environment*, 39(19): 3445-3455pp.

Clancy, E., 2011, Indoor Air Quality and Ventilation, *CIBSE*, 39pp.

Cooper, E.W. and Etheridge, D.W., 2004, “Measurement of building leakage by unsteady pressurisation, *25th AIVC Conference Ventilation and retrofitting*.

Cooper, E., and Etheridge, D.W., 2007, An innovative technique for measurement of building leakage at low pressures, *The 6th international conference on indoor air quality, ventilation & energy conservation in buildings IAQVEC*.

Cui, S., Cohen, M., Stabat, P. and Marchio D., 2015, CO₂ tracer gas concentration decay method for measuring air change rate, *Building and environment*, 84: 162–69pp.

DIN-EN 13829, 2000, Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurization method (ISO 9972:1996, modified); German version DIN-EN 13829:2000.

Domhagen, F., and Wahlgren, P., 2017, Consequences of Varying Airtightness in Wooden Buildings, *Energy Procedia*, 132: 873-878pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Emmerich, S.J., McDowell T.P., and Anis, W.,** 2007, Simulation of the impact of commercial building envelope airtightness on building energy utilization, *ASHRAE Transactions*, 379-399pp.
- Emmerich, S.J., and Persily A.K.,** 1998, Energy Impacts of Infiltration and Ventilation in U.S. Office Buildings Using Multizone Airflow Simulation, *IAQ and Energy 98 Conference*, 191-203pp.
- Energy Geeks,** "Blower Door Testing – New Homes in Rhode Island", <https://energygeeksinc.com/home-energy-efficiency-tips/blower-door-test-new-homes-ri-ma/> (Erişim tarihi: 22 Haziran 2021)
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı,** 2007. “5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu”, *T.C. Resmi Gazete*, 2/5/2007, Sayı: 26510.
- EN 13829, 2001,** Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurization method.
- ETKB,** 2020, “Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü Ulusal Enerji Denge Tabloları”, <https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari> (Erişim tarihi: 24 Mayıs 2021)
- European Commission,** 2010, “Energy performance of buildings directive 2010/31/EU (EPBD) and Energy Efficiency Directive 2012/27/EU”, https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en (Erişim tarihi: 24 Mayıs 2021)
- Feijó-Muñoz, J., González-Lezcano, R.A., Poza-Casado, I., Padilla-Marcos, M.A. and Meiss, A.,** 2019, Airtightness of residential buildings in the Continental area of Spain, *Building and Environment*, 148: 299-308pp.
- Fennell, H.C. and Haehnel, J.,** 2005, “Setting airtightness standards”, *ASHRAE Journal*, 47(9): 26-31pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Galaj, J. and Saleta, D., 2020,** Impact of apartment tightness on the concentrations of toxic gases emitted during a fire, *Sustainability*, 12(1): 223pp.
- Ghazi, C.J. and Marshall, J.S., 2014,** A CO₂ tracer-gas method for local air leakage detection and characterization, *Flow Measurement and Instrumentation*, 38: 72–81pp.
- Gil-Valverde, R., Tamayo-Alonso, D., Royuela-del-Val, A., Poza-Casado, I. Meiss,A. and Padilla M.A., 2020,** Three-dimensional characterization of air infiltration using infrared thermography, *Energy and Buildings*, 233: 110656.
- Grimsrud, D.T., Sherman, M.H., Janssen, J.E., Pearman, A.N. and Harrie, D.T., 1979,** To be presented at the ASHRAE Annual Meeting, Los Angeles, CA, February 1980, a; lso to be published in ASHRAE Transactions, 86 (1980).
- Hart, J.M., 1991,** A practical guide to infra-red thermography for building surveys, *Building Research Establishment Bracknell*, 92pp.
- Hong, G. and Kim D.D., 2018,** Airtightness of electrical, mechanical and architectural components in South Korean apartment buildings using the fan pressurization and tracer gas method, *Building and Environment*, 132: 21-29pp.
- IEA,** “Total final consumption (TFC) by sector, World 1990-2018”, <https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/world-energy-balances-and-statistics> (Erişim tarihi: 24 Mayıs 2021)
- Informationsdienst-holz,** "Spezial_Kindergaerten_Kindertagesstaetten". https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/3_Spezial/Spezial_Kindergaerten_Kindertagesstaetten.pdf (Erişim tarihi: 25 Haziran 2021)
- Iordache, V. and Catalina T., 2012,** Acoustic approach for building air permeability estimation, *Building and Environment*, 57 (2012): 18-27pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- İzmir MGM, 2021a.** “T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Meteoroloji genel müdürlüğü, Meteoroloji 2. Bölge Müdürlüğü: Balıkesir İlinin İklim Durumu”, https://izmir.mgm.gov.tr/files/iklim/balikesir_iklim.pdf (Erişim tarihi: 25 Mayıs 2021)
- İzmir MGM, 2021b.** “T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Meteoroloji genel müdürlüğü, Meteoroloji 2. Bölge Müdürlüğü: İzmir İlinin İklim Durumu”, https://izmir.mgm.gov.tr/files/iklim/izmir_iklim.pdf (Erişim tarihi: 25 Mayıs 2021)
