

Konut Dışı Binalarda Yapı Kabuğu Sızdırmazlığının Saptanması: ESOGÜ Mimarlık
Bölüm Binası Vaka Çalışması

İpek Gülsoy

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mimarlık Anabilim Dalı

Temmuz 2021

Determining Building Envelope Airtightness in Non-Residential Buildings: Case Study of
ESOGÜ Architecture Department Building

İpek Gülsoy

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Architecture

July 2021

Konut Dışı Binalarda Yapı Kabuğu Sızdırmazlığının Saptanması: ESOGÜ Mimarlık
Bölüm Binası Vaka Çalışması

İpek Gülsoy

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliğı Uyarınca
Mimarlık Anabilim Dalı
Bina Bilgisi Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Başak Güçyeter
Temmuz 2021

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Başak GÜÇYETER danışmanlığında hazırlamış olduğum “Konut Dışı Binalarda Yapı Kabuğu Sızdırmazlığının Saptanması: ESOGÜ Mimarlık Bölüm Binası Vaka Çalışması” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 07/07/21

İpek GÜLSOY

ÖZET

1970’lerdeki iki petrol krizi sonrası binalarda enerji tüketimini azaltmaya yönelik çabalar, yapı fiziği ve fiziksel çevre denetimi adı verilen, mimarlık ve mühendislik disiplinlerinin ortaklığında kapsamlı bir araştırma alanını tetiklemiştir. Bu araştırma alanı bir binada enerji tüketimi ile sonuçlanan konfor ve iç ortam kalite gereksinimlerine ilişkin parametreleri belirlemek, ölçmek ve kontrol etmeyi amaçlamaktadır. Yapı kabuğu sızdırmazlığı da enerji performansını etkileyen en önemli parametrelerden biri olarak kabul edilmekte ve özelleşmiş test yöntemleri ile belirlenmektedir. Uluslararası standartlar yapı kabuğu sızdırmazlığı için sınır değer koşulları ortaya koymakta ve bir binanın enerji performansını değerlendirmede bir gösterge olarak kabul etmektedir. Mevcut yapılarda sızdırmazlık değerleri “fan basınçlandırma testi” adı verilen bir yöntemle saptanabilmektedir. Literatürde bina sızdırmazlık ölçümlerinin çoğunlukla bağımsız müstakil konut yapılarında uygulandığı dikkati çekmektedir. Fan basınçlandırma testi bina ve dış ortam arasında basınç farkı oluşturarak yapı kabuğu hava kaçaklarını tespit etmeye dayanmakta ve bağımsız, küçük ölçekli müstakil konutlarda sınır koşullarının kontrolü, tek ekipman kullanım opsiyonu nedeniyle daha yaygın uygulanmaktadır. Orta ve büyük ölçekli binaların sızdırmazlık değerlerinin ölçülebilmesi için ise sınır koşullarının çok iyi kontrol edilmesi ve çok sayıda test ekipmanının bir arada kullanılması gerekmektedir. Bu tez çalışması konut dışı yapılarda tek ekipman kullanarak fan basınçlandırma testinin uygulanabilirliğini araştırmayı amaçlamaktadır. Yöntem kapsamında önerilen ölçüm yaklaşımı Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mimarlık Bölümü M2 blokta bir alan çalışması üzerinden test edilmiştir. Konut dışı bir yapıda yürütülen fan basınçlandırma testleri aracılığıyla uluslararası standartlara referansla çok-mekânlı/çok-noktalı bir ölçüm yöntemi öne sürülmekte ve tüm-bina sızdırmazlık değerlerinin saptanması amaçlanmaktadır. Deneysel yöntem üzerinden kurgulanmış olan bu tez çalışmasında, ele alınan eksiklikler, standart kriterleri ve önerilen ölçüm modelinin binalarda sızdırmazlık araştırmalarında ileriiki çalışmalar ve literatür için önemli bir katkısı olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sızdırmazlık, Doğal Havalandırma, Konut Dışı Binalar, Fan Basınç Testi.

SUMMARY

Efforts to reduce energy consumption in buildings after the two oil crises of the 1970s triggered a comprehensive research domain within the collaboration of architecture and engineering disciplines, building physics and/or environmental control. The research domain focused on to determine, measure and control parameters related to comfort and indoor quality requirements that are linked to the energy consumption of a building. Envelope airtightness is also considered as an essential parameter that affects energy performance and is determined by specialized test methods. International standards provide limit values for building envelope airtightness and accept them as indicators in building energy performance assessment. In existing buildings, airtightness can be determined by the “fan pressurization test” method. Literature review points out that most building airtightness measurements were conducted in detached residential buildings. The fan pressurization test, which detects leakage through the building envelope by inducing a pressure difference between the building and the outside environment, is commonly conducted in small-scale detached houses due to the ability to control the boundary conditions and possibility of using a single test equipment. Airtightness measurements in medium and large buildings require a good level of control of the boundary conditions and increased number of test equipment. The present study aims to investigate the applicability of fan pressurization test using a single equipment in a non-residential building. The proposed multi-space/multi-point measurement approach aimed to determine the whole-building airtightness values was tested in M2 Block of Department of Architecture in Eskişehir Osmangazi University through fan pressurization tests, with respect to international standards. The present study, which adopts an experimental approach is expected to contribute literature through the proposed measurement approach and lead to further studies on building airtightness testing.

Keywords: Airtightness, Natural Ventilation, Non-residential Buildings, Fan Pressurization Test.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	7
2.1. Binalarda Sızdırmazlık	7
2.1.1. İnfiltrasyon ve Sızdırmazlık İlişkisi	8
2.1.2. Binalarda Sızdırmazlığı Etkileyen Parametreler	9
2.1.3. Binalarda Sızdırmazlığın Ölçülmesi	11
2.2. Uluslararası ve Ulusal Sızdırmazlık Standartları	18
2.3. Meta Analiz: Yapılarda Fan Basınç Testi ile Sızdırmazlık Ölçümü	40
2.4. Sonuç ve Tartışma	51
3. YÖNTEM	53
3.1. Hazırlık Aşaması (Faz 0)	55
3.1.1. Binanın Denetlenmesi ve Yapısal Özelliklerin Saptanması	55
3.1.2. Test Protokolünün Belirlenmesi	61
3.1.3. Test Geçerlilik Kriterlerinin Belirlenmesi	64
3.2. Ön Ölçüm Protokolü (Faz 1)	67
3.2.1. Ön Ölçüm Mekanının Belirlenmesi	67
3.2.2. Ön Ölçüm Protokolünün Geliştirilmesi Ve Uygulanması	68
3.3. Ön Ölçüm Protokolünün Değerlendirilmesi (Faz 2)	75
3.4. Kesinleşmiş Ölçüm Protokolünün Uygulanması (Faz 3)	75
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	78
4.1. Ön Ölçüm Protokolüne Ait Bulgular	78
4.1.1. Ön Ölçüm Protokolüne Ait Veriler	84

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.1.1.1. <u>Basıncsızlaştırma Testi: M01Y ve M01G Kodlu Ölçümler</u>	84
4.1.1.2. <u>Basınçlandırma Testi: M02Y ve M02G Kodlu Ölçümler</u>	86
4.1.1.3. <u>Basıncsızlaştırma Testi: M03Y ve M03G Kodlu Ölçümler</u>	89
4.1.1.4. <u>Basınçlandırma Testi: M04Y ve M04G Kodlu Ölçümler</u>	91
4.1.1.5. <u>Basıncsızlaştırma Testi: M05Y ve M05G Kodlu Ölçümler</u>	94
4.1.1.6. <u>Basınçlandırma Testi: M06Y ve M06G Kodlu Ölçümler</u>	96
4.1.1.7. <u>Basıncsızlaştırma Testi: M07Y ve M07G Kodlu Ölçümler</u>	99
4.1.1.8. <u>Basınçlandırma Testi: M08Y ve M08G Kodlu Ölçümler</u>	101
4.1.2. <u>Ön Ölçüm Protokolü – Karşılaştırmalı Bulgular</u>	103
4.2. <u>Kesinleşmiş Ölçüm Protokolü Bulguları</u>	106
4.2.1. <u>Mekân Bazında Kesinleşmiş Ölçüm Protokolü Sonuçları</u>	108
4.2.1.1. <u>101P ve 101D Kodlu Ölçümler</u>	112
4.2.1.2. <u>102P ve 102D Kodlu Ölçümler</u>	115
4.2.1.3. <u>108P ve 108D Kodlu Ölçümler</u>	117
4.2.1.4. <u>201P ve 201D Kodlu Ölçümler</u>	121
4.2.1.5. <u>202P ve 202D Kodlu Ölçümler</u>	124
4.2.1.6. <u>206P ve 206D Kodlu Ölçümler</u>	127
4.2.1.7. <u>208P ve 208D Kodlu Ölçümler</u>	130
4.2.1.8. <u>203P ve 203D Kodlu Ölçümler</u>	132
4.2.2. <u>Kesinleşmiş Ölçüm Protokolü – Karşılaştırmalı Bulgular</u>	135
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	148
KAYNAKLAR DİZİNİ	156

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. İnfiltrasyon ve havalandırmaya bağlı akışlar	9
2.2. Baca etkisi ve bina cephesinde basınç dağılımı	9
2.3. Farklı yıllarda inşa edilmiş binalar için 50'Pa basınç farkında hava değişim oranları	10
2.4. Binalarda enerji performansını etkileyen kriterler	12
2.5. Caffey tarafından Teksas'ta kullanılan "süper emici – super sucker" adı verilen fan basınçlandırma test ekipmanı	13
2.6. Yapı kabuğunda etkin ölçüm yapılabilecek noktaların plan düzleminde gösterimi	29
2.7. Yapı kabuğu alanının hesaplanmasında kabul edilen sınırlar: 1. dış, 2. toplam iç ölçü, 3. iç	37
2.8. Basınçlandırma ve basınçsızlaştırma testleri için basınç farkı (x eksen) ve hava akış oranları grafiği (y eksen)	38
2.9. Literatür taraması kapsamında seçilmiş yayınlarda ele alınan bina tipolojilerinin dağılımı	41
2.10. Seçilmiş yayınlarda ele alınan ölçüm ve değerlendirme yöntemlerinin dağılımı	42
2.11. Seçilmiş yayınlarda ele alınan ölçüm ve değerlendirme yöntemlerinin dağılımı	43
3.1. Tez çalışması kapsamında uygulanan araştırma tasarımı adımları	54
3.2. M2 Binasına ait kat planları (a) zemin kat, (b) birinci kat	56
3.3. M2 Binasına ait kat görünüşler (a) güney, (b) kuzey, (c) doğu, (d) batı	57
3.4. M2 Binasının (a) güney ve (b) kuzey görünümü	58
3.5. Binadaki ana mekanlarda kullanılan pencere tipolojileri	58
3.6. Eskişehir en yüksek, en düşük ve ortalama sıcaklık değerleri (°C)	60
3.7. Eskişehir rüzgâr yönü ve hızı (m/s) – (a) tüm yıl, (b) Nisan ve Mayıs ayları	60
3.8. Kompartmanlaştırma ya da korumasız test prosedürü	62
3.9. Ön ölçüm protokolü için seçilen 203 kodlu mekân, (a) basınçsızlaştırma testi kurgusu, (b) basınçlandırma testi kurgusu	68
3.10. Fan basınçlandırma test ekipmanı: (a) Minneapolis Blower Door Model 3, (b) basınç ölçüm aygıtı, (c) fan, (d) hava akış halkaları	69

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.11. 203 no'lu hacime kurulan Minneapolis Blower Door 3 test düzeneği (a) basınçsızlaştırma testi – fan/cihaz içeride, (b) basınçlandırma testi – fan/cihaz dışarıda	70
3.12. 203 no'lu hacimde yapılan ölçümlerde (a) elektrik armatürlerinin sızdırmaz hale getirildiği, (b) elektrik armatürlerinin olduğu gibi bırakıldığı durum	71
3.13. Ölçüm kontrol listesi, ön sayfa	73
3.14. Ölçüm kontrol listesi, arka sayfa	74
3.15. Kesinleşmiş ölçüm protokolünün yürütüldüğü hacimler, (a) birinci kat, (b) ikinci kat	76
3.16. Kesinleşmiş ölçüm protokolünün yürütüldüğü hacimler, kesit görünüş temsilleri	76
3.17. Kesinleşmiş ölçüm protokolü, örnek basınçlandırma ölçümü	77
4.1. Ön ölçüm prosedürü: M02Y/G- M04Y/G-M06Y/G- M08Y/G kodlu basınçlandırma testleri	79
4.2. Ön ölçüm prosedürü: M01Y/G- M03Y/G-M05Y/G- M07Y/G kodlu basınçsızlaştırma testleri	80
4.3. M01Y ölçüm grafiği	84
4.4. M01Y kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	85
4.5. M01G ölçüm grafiği	85
4.6. M01G kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	86
4.7. M02Y ölçüm grafiği	87
4.8. M02Y kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	87
4.9. M02G ölçüm sonuçları	88
4.10. M02G kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	88
4.11. M03Y ölçüm grafiği	89