- Janson, U.,** 2008, Passive houses in Sweden-Experiences from design and construction, *Energy and Building Design*, Lund University, 194pp.
- Ji, Y. and Duanmu L.,** 2017a, Air-tightness test and air infiltration estimation of an ultra-low energy building, *Science and Technology for the Built Environment*, 23(3): 441–448pp.
- Ji, Y. and Duanmu L.,** 2017b, Airtightness field tests of residential buildings in Dalian, China, *Building and Environment*, 119: 20–30pp.
- Ji, Y., Duanmu, L. and Li, X.,** 2017, Building air leakage analysis for individual apartments in North China, *Building and Environment*, 122: 105–115pp.
- Kadlubowski, R.P. and Yates D.W.,** 2009, The building envelope: energy efficiency and economics, *J Architect Technol*, 26: 1–8pp.
- Kalamees, T., Kurnitski, J., Jokisalo, J., Eskola, L., Jokiranta, K. and Vinha, J.,** 2010, Measured and simulated air pressure conditions in Finnish residential buildings, *Building Services Engineering Research and Technology*, 31(2): 177–190pp.
- Kisilewicz, T.K., Dzieszko N. and Rojewska-Warchał M.,** 2019, Influence of building airtightness on the internal thermal comfort and air quality in the single family house, *IOP conference series: materials science and engineering*, IOP Publishing, 32064.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Koçyiğit, M.**, 2019, Üniversite binalarında enerji tasarruf potansiyelinin araştırılması: Balıkesir Üniversitesi Çağış kampüsü örneği, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 199s.
- Kraus, M. and Kubeckova, D.**, 2013, Airtightness of energy efficient buildings, *GSTF Journal of Engineering Technology (JET)*, 2(2): 74pp.
- Kronvall, J.**, 1980, Airtightness-measurements and measurement methods, *Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden*, 64p.
- Leung, T. M., Chau, C.K., Lee, W.L. and Yik, F.W.H.**, 2005, Willingness to pay for improved environmental performance of the building envelope of office buildings in Hong Kong, *Indoor and Built Environment*, 14(2):147-156pp.
- Liang, X., Wang, Y., Royapoor, M., Wu, Q. and Roskilly, T.**, 2017, Comparison of building performance between Conventional House and Passive House in the UK, *Energy Procedia*, 142: 1823–1828pp.
- Lin, Y.H., Lin, M.D., Tsai, K.T., Deng, M.J., Ishii, H.**, 2021, Multi-objective optimization design of green building envelopes and air conditioning systems for energy conservation and CO2 emission reduction, *Sustainable Cities and Society*, 64:102555.
- Lstiburek, J.**, 2002, “Relative humidity, Building Science Corporation online”. <https://www.buildingscience.com/documents/reports/rr-0203-relative-humidity/view> (Erişim tarihi: 20 Haziran 2021)
- Mansour W.S.**, 2020, Thermal performance optimization of parametric building envelope based on bio-mimetic inspiration, *Ain Shams Engineering Journal*, 12:1133-1142pp.
- Memon, S.**, 2014, Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31: 870-906pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- MGM**, 2020a. “Meteoroloji Genel Müdürlüğü Balıkesir İli 1927-2020 Yılları Sıcaklık ve Yağış Bilgileri” <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=BALIKESIR> (Erişim tarihi: 25 Mayıs 2020)
- MGM**, 2020b. “Meteoroloji Genel Müdürlüğü İzmir İli 1927-2020 Yılları Sıcaklık ve Yağış Bilgileri” <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=IZMIR> (Erişim tarihi: 25 Mayıs 2020)
- MGM**, 2021. “Köppen’e Göre İklim Sınıflandırmasının Dünya Haritası” https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/iklim_siniflandirmalari/koppen.pdf (Erişim tarihi: 25 Mayıs 2021)
- MMO**, “TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 2020 Türkiye'nin Enerji Görünümü Oda Raporu, MMO/717”, https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/TEG-2020-00_Sunus_İçindekiler.pdf (Erişim tarihi: 24 Mayıs 2021).
- Mohamadi, Y. and Mirnoori S.V.**, 2012, The Impact of Airtightness on Energy Conservation of Conventional Cypriot Detached Houses, *International Journal of Engineering and Technology*, 4(6):705-708pp.
- Moll, L.**, 2012, “Airtightness in buildings, Ecological Building Systems”, <http://www.ecologicalbuildingsystems.com> (Erişim tarihi: 20 Kasım 2021)
- Mortensen, L.H. and Bergsøe N.C.**, 2017, Air tightness measurements in older Danish single-family houses, *Energy Procedia*, 132:825-830pp.
- Osawa, H. and Hayashi, M.**, 2009, Status of the indoor air chemical pollution in Japanese houses based on the nationwide field survey from 2000 to 2005, *Building and Environment*, 44(7): 1330–1336.
- Özbalta, T.G. ve Yıldız, Y.**, 2017, Yüksek Enerji Verimliliğine Sahip Bina Uygulamaları, 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Binalarda Enerji Performansı Sempozyumu, 553-563s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Öztürk, M.Z., Çetinkaya, G. ve Aydın, S., 2017, Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre Türkiye'nin iklim tipleri, *Coğrafya Dergisi* 35: 17–27s.