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.12. M03Y kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	89
4.13. M03G ölçüm grafiği	90
4.14. M03G kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	91
4.15. M04Y ölçüm grafiği	92
4.16. M04Y kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	92
4.17. M04G ölçüm grafiği	93
4.18. M04G kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	93
4.19. M05Y ölçüm grafiği	94
4.20. M05Y kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	94
4.21. M05G ölçüm grafiği	95
4.22. M05G kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	96
4.23. M06Y ölçüm grafiği	97
4.24. M06Y kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	97
4.25. M06G ölçüm grafiği	98
4.26. M06G kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	98
4.27 M07Y ölçüm grafiği	99
4.28. M07Y kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	99
4.29 M07G ölçüm grafiği	100
4.30. M07G kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	101

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.31. M08Y ölçüm sonuçları	101
4.32. M08Y kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	102
4.33. M08G ölçüm grafiği	103
4.34. M08G kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	103
4.35. Uygulanan ön ölçüm senaryosuna ait basınçsızlaştırma (D) ve basınçlandırma testlerine ait korelasyon katsayıları (r^2)	104
4.36. Geçerli korelasyon katsayısına sahip ön ölçüm protokolü senaryolarının ACH değerleri	105
4.37 101P ölçüm şeması	112
4.38. 101P ölçüm grafiği	112
4.39. 101P kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	113
4.40. 101D ölçüm şeması	113
4.41. 101D ölçüm grafiği	114
4.42. 101D kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	114
4.43. 102P ölçüm şeması	115
4.44. 102P ölçüm grafiği	115
4.45. 102P kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	116
4.46. 102D ölçüm şeması	116
4.47. 102D ölçüm grafiği	117
4.48. 102D kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	117
4.49. 108P ölçüm şeması	118
4.50. 108P ölçüm grafiği	119

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.51. 108P kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	119
4.52. 108D ölçüm şeması	119
4.53. 108D ölçüm grafiği	120
4.54. 108D kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	120
4.55. 201P ölçüm şeması	121
4.56. 201P ölçüm grafiği	121
4.57. 201P kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	122
4.58. 201D ölçüm şeması	122
4.59. 201D ölçüm grafiği	123
4.60. 201D kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	123
4.61. 202P ölçüm şeması	124
4.62. 202P ölçüm grafiği	124
4.63. 202P kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	125
4.64. 202D ölçüm şeması	125
4.65. 202D ölçüm grafiği	126
4.66. 202D kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	126
4.67. 206P ölçüm şeması	127
4.68. 206P ölçüm grafiği	127
4.69. 206P kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	128
4.70. 206D ölçüm şeması	128
4.71. 206D ölçüm grafiği	129

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.72. 206D kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	129
4.73. 208P ölçüm şeması	130
4.74. 208P ölçüm grafiği	130
4.75. 208P kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	131
4.76. 208D ölçüm şeması	131
4.77. 208D ölçüm grafiği	132
4.78. 208D kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	132
4.79. 203P ölçüm grafiği	133
4.80. 203P kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	133
4.81. 203D ölçüm grafiği	134
4.82. 203D kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)	134
4.83. İç görünüş- çatlakların temsili (a) güney yönü, (b) kuzey yönü	137
4.84. Çatlakların plan düzleminde temsili (a) birinci kat planı, (b) ikinci kat planı	138
4.85. 101 no'lu hacimde (b) yürütülen tespit çalışmaları (c ve d) ve verilerin işlenmesi (a)	138
4.86. 203 no'lu hacimde (b) yürütülen tespit çalışmaları (c ve d) ve verilerin işlenmesi (a)	139
4.87. Çatlak alanı (cm ²) mekân hacmine (m ³) oranı ile sızdırmazlık değerleri arasındaki ilişki	141
4.88. Hacim (m ³) ve ölçülen sızdırmazlık değerleri arasındaki ilişki	142
4.89. Etkin cephe alanı (m ²) ve düzeltilmiş ACH50 değerleri arasındaki ilişki	143
4.90. Çatlak alanının (cm ²) etkin cephe alanına (m ²) oranı ve sızdırmazlık değerleri arasındaki ilişki	144

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Konutlar için sızdırmazlık sınır değerleri	15
2.2. ABD’de iklim bölgelerine göre IECC tarafından belirlenmiş olan sızdırmazlık limit değerleri	15
2.3. Chapter Eight RESNET standardı tarafından tanımlanan test prosedürleri	23
2.4. ABBA standardı tarafından tanımlanan test prosedürleri	27
2.5. ASTM E779 standardı tarafından tanımlanan test prosedürü	31
2.6. ASTM E1827 standardı tarafından tanımlanan test prosedürü	32
2.7. ISO 9972 Standardı tarafından tanımlanan test prosedürü	35
2.8. Meta Analiz: Bina tipolojisi, ölçüm ve değerlendirme yöntemi ve kullanılan standartlara ilişkin literatür taraması	44
3.1. Binadaki mekanların kodları ve sızdırmazlığı etkileyen parametreler	59
3.2. Ölçüm koşullarının ön kontrolü	65
3.3. Minneapolis Blower Door M3 için farklı halkalarına ait akış aralıkları	69
3.4. Ön ölçüm protokolü kapsamında test edilen sınır koşulları	72
4.1. Ön ölçüm prosedüründe yağmurlu (Y) ve güneşli (G) gün ölçümlerine ait iç ve dış ortam verileri	81
4.2. Ön ölçüm protokolündeki testlere ait veriler (düzeltilmemiş)	82
4.3. Ön ölçüm protokolündeki testlere ait veriler (düzeltilmiş)	83
4.4. Kesinleşmiş Ölçüm Prosedüründe basınçlandırma (P) ve basınçsızlaştırma (D) testlerine ait iç ve dış ortam verileri	109
4.5. Kesinleşmiş Ölçüm Prosedüründe yürütülmüş testlere ait hata payı ve korelasyon katsayıları (düzeltilmemiş)	110
4.6. Kesinleşmiş Ölçüm Prosedüründe yürütülmüş testlere ait hata payı ve korelasyon katsayıları (düzeltilmiş)	111
4.7. Model 3 (230V) Minneapolis Blower Door için Kalibrasyon Parametreleri	135
4.8. C halkasına kalibre edilen düzeltilmiş ve düzeltilmemiş CFM50 değerleri	136
4.9. Düzeltilmiş ve düzeltilmemiş CFM50 değerlerine göre ACH50 değerleri	136
4.10. Gözlem ve folyo testi ile elde edilen çatlak uzunluk ve kalınlıkları – mekan bazında	140

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.11. Çatlak alanı (cm ²)/Mekan hacmi (m ³) oranı ve sızdırmazlık değerleri	140
4.12. Etkin cephe alanı (m ²) ve düzeltilmiş ACH50 değerleri	143
4.13. Çatlak alanı (cm ²) / etkin cephe alanı (m ²) oranı ve sızdırmazlık değerleri	144
4.14. Tüm bina hacimleri için ölçülmüş ve $y = 0,0014x^2 - 0,3392x + 23,882$ bağıntısı ile hesaplanmış sızdırmazlık değerleri	145
4.15. Tüm bina hacimleri için ölçülmüş ve $y = 0,0468x^2 - 2,0736x + 25,922$ bağıntısı ile hesaplanmış sızdırmazlık değerleri	146

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
ACH	Saatlik Hava Değişimi (Air Change per Hour)
HVAC	Isıtma, soğutma ve havalandırma sistemleri (Heating, ventilation, and air-conditioning)
T	Sıcaklık °C
ELA	Efektif Sızma Alanı (Effective Leakage Area)
Q	Hava akışı [m^3/s] (Air flow)
P	Yoğunluk [kg/m^3] (Density)
WHO	Dünya Sağlık Örgütü
IAQ	İç Mekân Hava Kalitesi (Indoor Air Quality)
ASHRAE	Amerikan Isıtma, Soğutma ve Klima Mühendisleri Derneği (American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers)
ABAA	Air Barrier Association of America
RESNET	Residential Energy Services Network
VOC	Uçucu Organik Bileşikler
LBL	Lawrence Berkeley Laboratuvarı
AIM-2	Alberta Hava Sızma Modeli
ASTM	American Society for Testing and Materials
SLA	Spesifik Sızma Alanı
NLA	Normalize Sızma Alanı
°F	Fahrenheit
°C	Celsius
WoS	Web of Science
ISO	International Organization for Standardization
ATTMA	The Air Tightness Testing & Measurement Association
EPBD	European Data Protection Board
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**Kısaltmalar**

EUI

IECC

DOE

Açıklama

Energy Use İntensity

International Energy Conservation Code

ABD Enerji Bakanlığı



1. GİRİŞ VE AMAÇ

1973 ve 1979’da yaşanan ve küresel ekonominin köklü bir biçimde değişimine sebep olan petrol krizleri sonrasında, tüm sektörlerde olduğu gibi yapıları çevrede de enerji tüketimini azaltmak amacıyla bir refleks olmuş ve günümüzde yeşil, sürdürülebilir, pasif, enerji etkin, sıfır enerjili gibi tamlamalar mimarlık ile birlikte kullanılan terimler haline gelmiştir (Marsh, 2017). Günümüzde yapılarda tüketilen enerjinin küresel nihai enerji tüketiminin yaklaşık üçte birinden fazlasını ve CO₂ emisyonlarının yaklaşık %40’ını oluşturduğu bilinmektedir (IEA, 2020). Teknolojik ve endüstriyel gelişimlere bağlı olarak, binalarda tüketilen enerji oranlarının da artması beklenmektedir, zira inşa edilmiş toplam bina alanı 2000 yılından bugüne dek %65 oranında artmıştır (IEA, 2020). Bu kapsamda, yapı fiziği ve fiziksel çevre denetimi alanında yapılan çalışmalar önemli araştırma alanları haline gelmiştir (Hens, Parijs ve Deurinck, 2010; Diakaki vd., 2010; Li vd., 2019).

Pasif stratejilerin bir binanın enerji kullanım yoğunluğu (energy use intensity – EUI) üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi de bu süreçte önemli bir kriter halini almış (De Wilde, 2014), morfoloji, yönlenme, malzeme seçimi gibi kriterlerin etkileri ısı konfor ve enerji tüketimi üzerinden irdelenmiştir (Srivastav ve Jones, 2009; Bodach, Lang ve Hamhaber, 2014; Cristini vd., 2015). Pasif stratejiler arasında en yaygın kullanılan yöntem yapı kabuğunun ısı transfer katsayısını en aza indirecek düzeyde yalıtım katmanının uygulanmasıdır (Rodriguez-Ubinas vd., 2014). Petrol krizleri sonrasında bir refleks olarak yapı kabuğundaki opak yüzeylerin yalıtım değerlerinin iyileştirilmesi yönünde önlemler alınmış, birçok binanın “hava geçirmez” (sızdırmaz) olarak tasarlanmasına odaklanılmış ve böylece ısı kayıplarına bağlı enerji tüketiminin azaltılması ile verimlilik hedeflenmiştir (Passarelli, 2009). Dünya Sağlık Örgütü’nün (WHO) 1984 tarihli bir raporunda, yenilenmiş binaların yüzde 30’unda iç mekân hava kalitesiyle (IAQ) ilgili sağlığı etkileyen şikayetler saptandığını ortaya konmuş (EPA, 1991), ilerleyen süreçte “hasta bina sendromu” adı verilen bu bulguların önüne geçilebilmesi amacıyla etkin mekanik sistemlerle havalandırma yapılması ciddi anlamda kabul görmeye başlamıştır (Redlich, Sparer ve Cullen, 1997; Stolwijk, 1991). Petrol ambargosu sonrasında sızdırmaz yalıtım değerlerinin elde edilmesine bağlı olarak iç mekanlarda 5 cfm/kişi seviyesinin altına düşen havalandırma oranları (Joshi,

2008) günümüzde Amerikan Isıtma, Soğutma ve Klima Mühendisleri Derneği tarafından yayınlanan ASHRAE Standard 62.1 (2013), örneğin ofis mekanları için bu değerin alt limitini 17 cfm/kişi olarak belirlemiştir.

Aktif, adaptif, ya da pasif olarak nitelendirilebilecek tüm enerji etkin çözümler iç mekân konfor koşullarını, binanın enerji performansını ve iç ortam kalitesini etkilemektedir. İç hava kalitesi doğal havalandırma ile desteklenen ve sızdırmazlık değerleri ile değerlendirilen bir kavram olup iç mekânda sağlıklı ortam koşullarının sağlanmasında en önemli kriterlerden biridir (Moghadam Baboli, Ibrahim ve Sharif, 2015; Blocken vd., 2011). Yapı kabuğu doğal havalandırma, iç hava kalitesi ve sızdırmazlık özellikleri üzerinden ele alınmakta ve sızdırmazlık mevcut binaların performansının belirlenmesi ve yeni tasarımlarda göz önüne alınması bakımından önemli bir parametre halini almaktadır (Nabinger ve Persily, 2011). Bu bağlamda, binalarda havalandırma, sızdırmazlık ve enerji performansı arasındaki etkileşim halindeki ilişkilerin önem taşıdığı görülmektedir. Özellikle COVID-19 pandemisiyle birlikte havalandırma ve sızdırmazlık gibi yapı biyolojisini doğrudan etkileyen parametreler tekrar önemli güncel tartışma alanları haline gelmiştir (Kalmar ve Kalmar, 2021; Dominguez-Amarillo vd., 2020; Takewaki, 2020)

Havalandırma en temel haliyle dış ortamdaki temiz havanın bir mekân ya da bir binaya yönlendirilmesi olarak tanımlanabilir (Atkinson vd., 2019). Günümüzde havalandırma sağlıklı bir konutun en önemli bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Dimitroulopoulou, 2012). İç mekânda nem, koku ve diğer kirleticileri azaltmak amacıyla havalandırma yapılarak, yani iç mekân havasının tümüyle ya da kısmen dış ortam havası ile değiştirilmesi yoluyla, özellikle formaldehit, uçucu organik bileşikler (VOC) ve radon gibi sağlık sorunlarına neden olabilecek kirleticiler iç mekândan uzaklaştırılmaktadır (Hernandez vd., 2020; Deng, Yang ve Zhang, 2012; Rösch vd., 2014). Yetersiz havalandırmanın kullanıcılar bakımından birçok olumsuzluğa sebep olması kaçınılmazdır.

Yukarıda da belirtildiği gibi, havalandırma rejimlerindeki yetersizlik hasta bina sendromu, iç mekânda ısıl ortama ve hava kalitesine bağlı konforsuzluk, sağlık sorunları gibi kullanıcıların iç mekânda ve gündelik hayattaki performanslarını etkileyen sorunlara neden olabilmektedir (Redlich, Sparer ve Cullen, 1997; Stolwijk, 1991). Bu bağlamda, havalandırmanın birincil amacı, iç ortam hava kalitesi ve ısıl konforun mekân kullanıcılarına

uygun hale getirilmesi olarak özetlenebilmektedir (Dimitroulopoulou, 2012). Binalarda iç hava kalitesinin etkin biçimde kontrol edilmesi için doğal, mekanik ve hibrit (karma) havalandırma sistemleri kullanılmaktadır (Haihua Zhang vd., 2021).

Doğal havalandırma basınç farklılıkları, rüzgâr yönü ve şiddeti ve buoyans (hidrostatik kaldırma) gibi fiziksel etkenler ya da bu etkenlerin kombinasyonu ile dış mekandan iç mekana hava akışının gerçekleşmesidir ve büyük ölçüde yerel iklim koşullarına ve geleneksel deneyime dayanan pasif bir sistemdir (Haihua Zhang vd 2021). Diğer yandan, doğal havalandırma tasarımı mimari proje sürecinde ele alınan bir bileşendir ve tek taraflı, çapraz havalandırma ve gece havalandırması gibi yöntemlerle uygulanabilmektedir (Etheridge, 2012; Etheridge, 2015). Doğal havalandırma sistemleri uygun şekilde kontrol edildiği sürece iç mekan hava kalitesi ve iklimlendirme kullanımında enerji etkin çözüm sunmakta, düşük karbondioksit emisyonunu ve indirgenmiş enerji tüketimi ile küçük ve orta ölçekli yapılarda tercih edilmektedir (Schulze ve Eicker, 2013; Taleb, 2015). Mekanik havalandırma, genellikle aktif ısıtma, soğutma sistemlerinin bir parçası olarak binalarda kullanılan ve dış mekandaki havanın fan gibi mekanik güç sağlayan bir teknik ekipman aracılığıyla iç mekana aktarılması ile havalandırmanın sağlanması anlamına gelmektedir ve doğal havalandırmadan en temel farkları enerji tüketimleridir (Brager, Alspach ve Nall, 2011). Doğal ve Mekanik havalandırmanın bir arada kullanımına ise hibrit (karma) havalandırma adı verilmektedir ve bu yöntemle hem iç mekanda hava kalitesi sağlanmakta hem de harcanan enerjinin en aza indirilmesi amaçlanmaktadır (Sha ve Qi,2020). Günümüzde büyük ölçekli binaların geniş hacmi ve karmaşık programatik tasarımları nedeniyle, tekil bir pasif yöntemle havalandırılması olanaksızdır. Bu nedenle, hibrit yöntemlerin enerji tasarrufu sağlayacak biçimde optimum kombinasyonunun sağlandığı ve böylece enerji tüketiminin indirgendiği bilinmektedir (Zhang vd., 2021).

Binalarda havalandırmanın enerji performansı bakımından önemli bir kriter olması ve modern ve büyük hacimli binaların havalandırma sistemlerinin tamamıyla mekanik havalandırmaya dayanması enerji tüketimi bakımından oldukça kapsamlı olarak ele alınan araştırma konularıdır (Perez-Lombard, Ortiz ve Pout, 2008; Ruparathna, Hewage ve Sadiq, 2016). Mekanik sistemler aracılığıyla, iç mekandaki havanın dış mekandaki havayla değiştirilmesi ve bu havanın iklimlendirilmesine yönelik enerji talebinden (ısıtma-soğutma

yükleri) kaynaklanan ısı kaybının en aza indirilebilmesi için, yapı kabuğunun sızdırmazlık değerlerinin yüksek düzeyde olması gerekliliği bir parametre olarak uluslararası standartlarca belirlenmiştir (ABAA, 2016; ASHRAE 1478-RP, 2013; ASHRAE 90.1, 2007 vb.)

Havalandırma ile binadan hava kaçıışı (infiltrasyon) değerleri arasındaki temel fark dış mekandan iç mekana aktarılan temiz havanın sıcaklık ve nem düzeylerinin kontrol edilebilirliği ile ilişkilidir. Havalandırmanın mikro iklim koşullarına bağlı olarak kullanıcı tarafından kontrol edilmesi ya da mekanik sistemlerde dışarıdan içeriye aktarılan temiz havanın iklimlendirmesi tamamen iç mekandaki kullanıcıların konforu ve ortam kalitesi göz önüne alınarak gerçekleştirilmektedir. Ancak düşük sızdırmazlık düzeylerine sahip binalarda bu durum söz konusu değildir. İç mekandaki iklimlendirilmiş havanın sürekli kaybedilmesi söz konusudur. Bu bağlamda, infiltrasyon yapı kabuğundaki çatlaklardan/boşluklardan istemsiz sızması olarak tanımlanabilir (Prignon ve Van Moeske, 2017) ve infiltrasyona bağlı olarak iç mekan havasının yeniden ısıtılması ve soğutulması binanın enerji performansının azalması anlamına gelmektedir (ASHRAE, 2012).

Binalarda sızdırmazlığın saptanması kritik önemdedir ve çalışmalar bir binanın enerji performansının doğru tahmin edilebilmesi için sızdırmazlık değerinin bilinmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Prignon ve Van Moeske, 2017; Šadauskienė vd., 2016). Bu amaçla birçok bilimsel çalışma, mevcut binalarda farklı ölçüm yöntemleri kullanarak sızdırmazlık değerlerinin saptanması (Zheng vd., 2019; Almeida, Barreira ve Moreira, 2020) ve sızdırmazlık ölçümlerinde belirsizliğin giderilmesi (Prignon vd., 2019; Heim ve Miszczuk, 2020) gibi alanlara odaklanmaktadır. Literatür Çalışması'nın sunulduğu Bölüm 2'de meta analiz çalışması altında kapsamlı olarak ele alınacak olan bu araştırmalar iki önemli noktayı işaret etmektedir: (1) Binalarda sızdırmazlık çalışmaları büyük bir oranla bağımsız/müstakil konutlarda gerçekleştirilmektedir ve (2) ölçüm yöntemi olarak sıklıkla fan basınçlandırma testi tercih edilmektedir. Diğer yandan çalışmaların belirli bir oranı uluslararası standartlar yapı kabuğu sızdırmazlığı için belirlenen sınır değer koşullarının gerçekleşip gerçekleşmediğini test etmeye odaklanmaktadır.

Literatürde elde edilen bu bulgular, bina ve dış ortam arasında basınç farkı oluşturarak yapı kabuğu hava kaçaklarını tespit etmeye yönelik olarak kullanılan fan

basınçlandırma testlerinin yaygın olarak konutlarda olduğunu ortaya koymuştur ve bu durumun bağımsız, küçük ölçekli, müstakil konutlarda sınır koşullarının kontrolünün daha kolay olması ve tek ekipman kullanım opsiyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Standartların da konut yapılarına daha fazla odaklanması bu saptamayı destekler niteliktedir. Orta ve büyük ölçekli binaların sızdırmazlık değerlerinin ölçülebilmesi için ise sınır koşullarının çok iyi kontrol edilmesi ve çok sayıda test ekipmanının bir arada kullanılması gerekmektedir.

Bu bağlamda, sızdırmazlık çalışmalarının çoğunlukla bağımsız müstakil konut yapılarına odaklandığı saptamasından hareketle, bu tez çalışması konut dışı yapılarda tek ekipman kullanarak fan basınçlandırma testinin uygulanabilirliğini araştırmayı amaçlamaktadır. Bu tez çalışmasının temel araştırma sorusu ve alt araştırma soruları aşağıda belirtilmektedir:

Temel Araştırma Sorusu:

- Konut dışı binalarda, çok sayıda mekanda tek fan basınçlandırma test ekipmanı kullanarak yapılan ölçümler sonucunda tüm-bina sızdırmazlık değerini saptamak mümkün müdür?

Alt Araştırma Soruları:

- Ölçüm prosedürü nasıl belirlenmelidir ve hangi sınır koşulları tanımlanmalıdır?
- Ölçüm yapılacak çoklu mekanlar hangi koşullara göre belirlenmelidir?
- Verilerdeki belirsizlik nasıl tespit edilmelidir ve hangi güvenilirlik çalışması aracılığıyla veriler kontrol edilmelidir?
- Elde edilen sonuçlar ve standartlar arasındaki ilişkiler nasıl kurulmalıdır?

Bu araştırma sorularına yanıt verebilecek şekilde deneye dayalı bir çalışma yöntemi kurgulanmış olup ve konut dışı bir yapıda yürütülen fan basınçlandırma testleri aracılığıyla uluslararası standartlara referansla çok-mekanlı/çok-noktalı bir ölçüm yaklaşımı öne sürülmektedir. Bu deneysel yöntem aracılığıyla tüm-bina sızdırmazlık değerlerinin saptanması amaçlanmaktadır.

Problem tanımı ve araştırma soruları göz önüne alındığında bu çalışmanın hipotezi şu şekilde kurulmaktadır: Enerji performansını doğrudan etkileyen tüm-bina sızdırmazlık değeri, tek fan basınçlandırma test ekipmanı kullanarak birden fazla alt mekânda ölçüm

yapmak yoluyla saptanabilir. Bu hipotez, tez kapsamında kurulan deneysel yöntem aracılığıyla test edilecektir.