Passipedia, “Riedberg Passive House School, Frankfurt, Germany”, <https://passipedia.org/examples/non-residential-buildings/passive-house-schools/riedberg-passive-house-school-frankfurt-germany> (Erişim tarihi: 18 Nisan 2020)

Passipedia, 2021a. “The Passive House Historical Review”, <https://passipedia.org/basics/the-passive-house-historical-review> (Erişim tarihi: 24 Mayıs 2021)

Passipedia, 2021b. “The Passive House Resource ,Examples”, <https://passipedia.org/examples> (Erişim tarihi: 24 Mayıs 2021)

Passipedia, 2021c. “The Passive House Resource, Airtightness test”, <https://www.passipedia.org/planning/airtight-construction/general-principles/blower-door-test> (Erişim tarihi: 25 Mayıs 2021)

Passipedia, 2021d. "Playing in a Passive House - A timber/mudbrick building for children, A kindergarten in the cloister", <https://passipedia.org/examples/non-residential-buildings/passive-house-kindergartens/central-europe/passive-house-kindergarten-in-doebeln-germany> (Erişim tarihi: 25 Haziran 2021)

Passive House Institute, 2020. “About Passive House - What is a Passive House?”, <https://passivehouse.com/02-informations/01-what-is-a-passive-house/01-what-is-a-passive-house.htm> (Erişim tarihi: 20 Mayıs 2020).

Peper, S., Schnieders, J. and Feist, W., 2011, "*Langzeiterfahrung zur Funktion der Dämmschürze*. Deutsche Bundesstiftung Umwelt", <https://passiv.de/downloads/05-passivhaus-schule-riedberg-daemmschuerze.pdf> (Erişim tarihi: 20 Mayıs 2021)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J. and Pout, C., 2008, A review on buildings energy consumption information, *Energy and buildings*, 40(3): 394–398pp.