Bu tez çalışması kapsamında ikinci bölümde yöntem kurgusunu da destekleyecek biçimde alan yazın çalışması ve ilişkili alt alanlar özetlenmektedir. Yöntem bölümünde deneysel çalışmasının uygulanmasına ilişkin detaylar sunulmaktadır. Özellikle ölçüm uygulamalarının detaylı olarak aktarıldığı yöntem bölümünden elde edilen sonuçlar dördüncü bölüm olan Bulgular bölümünde tartışılmaktadır. Beşinci ve son bölümde çalışmanın ana hatları özetlenmekte, literatüre sunduğu katkılar ve ileriki çalışma potansiyelleri sunulmaktadır.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu çalışma kapsamında Giriş bölümünde tanımlanmış olan problem, araştırma soruları ve hipotez bağlamında bir literatür araştırması yürütülmüş ve bu bölümde sunulmuştur. Bu bölümdeki alt başlıklardan ilki binalarda sızdırmazlık konusuna odaklanmakta ve araştırma alanının bilimsel arka planını özetlemektedir. İkinci alt başlık kapsamında ulusal ve uluslararası ölçekte sızdırmazlık standartlarının ölçüm, sınır değer ve değerlendirme kriterleri özetlenmiştir. Üçüncü alt bölümde son on yılda sızdırmazlık çalışmalarının özetlendiği bir meta analiz çalışması yapılmıştır. Dördüncü ve son alt bölümde ilk üç bölümde saptanan ve yöntem kurgusunun netleştirilmesine yardımcı olan yaklaşım ve parametreler tartışılmıştır.

2.1. Binalarda Sızdırmazlık

Sızdırmazlık Jokisalo vd.'ne göre (2009) bir yapıda doğal ya da mekanik sistemleri kullanılmadığı zamanlarda dahi yapı kabuğundan iç ve dış basınç farkına bağlı olarak hava geçişinin, yani iç mekân havasındaki değişim oranının oransal bir temsilidir ve ACH_{50} (50 Pa basınç farkında gerçekleşen saatlik hava değişim oranı) ile ifade edilmektedir.

Sızdırmazlık, havalandırmayı anlamada yapı kabuğuna ilişkin en önemli faktördür. Yapı kabuğundan hava akışı çeşitli biçimlerde tanımlanmaktadır, ancak temelde, çatlak veya diğer istenmeyen açıklıklardan havanın sızması olarak özetlenebilmektedir. Tüm sızdırmazlık ölçümleri yapı kabuğundan hava akış oranının tespitine odaklanmaktadır. Sızdırmazlık enerji kullanımı ve iç mekân hava kalitesi açısından önemli bir konudur ve kontrolsüz hava akışı nemli havanın yapı kabuğu katmanlarındaki soğuk yüzeylerle temas etmesi ve yoğuşmaya bağlı olarak mikrobiyolojik oluşumlar gibi sağlıklı koşullara yol açabilmektedir (Sherman ve Chan, 2004).

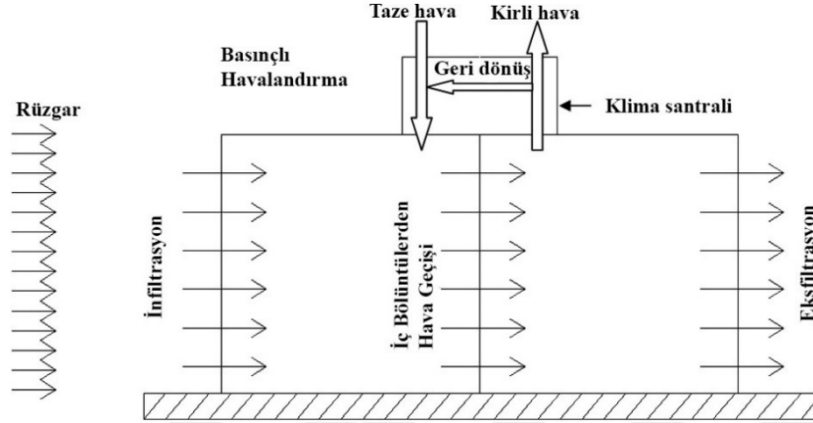
2.1.1. İnfiltrasyon ve Sızdırmazlık İlişkisi

İnfiltrasyon, çatlaklardan veya diğer istem dışı oluşan açıklıklarından geçen havaya verilen isimdir ve özellikle binalarda ısı transferi hesaplamalarının önemli bir bileşenidir (Younes, Abi Shdid ve Bitsuamlak, 2011; Jokisalo vd., 2009). İnfiltrasyon yapı kabuğu boyunca gerçekleşen basınç farklarının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır (Jackman, 1973). Yapı kabuğunu etkileyen bu tür basınç farkları, iç-dış sıcaklık farkları, baca etkisi ve rüzgâr basıncı nedeniyle oluşmakta, rüzgâr basıncı ise binanın etrafındaki hava akımlarından kaynaklanmaktadır (Şekil 2.1 ve Şekil 2.2, Younes, Abi Shdid ve Bitsuamlak, 2011). İnfiltrasyon konum, geometri, hava yoğunluğu, rüzgâr hızı ve rüzgâr yönüne bağlı, doğrusal olmayan şekilde gerçekleşen bir olaydır ve bu nedenle modellenmesi zordur (Prignon ve Van Moeske, 2017; Sherman 1980).

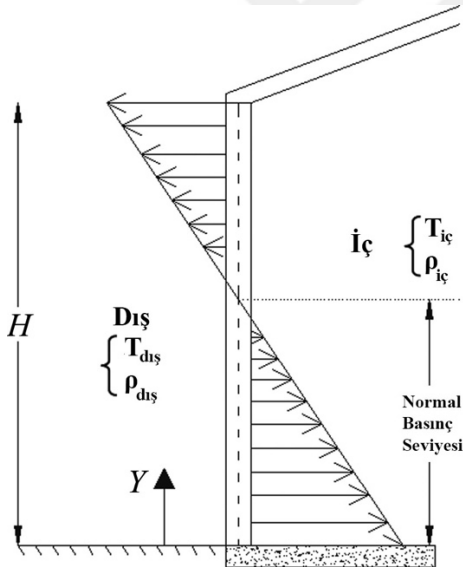
Sızdırmazlık ve infiltrasyon birbirine karıştırılmamalıdır. İç ve dış ortam arasında basınç farkı oluştuğunda yapı kabuğundaki çatlak veya diğer istem dışı açıklıklardan hava geçişi gerçekleşmektedir. Bu bağlamda, infiltrasyon bu hava akışına karşılık gelirken sızdırmazlık yapı kabuğunun hava geçişine olan direnci olarak tanımlanabilir. İnfiltrasyon 50 Pa'lık bir basınç farkında yapı kabuğundan iç mekâna giren hava geçişi üzerinden tanımlanmaktadır. İnfiltrasyon yukarıda da belirtildiği gibi rüzgâr hızı, sıcaklık ve yönlenmeye bağlıdır, ancak sızdırmazlık değerinin iklim değişikliklerinden bağımsız olması amaçlanmaktadır. Bu sebeple sızdırmazlık testleri ya da İnfiltrasyon miktarının sayısal olarak belirlenmesine ilişkin hesaplamalar 50 Pa'lık bir basınç farkı göz önüne alınarak uygulanmakta, böylelikle iklimsel farklılıklardan kaynaklanan etki göz ardı edilmektedir (Prignon ve Van Moeske, 2017; Sherman ve Chan 2004).

Sızdırmazlık ve infiltrasyon arasında tanıma dayalı bu farklılıklara rağmen matematiksel bir bağ bulunmaktadır. İlk deneysel model baş parmak kuralı olarak adlandırılan Prignon ve Van Moeske'nin (2017) M.W. Liddament'ten alıntılandığı infiltrasyonun sızdırmazlığın 1/20'si oranında olduğu varsayımdır. Bu ilişki, infiltrasyonu etkileyen çok sayıda parametreyi hesaba katmaz. 1987'de Sherman günümüzde de kullanılan "LBL (Lawrence Berkeley Laboratuvarı) modeli" geliştirilmiştir (Sherman ve Chan, 2004). Bu modelde bina yüksekliği, rüzgâr a maruz kalma oranı ve istenmeyen açıklıkların karakterini hesaba katmak amacıyla düzeltme faktörleri önerilmiştir (Sherman, 1987). Diğer

bir deneysel model ise 1990 yılında Walker ve Wilson tarafından geliştirilen “AIM-2” Alberta Hava İnfiltrasyonu Modeli’dir. Bu model, toplam hava akışının yığın akışı ve rüzgâr akışının bir fonksiyonu olduğunu varsayar (Prignon ve Van Moeske, 2017; Walker ve Wilson, 1990).



Şekil 2.1. İnfiltrasyon ve havalandırmaya bağlı akışlar (Younes, Abi Shdid ve Bitsuamlak, 2011)



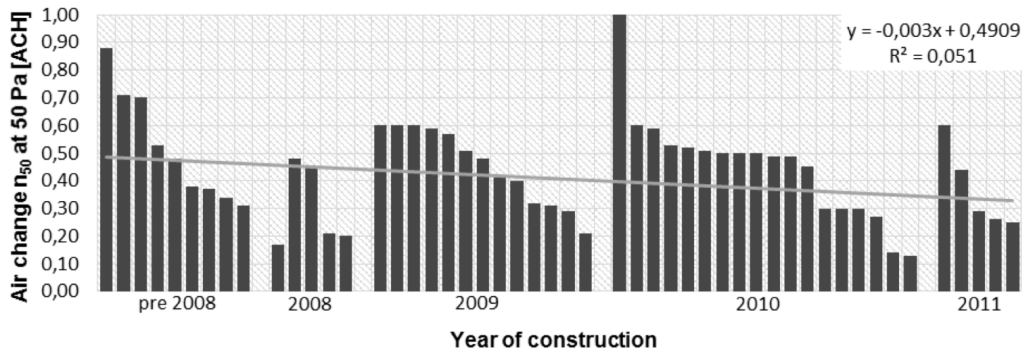
Şekil 2.2. Baca etkisi ve bina cephesinde basınç dağılımı (Younes, Abi Shdid ve Bitsuamlak, 2011)

2.1.2. Binalarda Sızdırmazlığı Etkileyen Parametreler

Binalarda sızdırmazlığın yapı tipi, zemin alanı, bina yaşı, kat sayısı ve yalıtım tipi gibi değişkenlerden etkilendiği bilinmektedir (Montoya vd., 2010; Pan, 2010). Binalarda sızdırmazlığı etkileyen parametrelerden en önemlileri düşey yapı kabuğu elemanları ve kullanım alanıdır. Basınç farkı oluştuğunda dış hava özellikle yapı kabuğunda kullanılan

malzemelerin gözeneklerinden iç ortama geçiş yapabilmektedir. Malzeme gözenekliliğine bağlı olan hava akışları hava kesici katmanların duvar kurgusunda kullanımına bağlı olarak, istenmeyen ve kontrolsüz açıklıklara kıyasla, 50 Pa basınç farkında daha ihmal edilebilir düzeydedir. Bu nedenle araştırmacıların çoğu malzeme düzeyindeki hava geçirgenliğini bir parametre olarak dikkate almamaktadır. Ancak, düşey yapı kabuğu elemanlarının alanı sıklıkla infiltrasyon ile ilişkilendirilmiş ve kısmi doğrudan korelasyon saptanmıştır, dolayısıyla yapı kabuğu alanının sızdırmazlıkla da dolaylı olarak ilişkilendirilebileceği düşünülmektedir (Prignon ve Van Moeske, 2017).

Binalarda sızdırmazlığı irdelemeye yönelik çalışmalarda genellikle tüm bina bilgilerine hâkim olunması gerektiğini işaret etmektedir. Düşey yapı kabuğu elemanları ve kullanım alanı infiltrasyonu doğrudan etkilemekte ancak bina hacmi dolaylı yoldan etkilemektedir (Kraus ve Kubečková, 2013). Açıklık alanı ve çevresi ve açıklık sayısı (pencereler, kapılar) nadiren tartışılmakta olup daha fazla araştırma gerekmektedir. Temelde, açıklık birleşim yerleri sızdırmazlığa ilişkin zayıf noktalar olarak tanımlanmaktadır (Prignon ve Van Moeske, 2017).



Şekil 2.3. Farklı yıllarda inşa edilmiş binalar için 50’Pa basınç farkında hava değişim oranları (Kraus ve Kubečková, 2014)

Sızdırmazlığın yalnızca binanın fiziksel özellikleri (malzeme ve boyutlandırma) ile değil, yapım yılı ve çevresel etkilerle de ilişkili olduğu bilinmektedir. Binanın yapım yılının sızdırmazlık bakımından etkili olup olmadığını irdeledikleri çalışmada Kraus ve Kubečková (2014) 2007 ve 2011 yılları arasında Çekya’da inşa edilmiş binaları incelemiş ve yeni binaların eski binalara göre daha sızdırmaz olmasına yönelik kısmi bir eğilim gözlemlemişlerdir (Şekil 2.3). Gelişen teknolojiyle birlikte her geçen gün yapım teknikleri ve yönetmelikler değişmektedir. Diğer yandan, binanın yaşlanmasıyla birlikte sızdırmazlık

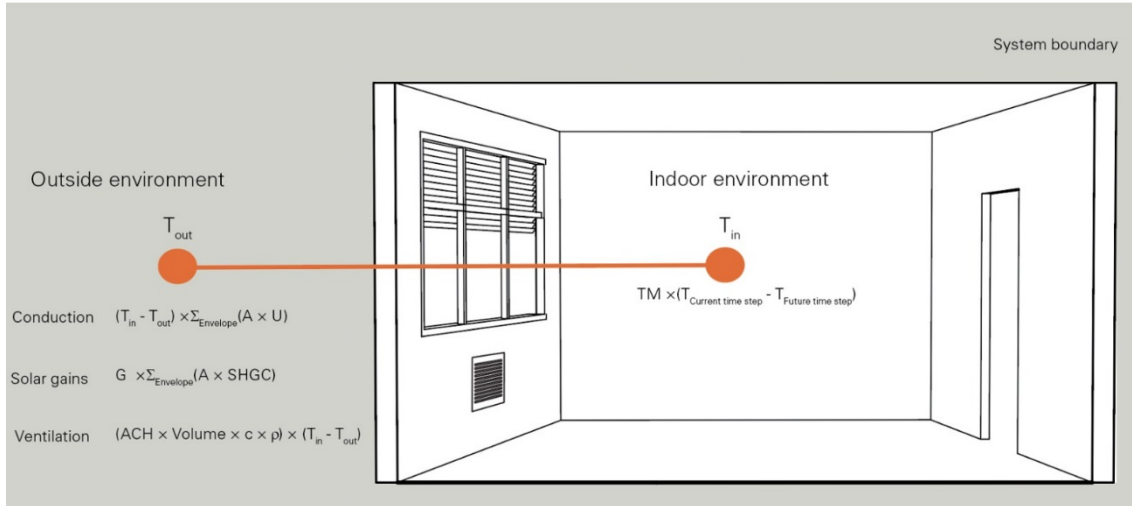
oranlarında değişikliklerin ortaya çıktığı, binanın inşa edilmesinden sonraki bir ila beş yıl arasında ACH50’de zaman içinde %28’e varan bir artış yaşandığı saptanmıştır (Bracke vd., 2016; Prignon ve Van Moeske, 2017). Sızdırmazlığın iklim farklılıkları ve çevresel etkilere bağımsız olacağı düşünölebilir ancak Chan, Joh ve Sherman (2013) farklı iklim bölgelerinde sızdırmazlık değerlerini incelemiş ve istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar bulmuştur. Bu gözlem büyük ihtimalle iklim kuşaklarına göre değişen yapımcı biçimlerinden kaynaklanmaktadır (Prignon ve Van Moeske, 2017).

Özetle, sızdırmazlık binanın tüm fiziksel nitelikleri, işlevi, içinde bulunduğu iklim ve çevreye ait etmenlerden etkilenmekte olup, bina sızdırmazlığına ilişkin yürütölecek tüm çalışmalarda bu parametrelerin değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

2.1.3. Binalarda Sızdırmazlığın Ölçölmesi

Düşey yapı kabuğunda infiltrasyona neden olabilecek kontrolsüz açıklıklar rüzgâr ve sıcaklık değişimlerine bağlı basınç farklılıkları oluştuğunda dış mekândan iç mekana ya da tersi yönde hava akışının gerçekteşmesine neden olmaktadır. Diğer yandan, iklimlendirme amaçlı kullanılan merkezi ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemleri de bu basınç ve sıcaklık farklılıklarının oluşmasına katkıda bulunarak düşey yapı kabuğu elemanlarında gerçekteşen infiltrasyon miktarını etkileyebilir (Chan, Joh ve Sherman, 2013).

Sızdırmazlığın değerlendirilmesi özellikle binaların enerji verimliliği ve iç mekân konfor koşullarının iyileştirilmesi bakımından önemli bir unsur olarak kabul edilmektedir (Bramiana, Entrop ve Halman, 2016). şekil 2.4’te göröldüğü gibi, bina enerji performansı havalandırma ve sızdırmazlığa bağlı olarak tanımlanan ACH’den (saatlik hava değişim oranından) doğrudan etkilenmektedir (Reinhart, 2018). řadauskienė vd. (2016) enerji performansı hesaplamalarının ancak binanın sızdırmazlığını doğruladıktan sonra güvenilir olabileceğini ifade etmektedir.



Şekil 2.4. Binalarda enerji performansını etkileyen kriterler (Reinhart, 2018)

Yapı kabuğunda gerçekleşen istenmeyen hava akışları ısıtma ve soğutma enerji yüklerini artırmakta, kullanıcı konforunu etkilemekte, iç mekan hava kalitesi kontrolünü zorlaştırmakta, yoğuşma kaynaklı yapı kabuğu bozulmalarına ve küf/mantar oluşumuna neden olabilmektedir (ABAA, 2016). McWilliams (2002), hava akışının ölçülmesine ilişkin çalışmasında, sızdırmazlığı ölçmeye yönelik teknikleri irdelemiştir. Tekniklerin büyük çoğunluğunun, bina cephesi boyunca sabit bir basınç farkı yaratmak için bir fanın veya üfleyicinin kullanıldığı “fan basınçlandırma” kategorisinde ele alındığını saptamıştır. “Fan basınçlandırma testlerinde fandan geçen basınç çeşitli ekipmanlarla ölçülebilmektedir. Konutlar ve küçük binalar için fan basınçlandırma tekniğinin en yaygın türü *Blower Door Test* olarak bilinmektedir (Sherman ve Chan, 2004).

Sherman (1995) fan basınçlandırma (*blower door*) yönteminin ilk olarak 1970’li yılların sonlarında Blomsterberg tarafından (1977, alıntılanan Sherman, 1995) yapı kabuğu sızdırmazlık değerlerini saptamak amacıyla ve İsveç’te pencereye monte edilen bir fan sistemi olarak kullanılmış, daha eski bir yöntem olan izleyici gaz metoduyla karşılaştırılmıştır (Kronvall 1980; Sherman, 1995). Aynı yöntem yine bir pencere ünitesi olarak Caffey (1979) tarafından Teksas’ta kullanılmış ve “süper emici – *super sucker*” olarak isimlendirilmiştir (Şekil 2.5). Harje, Blomsterberg ve Persily (1979) ise benzer bir yöntemi Princeton Üniversitesi’nde bir kapı ünitesi şeklinde uygulamıştır (Sherman, 1995).

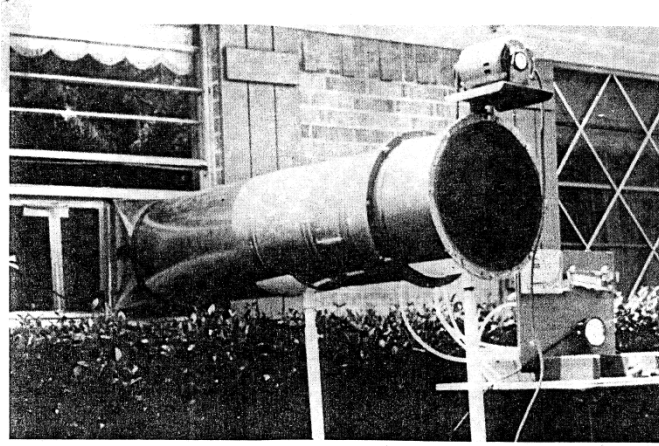


Fig. 1

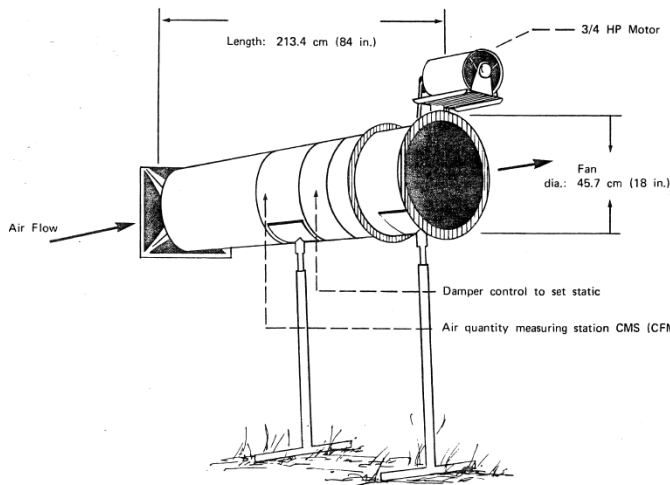


Fig. 2 "Super Sucker" - specific dimensions

Şekil 2.5. Caffey tarafından Teksas'ta kullanılan "süper emici – *super sucker*" adı verilen fan basınçlandırma test ekipmanı (Caffey, 1979)

Fan basınçlandırma yöntemi binaların hava geçirmezliğini ölçmek ve hava sızıntısı olan yerlerin saptanmasına yardımcı olmak için tasarlanmış bir teşhis aracıdır. Binaların sızdırmazlığının saptanması, binalarda doğal sızma oranlarının tahmin edilmesi, hava yalıtımının etkinliğinin ölçülmesi ve belgelenmesi, şartlandırılmış havalandırma sistemlerinde kanallarda gerçekleşen sızıntının ölçülmesinde kullanılmaktadır (TEC, 2012). Fan basınçlandırma testlerinde kullanılan ekipmanlardaki fan sistemi 3/4 beygir gücünde kalıcı bölünmüş kapasitöre sahip bir AC motoru ve fan muhafazasından oluşmaktadır. Fandan geçen hava akışı, motorun ucuna takılı olan akış sensöründeki basınç ölçülerek belirlenir. Fan çalışırken, hava fanın giriş tarafına çekilir ve egzoz tarafından çıkar (metal bir fan muhafazası fanın egzoz tarafına cıvatalanmıştır). Blower-Door Fan, fanın girişine takılı bir dizi kalibre edilmiş akış halkası kullanarak çok çeşitli akış hızlarında hava akışını doğru bir şekilde ölçebilir. Fan basınçlandırma ekipmanları genellikle fanlı bir kapı sistemi

ve A, B C, D ve E olarak adlandırılmış olan ve akış kuvvetini düzenleyen halkalara sahiptir (TEC, 2020a).

Fan basınçlandırma testi bina cephelerinin sızdırmazlığını belirlemek için kullanılmakta ve bu teste ait bulgular genellikle $\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$ @50Pa cinsinden ifade edilmektedir (Passivehouse, 2021a). 50Pa basınçta yapılan testlerde saatlik hava değişim oranı (ACH50) 2'den küçük ise bina sızdırmaz olarak değerlendirilir. ACH50 <1.5 değeri ise yapının mekanik havalandırmaya ihtiyacı olduğu anlamına gelmektedir (BKC, 2021). Pasif konutlarda ortama $\text{ACH}_{\text{nat}} 0.6\text{h}^{-1}$ iken (Passivehouse, 2021b) yeni yapılan binalarda 1.5h^{-1} değerinin altında olması beklenmektedir (TEC, 2017). 50Pa basınçta binada gerçekleşen infiltrasyon Denklem 2.1 ile hesaplanmaktadır.

$$Q_{\text{infiltrasyon}} = (\text{ACH50} \times V \times c \times \rho) \times (T_{\text{iç}} - T_{\text{dış}}) \quad \text{Denklem (2.1)}$$

Burada,

$Q_{\text{infiltrasyon}}$, binada gerçekleşen sızdırmazlık,

ACH50, 50Pa basınç farkında mekânda gerçekleşen saatlik hava değişim oranı,

V , binanın hacmi (ölçüm yapılan hacim),

c , özgül ısı kapasitesi (20°C , 1000J/kgK),

ρ , hava yoğunluğu (1.2kg/m^3)

$T_{\text{iç}}$, iç sıcaklık ($^\circ\text{C}$)

$T_{\text{dış}}$, ise dış sıcaklıktır ($^\circ\text{C}$).