Retrotec, 2014. “Airtightness Requirements”, [https://retrotec.com/pub/media/mageworx/downloads/attachment/file/a/r/article- airtightness requirements.pdf](https://retrotec.com/pub/media/mageworx/downloads/attachment/file/a/r/article-airtightness-requirements.pdf) (Erişim tarihi: 25 Mayıs 2021)

Roberson, J., 2004. “Effect of building airtightness and fan size on the performance of mechanical ventilation systems in new US houses: a critique of ASHRAE Standard 62.2-2003”, <https://escholarship.org/uc/item/38b8f9j8> (Erişim tarihi: 23 Mayıs 2021)

Rodrigues, L., Tubelo, R., Vega P. A., Gonçalves, J.C.S., Wood, C. and Gillott, M., 2020, Quantifying airtightness in Brazilian residential buildings with focus on its contribution to thermal comfort, *Building Research & Information*, 1–22pp.

Rogelj, J., Den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Schaeffer, R., Sha, F., Riahi, K. and Meinshausen, M., 2016, Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 C, *Nature* 534.7609 (2016): 631-639pp.

Šadauskiene, J., Šeduikyte, L., Paukštys, V., Banionis, K. and Gailius, A., 2016, The role of air tightness in assessment of building energy performance: Case study of Lithuania, *Energy for Sustainable Development*, 32:31-39pp.

Salehi, A., Isabel T. and Ramos, A., 2017, Experimental analysis of building airtightness in traditional residential Portuguese buildings, *Energy and Buildings*, 151: 198–205pp.

Sealevel.info 2020. “Atmospheric Carbon Dioxide (CO₂) levels, 1800–present”, <https://www.sealevel.info/co2.html>. (Erişim tarihi: 24 Mayıs 2021)

Seppänen, O.A., Fisk, W.F. and Mendell, M.J., 1999, Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings, *Indoor air*, 9(4): 226–252pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sherman, M.H.** 1989, “Uncertainty in air flow calculations using tracer gas measurements”. *Building and Environment*, 24(4): 347–354pp.
- Sherman, M.H.**, 1990, Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone, *Building and Environment*, 25(4):365-374pp.
- Sherman, M.H.**, 1980, Air infiltration in buildings, *ProQuest Dissertations Publishing*, 1980, 8113187.
- Shielder,** "Blower Door Test Equipments", <https://shielder.com.hk/en/shielder/product/id-4/> (Erişim tarihi: 22 Haziran 2021)
- Shrestha, P. M., Humphrey, J.L., Barton, K.E., Carlton, E.J., Adgate, J.L., Root, E.D. and Miller, S.L.**, 2019, Impact of low-income home energy-efficiency retrofits on building air tightness and healthy home indicators, *Sustainability*, 11(9): 2667p.
- Sinnott, D. and Dyer, M.**, 2011, “Airtightness of dwellings in Ireland: Design, workmanship and control”, *COBRA 2011 - Proceedings of RICS Construction and Property Conference*: 376–81, <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84874956958&partnerID=40&md5=3e01e11cde0214ba05cdad4188a6ec6d>. (Erişim tarihi: 15 Haziran 2021)
- Snell, J. and Spring, R.**, 2002, Nondestructive testing of building envelope systems using infrared thermography, *Inframation, Montpelier VT*, 800-636-9820:1-9pp.
- Sular, N.**, 2017, Bina Kabuğunun Dış Duvar Bileşeninde Olası Hava Sızıntısının Alan Çalışması İle Belirlenmesi Ve Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 155s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Şahin C.D., Arsan Z.D. ve Akkurt G.G.,** 2015, İzmir'de Bulunan Bir Konutta Ölçülen Hava Sızdırmazlık Değerinin Yıllık Isıtma Amaçlı Enerji Tüketimi Üzerine Etkisinin İncelenmesi, *Teskon 2015 Bina Fiziği Sempozyumu*, 2195-2208s.
- Tanyer, A.M., Tavukcuoglu, A., and Bekboliev, M.,** 2018, Assessing the airtightness performance of container houses in relation to its effect on energy efficiency, *Building and Environment*, 134: 59–73pp.
- Tombak Turan, E.,** 2015, Binalarda Enerji Performans Direktifi ile Binalarda Enerji Performans Yönetmeliğinin Karşılaştırılması, *Tesisat Mühendisliği*, (150): 61–73s.
- Tombak, Turan, E.,** 2017, Binalarda Enerji Verimliliği ile İlgili Türk Mevzuatı, *TTMD Isıtma, Soğurma, Havalandırma, Klima, Yangın ve Sıhhi Tesisat Dergisi* (108): 32-37s.
- Ünlütürk, M.S.,** 2020, Enerji etkin konut tasarımında hava sızdırmazlığı parametresinin incelenmesi: Balıkesir örneği, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, 87s.
- Ürge-Vorsatz, D., Eyre, N., Graham, P., Harvey, D., Hertwich, E., Jiang, Y., Kornevall, C., Majumdar, M., McMahon, J., Mirasgedis, S., Murakami S. and Novikova A.,** 2012, In Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future, *Energy end-use: Buildings*, 649-760pp.
- Van der Meer, B.,** 2001. "Blower Door Testing", https://nascsp.org/wp-content/uploads/2018/02/van-der-meer_blower-door-testing.pdf (Erişim tarihi: 24 Mayıs 2021)
- Varshney, K., Javier E.R., Shapiro, I. and Scott D.,** 2013, Air-infiltration measurements in buildings using sound transmission loss through small apertures, *International journal of green energy*, 10.5 (2013): 482-493pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Vinha, J., Manelius, E., Korpi, M., Salminen, K., Kurnitski, J., Kiviste, M. and Laukkarinen, A.,** 2015, Airtightness of residential buildings in Finland, *Building and Environment*, 93(2): 128-140pp.
- Yeşil Ekonomi, 2021.** “Atmosferdeki Karbondioksit Yoğunluğu”, <https://yesilekonomi.com/karbondioksit-yogunlugu-gecen-ay-41402-ppm-oldu/> (Erişim tarihi: 24 Mayıs 2021)
- Yıldız, Y., Özbalta T.G. ve Arsan Z.D.,** 2011, Farklı Cam Türleri ve Yönlere Göre Pencere/Duvar Alanı Oranının Bina Enerji Performansına Etkisi: Eğitim Binası, İzmir, *Megaron*, 6: 30–38s.
- Younes, C., and Abi Shdid, C.,** 2013, A methodology for 3-D multiphysics CFD simulation of air leakage in building envelopes, *Energy and Buildings*, 65:146-158pp.
- Zheng, X., Cooper, E.W., Mazzon, J., Wallis, I. and Wood, C.J.,** 2019, Experimental insights into the airtightness measurement of a house-sized chamber in a sheltered environment using blower door and pulse methods, *Building and Environment*, 162: 106269.
- Zheng, X., Wood, C.J., Mazzon, J. and Wallis, I.** 2020, Airtightness measurement of an outdoor chamber using the Pulse and blower door methods under various wind and leakage scenarios, *Building and Environment*, 179: 106950.