Belirli bir basınçtaki akış hızı ve sızma alanı, farklı biçimlerde aynı bilgileri içermektedir. Tüm ölçütler, test edilen yapı cephesindeki toplam sızma miktarını ifade eder. Kural ve standartları belirlemek veya bir yapıyı diğeriyle karşılaştırmak için, tek bir veri üzerinden karşılaştırma yapılır (Sherman ve Chan, 2004). Bu veri genellikle ACH50 olarak kabul edilmektedir. Bu şekilde farklı büyüklükteki binalar aynı ölçütte değerlendirilebilir.

ACH50 aynı zamanda farklı büyüklükteki binaların 50Pa basınç farkında ölçülen hava akışlarının birbiriyle karşılaştırılabilmesini sağlayan bir veridir (TEC, 2017). 50 Pa basınç farkında gerçekleşen saatlik hava değişim oranı (ACH50) ölçümde elde edilen CFM50 değerinin 60 ile çarpılması, yani saatlik hava akışının saptanması ve bu değer

binanın hacmine bölünmesi ile elde edilmektedir (Denklem 2.2). ACH50 değeri, 50Pa basınç farkı uygulandığında, binadaki toplam hacimdeki havanın saatlik olarak kaç kez değiştiğini ifade etmektedir (TEC, 2017).

$$ACH50 = \frac{CFM50 \times 60}{V} \quad \text{Denklem (2.2)}$$

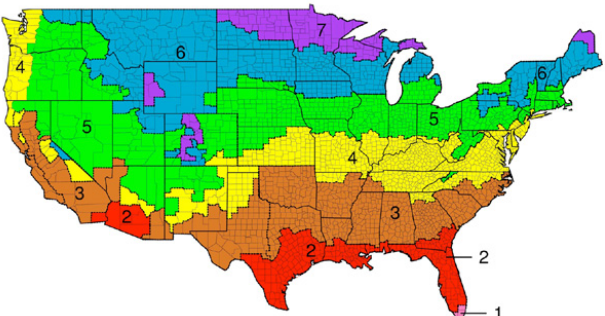
CFM50 ise, 50Pa basınç farkı yaratılan ölçüm süreci boyunca, üfleyici fanın akan havanın dakikada kübik feet (ft³/min) cinsinden ölçülen miktarına karşılık gelmektedir. Yine bina sızdırmazlığına ilişkin yaygın olarak kullanılan ve yapı kabuğundan gerçekleşen toplam hava sızma miktarını ifade etmektedir (TEC, 2017).

Özellikle konut yapılarına ilişkin sızdırmazlık değerleri TEC (2017) tarafından net bir biçimde tanımlanmıştır. Çizelge 2.1’de ACH50’yi temel alacak şekilde konut yapılarında bağlı sızdırmazlık aralıkları tanımlanmaktadır (TEC, 2017). ABD’de Enerji Bakanlığı (DOE) tarafından uygulanan International Energy Conservation Code (IECC) iklim bölgesine bağlı olarak izin verilen en yüksek sızdırmazlık değerlerini ACH50 için tanımlamaktadır (US DOE, 2012) ve bu sınır değerler Çizelge 2.2’de sunulmaktadır.

Çizelge 2.1. Konutlar için sızdırmazlık sınır değerleri (TEC, 2017)

0.0 – 1.5 ACH	İleri düzeyde sızdırmaz
1.5 – 3.0 ACH	Sızdırmaz
3.0 – 5.0 ACH	Kısmen sızdırmaz
5.0 – 7.0 ACH	Sızdırmaz olmayan
7.0 – 10.0 ACH	Oldukça sızdıran
10 ACH’den yüksek	İleri düzeyde sızdıran

Çizelge 2.2. ABD’de iklim bölgelerine göre IECC tarafından belirlenmiş olan sızdırmazlık limit değerleri (US DOE, 2012)

		
İklim Bölgesi	2019 IECC	2012 IECC
1-2	< 7 ACH	≤ 5 ACH @ 50Pa
3-8	< 7 ACH @ 50Pa	≤ 3 ACH @ 50Pa

Çizelge 2.1 ve 2.2 bir arada değerlendirildiğinde sıcak iklimlerde sızdırmazlık sınır değerlerinin IECC 2012 standardına göre 5ACH altında, yani kısmen sızdırmaz, diğer iklim bölgeleri için ise 3ACH altında yani sızdırmaz olması gerektiği görülmektedir.

Sızdırmazlığın belirlenmesinde kullanılan fan basınçlandırma yöntemine ait ölçüm prosedürleri net bir biçimde tanımlanmış olup bu bilgiler Bölüm 2.2’de aktarılmaktadır. Ancak ölçümden elde edilen veriler genellikle doğal koşullar altında gerçek zamanlı hava akışlarını veya karmaşık havalandırma sistemlerinin davranışını tahmin etmek için kullanılamamaktadır (Sherman ve Chan, 2004). Diğer bir deyişle bir binaya ya da havalandırma sistemine ait bütüncül bir resim sağlayan bu teşhis yöntemi o yapı kabuğu ya da sistemdeki problemli tüm alanların saptanmasına dair tek başına bir çözüm geliştirmemektedir. Teşhis yaklaşımları güçlendirebilmek amacıyla kısmen daha az kullanılan ancak sızdırmazlığı belirlemeye yardımcı olan başka ölçüm teknikleri de geliştirilmiştir. Bunlardan biri, mekanlardaki sızdırmazlık değerlerini ölçmek için kullanılan izleyici gaz metodudur ve çalışma prensibi sıkıştırılan havanın iç ve dış ortam ile mekanlar arası geçişini saptamaya yön hava sıkıştırılmış başka bir odadan diğer mekana kaçırılan havadır (Prignon ve Van Moeske, 2017; Lee, 2011; Bae, 2013). İzleyici gaz yöntemi tüm bina sızdırmazlığını belirlemek için kullanılmamaktadır ancak infiltrasyonu ölçmek için hala en yaygın şekilde kullanılan yöntemlerden biridir. İzleyici gaz yöntemi sıklıkla fan basınçlandırma yöntemi ile bir arada kullanılmakta ve böylece yapı kabuğundaki istenmeyen açıklıkları tespit etmeye yardımcı olmaktadır (Prignon ve Van Moeske, 2017; Hong 2016; Ghazi 2014).

Ölçüm yöntemleri uluslararası standartlarla belirlenmiş olup Bölüm 2.2’de detaylı olarak aktarılmaktadır. Öncesinde sızdırmazlığın fiziksel özelliklerinin daha iyi anlaşılması önem taşımaktadır. Hava sızdırmazlığını ölçmek için kullanılan temel ölçü, belirli bir referans basınçta zarfın içinden geçen hava akışıdır. En yaygın referans basınçları 50Pa ve 4Pa’dır, ancak 1Pa, 10Pa, 25Pa ve 75Pa düzeyinde basınçların da testlerde kullanılması söz konusu olabilmektedir (Sherman ve Chan, 2004). Büyük binalarda cephe birleşenlerinin, örneğin pencerelerin, **75Pa** basınçta test edildiği bilinmektedir. Ancak bu basınç ölçüm yapmak için çok yüksektir, çünkü bazı cephe birleşenleri bu denli yüksek basınç altında değişebilir. Basınçlandırma ekipmanının 75Pa basınca ulaşması da zor olabilmekte, özellikle

rüzgar etkisinin sert olduğu durumlarda 75Pa basınç farkını yaratabilecek hava akışını sağlamak bir sorun olabilmektedir (Sherman ve Chan, 2004).

50Pa en yaygın kullanılan ölçüm basıncıdır. 50 paskallık bir basınç binaya doğru tüm yönlerden yaklaşık 32 kms hızıyla esen rüzgâr tarafından oluşturulan basınca eşittir (TEC, 2017). Bu değer standart fan basınçlandırma ekipmanının çalışması için uygun, ancak testleri anlık hava etkilerinden bağımsız kılacak kadar da yüksektir. Tek nokta ölçümlerinde (Bölüm 2.2) genellikle 50Pa basınç farkında ölçüm yapılması önerilmektedir (Chapter Eight RESNET, 2013; Sherman ve Chan, 2004).

25Pa, ince çatlaklardan kaynaklanan hava akışlarını ölçmek için kullanılan referans basınçtır. Bu nedenle bazen bina kabuğu referans basıncı olarak da ifade edilmektedir. Ekipman 50 paskallık basınç farkını sağlayamadığında alternatif olarak tek nokta basınç farkı testi için kullanılabilir (Sherman ve Chan, 2004). Kanada standartlarında ise eşdeğer sızma alanı tanımında referans basınç olarak **10Pa** kullanılır, ancak normalde doğrudan bir akış hızı olarak kullanılmaz (Lawton, 2017).

4Pa, ELA, ASTM (E779-99) tanımında ve buna atıfta bulunan ASHRAE Standartlarında referans basınç olarak kullanılır. ELA, belirtilen referans basınçta aynı akış hızına sahip olacak alan (birim boşaltma katsayısı) olarak tanımlanabilir (Denklem 2.3). 4Pa, hava kaynaklı basıncın temsili olarak referans basınç olarak seçilir (Sherman ve Chan, 2004).

$$Q = ELA \cdot \sqrt{\frac{2P\gamma}{\rho}} \quad \text{Denklem (2.3)}$$

1Pa, literatürde kullanılan referans basınçların en düşüğüdür. Bu basınçta güç kanunu katsayısı akış hızına eşittir (Sherman ve Chan, 2004).

2.2. Uluslararası ve Ulusal Sızdırmazlık Standartları

Bina sızdırmazlık değerlerinin saptanmasına ilişkin test prosedürleri çeşitli yönetmelik ve standartlarla belirlenmiştir. Bu alt bölümde kısaca standartlara ait değerlendirme ölçütleri, test prosedürleri, basınçlandırma kriterleri, test hazırlık uygulama sürecine ait detaylar ve test doğruluk düzeylerinin değerlendirilmesine yönelik yöntemler özetlenecektir. Bu alt bölüm özellikle yöntem kurgusunun oluşturulması bakımından önem taşımaktadır. İrdelenecek standartlar sırasıyla:

1. Chapter Eight RESNET (Residential Energy Services Network), “*800 RESNET Standard for Performance Testing and Work Scope: Enclosure and air distribution leakage testing* (Performans Testi ve Çalışma Kapsamı: Yapı Kabuğu ve hava dağıtım sistemleri sızma testi)” Standardı (2013).
2. Air Barrier Association of America (ABAA) “Standard Method for Building Enclosure Airtightness Compliance Testing (Yapı Kabuğu Sızdırmazlık Uygunluk Testi için Standart Yöntem)” Standardı (2016).
3. American Society for Testing and Materials (ASTM) tarafından hazırlanmış olan E779 “*Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization* - Fan Basınçlandırma yoluyla Hava Kaçış Oranının Belirlenmesi İçin Standart Test Yöntemi” (2003).
4. American Society for Testing and Materials (ASTM) tarafından hazırlanmış E1827 “*Standard Test Method for Determining Airtightness of Buildings Using an Orifice Blower Door* - Orifis Blower Door Kullanarak Binaların Hava Sızdırmazlığının Belirlenmesi İçin Standart Test Yöntemi” (2007).
5. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers tarafından hazırlanmış olan “ASHRAE 1478 RP: *Measuring air-tightness of mid and high-rise non-residential buildings* - Orta ve yüksek katlı konut dışı binaların hava sızdırmazlığının ölçülmesi” (2013).
6. “ISO 9972 *Thermal performance of buildings — Determination of air permeability of buildings — Fan pressurization method* — Binaların ısı performans — Binaların hava geçirgenliğinin saptanması — Fan basınçlandırma yöntemi” (2006)

Chapter Eight RESNET Standardı (2013), üç ya da daha az katlı konut ya da ticari binalarda yapı kabuğundaki hava kaçaklarının, ısıtma soğutma havalandırma sistemlerine ilişkin kanallardaki kaçakların ve havalandırma sistemlerine ait hava akışlarının ölçülmesine ilişkin yaklaşımları adımlar halinde tariflemektedir. Bu standarda göre, yapı kabuğu sızdırmazlığı m³ cinsinden 50 Pa basınç farkı (CFM50 /ACH50) üzerinden tespit edilmelidir. Chapter Eight RESNET Standardına göre (2013), binada gerçekleştirilecek test pozitif (basınçlandırma – *pressurization*) ya da negatif (basıncısızlaştırma – *depressurization*) basınç uygulayarak gerçekleştirilebilir. Bu standart yapı kabuğunun test edilmesi öncesindeki hazırlık aşamaları ve test süresince sağlanması gereken koşulları şu şekilde tanımlamaktadır:

- İklimlendirilen alanın tanımlayan yüzeylerdeki tüm kapı ve pencereler kapatılmalı ve kilitlenmelidir.
- Bağlantılı garaj hacimlerindeki tüm dış kapı ve pencereler kapatılmalı ve kilitlenmelidir.
- İklimlendirilen alanda kalan bodrum / döşeme altı boşlukları bulunuyorsa iç mekandan erişimi sağlayan kapı ya da kapaklar açılmalı ancak bu hacimlerin tüm dış kapı ve pencereleri kapatılmalı ve kilitlenmelidir. İklimlendirilmeyen alanda kalan bodrum / döşeme altı boşlukları bulunuyorsa iç mekandan erişimi sağlayan kapı ya da kapaklar kapatılmalı ve kilitlenmelidir.
- İklimlendirilen alanda kalan çatı arası bulunuyorsa iç mekandan erişimi sağlayan kapı ya da kapaklar açılmalı ancak bu hacimlerin tüm dış kapı ve pencereleri kapatılmalı ve kilitlenmelidir. İklimlendirilmeyen alanda kalan çatı arası bulunuyorsa iç mekandan erişimi sağlayan kapı ya da kapaklar kapatılmalı ve kilitlenmelidir.
- İç mekan kapıları iklimlendirilen alanın tümü için açık tutulmalıdır.
- Katı yakıtlı cihazlara ait bacalar ve yanma havası girişleri kapatılmalı, ölçüm esnasında kül veya isin eve girmesini önlemek için önlem alınmalıdır.
- Isıtma sistemi baca gazı havalandırma delikleri ve cihaz kapalı durumda bırakılmalıdır.
- Binada hava akışını tetikleyebilen herhangi bir fan (banyo, mutfak egzoz fanları vb.) veya cihaz (aspiratör, kurutma makinesi vb.) kapatılmalıdır.

- Sürekli çalışan havalandırma sistemleri kapatılmalı ilgili açıklıklar dış mekandan sızdırmaz hale getirilmelidir.
- İklimlendirilmiş alan ve dış mekan arasındaki motorsuz havalandırma kapakları olduğu gibi bırakılmalıdır ve indüklenmiş test basıncıyla açıldığı ya da kapandığı gözlenirse bu durum test raporunda bildirilmelidir.
- İklimlendirilmiş alan ve dış mekan arasındaki motorlu havalandırma kapakları kapalı konuma getirilmeli ve sızdırmaz hale getirilmemelidir.
- İklimlendirilmiş alan ve dış mekan arasındaki kapaksız ya da sabit kapaklı kasıtlı açıklıklar mevcut veya kapalı pozisyonda bırakılmalıdır.
- Tüm bina fan panjurları kapatılmalı, mevsimsel örtme aparatları varsa takılmalıdır.
- Evaporatif soğutma sistemlerinin dışa açılan çıkışları kapalı konumuna getirilmeli, mevsimsel örtme aparatları varsa takılmalıdır.
- Pencere damlama delikleri ve duvarda gözlenen diğer delikler kapatılmalıdır.
- Tedarik ve geri dönüş ızgaraları açık ve örtülmemiş olarak bırakılmalıdır.
- S borusu bulunan sıhhi tesisat giderleri sızdırmaz hale getirilmeli veya su ile doldurulmalıdır.
- Tüm yanma cihazları test süresince kapalı tutulmalıdır.

Chapter Eight RESNET Standardı (2013) iki farklı test doğruluk düzeyini kabul etmekte ve bu doğruluk düzeylerinin test sonuçlarının raporlanmasında belirtilmesi gerektiğini ifade etmektedir: (1) Standart doğruluk düzeyi: performans standartları ya da simülasyonlarında kullanılabilecek düzeydeki doğruluğa karşılık gelir ve olumsuz test koşulları (yüksek rüzgâr hızı, çok düşük sızdırmazlık seviyelerine sahip yapı kabuğu, yüksek basınç referans değeri (baseline) düzeltmeleri vb.) gerçekleşmediği sürece elde edilebilen bir doğruluk düzeyidir. (2) İndirgenmiş doğruluk düzeyi: olumsuz test koşulları altında kullanılabilen doğruluk düzeyidir. Test sürecine ilişkin zaman ve maliyet kısıtlarının olması halinde kabul edilebilir ancak sonuçlara belirsizlik düzeyi eklenmelidir. Test ekipmanının kurulum ve kullanımına ilişkin olarak üretici firmanın direktiflerinin uygulanması, iç ve dış sıcaklık verilerinin izlenmesi, rakım bilgisinin kaydedilmesi, ACH50 hesaplaması için iklimlendirilen hacim bilgisinin kayıt altına alınması ile ilgili gerekliliklerin altı çizilmektedir (Chapter Eight RESNET, 2013).

Chapter Eight RESNET Standardı (2013) yapı kabuğu sızdırmazlık değerlerinin saptanmasına ilişkin için üç farklı ölçüm prosedürü önermektedir (Çizelge 2.1). Bu ölçüm prosedürleri (1) Tek-nokta testi, (2) Çoklu-nokta testi ve (3) Tekrarlı tek nokta testidir. Tek-nokta testi hava kaçaklarının tek basınç farkı altında ölçülmesine odaklanan test yöntemidir. Tek nokta testi prosedürüne ilişkin temel yaklaşım Çizelge 2.1’de aktarılmaktadır. Özetle, tek-nokta testi uygulanırken;

- 10 saniye boyunca en az 5 adet bağımsız “*referans değer (baseline)*” okuması yapılmalı ve ortalaması alınmalıdır. İç mekânın dış mekâna kıyasla referans değer basınç okumaları ortalaması 0.1Pa çözünürlüğünde olmalıdır.
- Kaydedilen bağımsız referans değerlerinin en küçüğü en büyüğünden çıkarılarak “*referans değer (baseline) aralığı*” belirlenmelidir.
- İndüklenmiş bina basıncı uygulaması için referans değerle düzeltilmeksizin üst sınır olarak 50 Pa, alt sınır olarak 15 Pa test edilmelidir. 50Pa basınç elde edilemediğinde mümkün olan en yüksek basınç indüklenmelidir, 15 Pa indüklenmiş bina basıncı elde edilemiyorsa çok-noktalı test yapılması ve çoklu fan basınçlandırma ekipmanı kullanılması gerekmektedir.
- Uygulanacak indüklenmiş basınç değerinden (50Pa) “*test öncesi referans değer bina basıncı*” (*pre-test baseline building pressure*) çıkarılmalıdır.
- Nominal CFM50 referans değerle düzeltilmiş 50Pa basınç farkıdır. Düzeltilmiş CFM50 ise nominal CFM50’nin rakım düzeltme faktörü ve sıcaklık düzeltme faktörü ile çarpılması sonucunda elde edilen sonuç değeridir (Düzeltilme faktörleri Chapter Eight RESNET (2013) Standardındaki 802.1 no’lu tabloda verilmiştir).
- Test doğruluk düzeyi tek-nokta testi için *referans değer (baseline) aralığı* 5.0Pa’dan küçük olduğunda standart doğruluk düzeyi üzerinden, 10.0Pa ile 5.0Pa arasında olduğunda indirgenmiş doğruluk düzeyi üzerinden tanımlanmaktadır.

Çoklu-nokta testi: Hava kaçaklarının çoklu indüklenen basınç farkları altında ölçülmesine odaklanan test yöntemidir. Çoklu-nokta testi prosedürüne ilişkin temel yaklaşım Çizelge 2.3’te aktarılmaktadır. Çoklu-nokta testi uygulanırken;

- Test öncesi referans değer (baseline) kaydının alınması gerekmekte ve bu kaydın en az 10 saniye boyunca 0.1Pa çözünürlüğünde alınması gerekmektedir.

- İndüklenmiş bina basıncı uygulamasından önce üst sınır için 60 Pa, alt sınır için 4 Pa test edilmelidir. 60Pa indüklenmiş basınç elde edilemediğinde mümkün olan en yüksek basınç indüklenmelidir. 4Pa değerine sızdırmazlığı çok düşük binalarda inilebilmekte olup 4Pa sağlanamadığında 15Pa alt sınır kabul edilmelidir.
- İndüklenmiş bina basınç ölçümlerinde, hedeflenen indüklenmiş basınç için yaklaşık eşit aralıklarda tanımlanmış, en az 7 farklı düzeltilmemiş ölçüm alınmalıdır (çözünürlük 01Pa). Örneğin; 50Pa, 45Pa, 40Pa, 35Pa, 30Pa, 25Pa, 20Pa, 15Pa.
- Test sonrası referans değer (baseline) kaydı en az 10 saniye boyunca 0.1Pa çözünürlüğünde alınmalıdır.
- Test sonuçları ilgili yazılımlara aktarılarak düzeltilmiş CFM50 için %95 düven aralığında korelasyon değeri hesaplanmalıdır.
- Test doğruluk düzeylerinin saptanmasında düzeltilmiş CFM50 için hata payı %10,0'dan düşük ise standart doğruluk düzeyi, %10,0'dan büyük ise indirgenmiş doğruluk düzeyi kabul edilmelidir.

Tekrarlı tek-nokta testi ise tek-nokta testinin doğruluk ve belirsizliği azaltabilmek amacıyla birden fazla kez yapılması yoluyla hava kaçaklarının tespit edilmesine odaklanmaktadır (Çizelge 2.3, Chapter Eight RESNET, 2013). Chapter Eight RESNET Standardı (2013) ayrıca indirgenmiş doğruluk düzeyinde elde edilmiş CFM50 sonuçlarının hesaplanması için aşağıdaki yöntemi önermektedir:

$$\text{düzenlenmiş CFM50} = \text{genişletme faktörü} \times \text{düzeltilmiş CFM} \quad \text{Denklem (2.4)}$$

Burada,

$$\begin{aligned} \text{tek nokta testi için genişletme faktörü} &= 1 + 0.1 \times \left(\frac{50}{\text{indüklenmiş basınç}} \right), \\ \text{çoklu nokta testi için ise genişletme faktörü} &= 1 + \left(\frac{\% \text{ belirsizlik}}{100} \right). \end{aligned}$$

Düzenlenmiş CFM50 değeri bir binanın sızdırmazlık standartlarına uyup uymadığını saptamada, enerji performans standartlarına uygunluğun değerlendirilmesinde kullanılabilirken, iyileştirmeye bağlı enerji tasarruflarının hesaplanmasında, enerji performans belirlemede, bir grup binanın birbirine kıyasla sızdırmazlık değerlerinin karşılaştırılmasında kullanılamamaktadır (Chapter Eight RESNET, 2013).

Çizelge 2.3. Chapter Eight RESNET standardı tarafından tanımlanan test prosedürleri.