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez sürecimde her zaman güvenen, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve her zaman yol gösterici olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Türkan GÖKSAL ÖZBALTA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde bilgi birikimini paylaşan ve testlerin uygulanması konusunda gerekli koşulları sağlayan Doç. Dr. Yusuf YILDIZ'a, Balıkesir Üniversitesi'nde gerçekleştirilen Blower Door Test ölçümlerinde yardımcı olan Y. Mimar Serhan ÜNLÜTÜRK ve Y. Mimar Resul ÖZLÜK'e, Ege Üniversitesi'nde gerçekleştirilen testlerde yardımcı olan İnş. Müh. Sinan URGEN'e; ayrıca tüm hayatım boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve yanımda olan değerli aileme teşekkürlerimi borç bilirim.

05/ 08/ 2021

Erman ÇOĞAL



ÖZGEÇMİŞ

Erman ÇOĞAL, 2018 Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümün'den mezun oldu ve İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.

Mesleki faaliyetler/ Stajlar:

2015 – Kocaeli Kentsel Yapı Denetim (3 ay)

Körfez Kent Emlak Konut 4. Etap Projesi. (Stajyer İnşaat Mühendisi)

2016 – Kocaeli Kentsel Yapı Denetim (2 ay)

Körfez Kent Emlak Konut 4. Etap Projesi. (Stajyer İnşaat Mühendisi)

2019- Renaissance Heavy Industries. (5 ay)

Rusya-Amur Gazprom Processing Plant Project (İş Güvenliği Mühendisi)