Chapter Eight RESNET Test Prosedürleri						
Tek-nokta testi	Test öncesi referans değer (baseline) okuması	Referans değer (baseline) aralığı	Test doğruluk düzeyi	İndüklenmiş bina basıncının test edilmesi (düzeltilmemiş)	İndüklenmiş basınç (düzeltilmiş)	Nominal ve Düzeltilmiş CFM50
	En az 10 saniye süresince 5 bağımsız referans değer okuması yapılmalı ve ortalama alınmalıdır. Ortalama değer 0.1Pa çözünürlüğünde olmalıdır.	Kaydedilen bağımsız referans değerlerinin en küçüğü en büyüğünden çıkarılarak referans değer (baseline) aralığı belirlenmelidir	<i>referans değer (baseline) aralığı</i> < 5.0Pa = Standart doğruluk düzeyi <i>10.0Pa</i> < <i>referans değer (baseline) aralığı</i> < 5.0Pa = İndirgenmiş doğruluk düzeyi	Üst sınır için 50 Pa test edilmelidir*. Alt sınır için 15 Pa test edilmelidir**.	Uygulanacak indüklenmiş basınçtan “test öncesi referans değer binna basıncı” çıkarılmalıdır (<i>pre-test baseline building pressure</i>).	Nominal CFM50 referans değerle düzeltilmiş 50Pa basınç farkıdır. Düzeltilmiş CFM50= Nominal CFM50xrakım düzeltme faktörü x sıcaklık düzeltme faktörü
Çoklu-nokta testi	Test öncesi referans değer (baseline) kaydı	Referans değer (baseline) aralığı	Test doğruluk düzeyi	İndüklenmiş bina basıncının test edilmesi (düzeltilmemiş)	Test sonrası referans değer (baseline) okuması	Nominal ve Düzeltilmiş CFM50
	En az 10 saniye boyunca 0.1Pa çözünürlüğünde test öncesi referans değer (baseline) kaydı alınmalıdır		Düzeltilmiş CFM50≤ %10.0 = Standart doğruluk düzeyi Düzeltilmiş CFM50 > %10.0 = İndirgenmiş doğruluk düzeyi	Üst sınır için 60 Pa test edilmelidir†. Alt sınır için 4 Pa test edilmelidir††. Yaklaşık eşit aralıklarda tanımlanmış hedeflenen indüklenmiş basınç için en az 7 farklı düzeltilmemiş bina basınç ölçümü alınmalıdır (çözünürlük 01Pa).	En az 10 saniye boyunca 0.1Pa çözünürlüğünde test sonrası referans değer (baseline) kaydı alınmalıdır.	Yazılıma aktararak Düzeltilmiş CFM50 %95 düven aralığında hesaplanmalıdır.
Tekrarlı tek-nokta testi	Tek-nokta testi aşamaları 5 kez Nominal CFM50 elde edecek şekilde tekrarlanmalı. Ortalama Nominal CFM50 hesaplanmalıdır.					

*50Pa basınç elde edilemediğinde mümkün olan en yüksek basınç indüklenmelidir.

**En az 15 Pa indüklenmiş bina basıncı elde edilemiyorsa çok-noktalı test yapılmalı ve çoklu fan basınçlandırma ekipmanı kullanılması gerekmektedir.

† 60Pa indüklenmiş basınç elde edilemediğinde mümkün olan en yüksek basınç indüklenmelidir.

†† 4Pa değerine sızdırmazlığı çok düşük binalarda inilebilmektedir. 4Pa sağlanamadığında 15Pa alt sınır kabul edilmektedir.

Standart, Efektif Sızma Alanı (ELA)'nın hesaplanmasında Denklem 2.5'in kullanılmasını önermektedir ve bu formülde ELA İngiliz birimi (sq. inch) olarak alınmalıdır:

$$ELA = 0.055 \times CFM50 \quad \text{Denklem (2.5)}$$

ACH50 ise Denklem 2.3'e göre;

$$ACH50 = \frac{\text{düzeltilmiş } CFM50 \times 60}{\text{bina hacmi (birim} = f^3)} \quad \text{Denklem (2.6)}$$

Spesifik Sızma Alanı (SLA) Denklem 2.4'e göre;

$$SLA = \frac{69,4 \times ELA (\text{birim} = \text{inch}^2)}{\text{bina kullanım alanı (birim} = f^2)} \quad \text{Denklem (2.7)}$$

Normalize Sızma Alanı (NLA) ise Denklem 2.5'e göre hesaplanmaktadır:

$$NLA = SLA \times (S)^{0.3} \quad \text{Denklem (2.8)}$$

Burada, S , zemin üzerindeki kat sayısıdır.

İncelenen standartlardan ikincisi olan **ABAA Standardı (2016)** ASTM standartlarını temel alan bir yaklaşım benimsemektedir. Standardın amacı fan basınçlandırma testlerine ilişkin nicel alan çalışması prosedürlerini ve sızdırmazlık hesaplama metodolojilerini belirlemektir. ABAA (2016) fan basınçlandırma testine ilişkin kriterler arasında basınç ölçüm cihazının 0.1Pa çözünürlüğünde, sıcaklık ölçümü yapılan cihazların ise $\pm 2^\circ\text{C}$ (4°F) doğruluk düzeyinde ölçüm yapması gerektiğini belirtmektedir. Bu standart test öncesi kişisel ekipman kullanımı, gürültü, elektrik ve güvenlik, yanıcı cihazların kontrolü gibi risklerin giderilmesine ilişkin çalışmaların yapılmasını önermektedir. Ayrıca, tüm bina ve/veya kısmi bina ölçümleri için ABAA Standardı (2016) bir test planı ve kompartıman ölçümleri için bir örnekleme prosedürü geliştirilmesini önermektedir. ABAA (2016), binada ölçüme ilişkin aşağıdaki koordinasyonun kurulmasını test sürecinin geçerliliği ve güvenliği bakımından;

- Testlerin en az kullanıcı yoğunluğunun olduğu hafta sonları, tatil günleri ya da mesai çıkış saatlerinde yürütülmesi ve tüm mekanların erişilebilir olduğundan emin olunması,
- Mekanlardaki motor, elektrikli fan, yanma sistemlerinin kapalı olduğundan emin olunması, tüm güvenlik protokollerinin kontrol edilmesi ve uygulanması ve binaya ilişkin tüm verilerin toplanması,
- Testin binanın tümünü ya da kısmi bölümlerini saptamasına ilişkin kararların verilmesi ve tekil-zon, birden fazla alt alanın tekil-zon olarak test edilmesi ya da izole edilmiş alt alanların bağımsız test edilmesi konusunda karar verilmesi,
- Isıl olarak ayrılmış mekanların test kapsamı ve test alanı dışında bırakılması ve ilişkili kapı ve pencerelerin Chapter Eight RESNET (2013) standardı tarafından da belirtildiği şekilde koşullandırılması gibi gereklilikleri önermektedir.

ABAA (2016) temelde üç test yöntemini kabul etmektedir (Çizelge 2.4): (1) çoklu nokta regresyon testi, (2) tekrarlı tek nokta testi ve (3) tekrarlı iki nokta testi. Her üç test yöntemi için, test öncesi en az 120 saniye süresince referans değer kaydı yapılması gerekmekte ve alınan referans değer alınan kayıtlarının zamansal ortalamasının geçerli olduğu ifade edilmektedir. Aynı zamanda bu standarda göre test öncesi iç ve dış sıcaklık ve rüzgâr hızı verileri kaydedilmelidir. Referans değer analizinde ise, 120 saniyelik kayıt süresinin 12 eşit uzunluklu zamansal birime bölünmesi ve her aralık için zamansal ortalamasının ve standart sapmanın hesaplanması gerektiği belirtilmektedir. Referans değer standart sapması, $STDev(P_{base,pre})$ izin verilen en az indüklenmiş yapı kabuğu basıncının hesaplanmasında kullanılmaktadır (Denklem 2.6 ve 2.7) (ABAA, 2016).

$$P_{induced,min} \geq \text{Max}(|P_{base,pre}| + 10 \times STDev(P_{base,pre}), P_{stack}/2, 10 \text{ Pa})$$

Denklem (2.9)

Burada,

$P_{induced,min}$ = testte kullanılan en düşük indüklenmiş basınç,

$P_{base,pre}$ = yapı kabuğu için test öncesi referans basınç değeri,

P_{stack} = Denklem ijk ile hesaplanan baca etkisi basıncıdır.

$$P_{stack} = \text{abs}(\rho_{out} - \rho_{in}) * g * h$$

Denklem (2.10)

Burada,

ρ_{out} = Dış hava yoğunluğu (kg/m³) ve

ρ_{in} = İç hava yoğunluğu (kg/m³) ASTM E779-2010'da denklem X1.2 ile tanımlandığı şekliyle hesaplanır,

g = yerçekimi ivmesi: 9,81 m/s²

h = bina yüksekliği (m), zemine oturma hattından en üst cephe kotuna kadar ölçülür.

ABAA (2016) detaylı veri analizinin ASTM E779'un belirlediği koşullarda gerçekleştirilmesi gerektiğini önermekte ve ağırlıklandırılmamış regresyon kullanılması gerektiğini belirtmektedir (Çizelge 2.4). Diğer yandan, temel test geçerlilik ve bina sızdırmazlık değerlendirme kriterleri şu şekildedir:

- Referans basıncı karşılamak için gereken hava akışı, belirlenen referans basıncının %90'ından azsa, binanın sızdırmazlık düzeyinin başarısız olduğu kabul edilir.
- Her test için hesaplanan akış üs değeri, n , 0,45'ten az ya da 1.05'ten büyük ise test geçersizdir. Bu değerin 0,5'ten küçük, 0,9'dan büyük olması halinde yapı kabuğunda ya da mekandaki istenen açıklıkların istem dışı açılıp kapanmış olma ihtimali değerlendirilmeli ve problem belirlendiğinde test tekrar edilmelidir.
- Korelasyon Katsayısı (r^2) 0,99'dan küçük ise test süreci ile ilgili bir sorun olduğu kabul edilmektedir. Test prosedürü ve yapı kabuğu kontrolünün yapılması ve testin tekrarlanması gerekmektedir.
- Test sonucu standartlarca belirlenen sızdırmazlık düzeylerinden büyükse binanın sızdırmazlık düzeyinin başarısız olduğu kabul edilir.
- Test sonucu standartlarca belirlenen sızdırmazlık düzeylerinden küçük ya da eşitse ve %95 güven aralığı sızdırmazlık düzeyinin %8'inden küçük ya da eşitse, binanın testi geçtiği kabul edilir.
- Test sonucu standartlarca belirlenen sızdırmazlık düzeylerinden küçük ya da eşitse ve %95 güven aralığı sızdırmazlık düzeyinin %8'inden büyük ise, binanın testi geçtiği kabul edilir.
- Test sonucu standartlarca belirlenen sızdırmazlık düzeylerinden küçük ya da eşitse ve %95 güven aralığı %8'den büyük ve tüm test sonuçlarının toplamı ve %95 güven aralığı sızdırmazlık spesifikasyonundan küçük veya eşitse, binanın testi geçtiği kabul edilir.

Çizelge 2.4. ABBA standardı tarafından tanımlanan test prosedürleri.

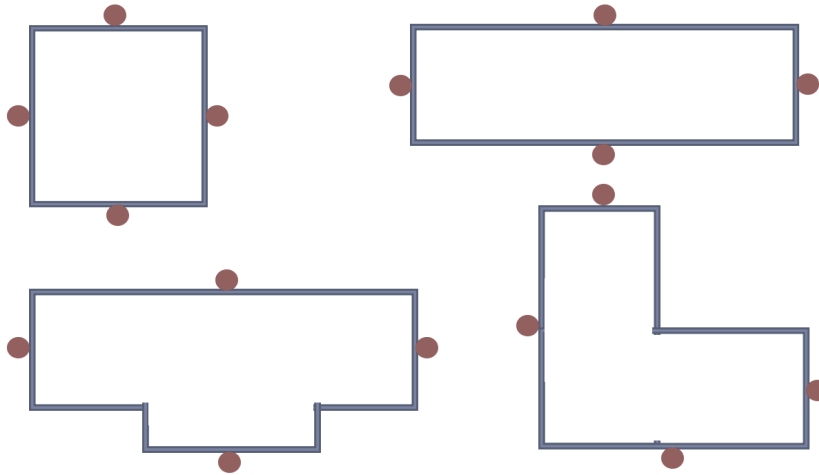
ABAA Standardı Test Prosedürleri						
	Test öncesi	İndüklenmiş bina basıncının test edilmesi (düzenlenmemiş)	Test sonrası	İndüklenmiş bina basıncının tekrar test edilmesi (düzenlenmemiş)	Veri Analizi	Değerlendirme
Çoklu nokta regresyon	En az 120 saniye süresince referans değer kaydı yapılmalıdır. Referans değer alınan kayıt değerlerin zamansal ortalaması olmalıdır. Test öncesi iç sıcaklık, dış sıcaklık ve rüzgâr hızı verileri kaydedilmelidir.	Yaklaşık eşit aralıklarda tanımlanmış indüklenmiş basınç için en az 10 farklı düzenlenmemiş kabuk basınç ölçümü alınmalıdır. Ölçüm süresi referans değer aralık süresinin iki katı olmalıdır. Üst ve alt sınır indüklenmiş basınç arasında en az 25Pa fark bulunmalıdır.	En az 120 saniye süresince referans değer kaydı yapılmalıdır. Referans değer alınan kayıt değerlerin zamansal ortalaması olmalıdır. Test sonrası iç sıcaklık, dış sıcaklık ve rüzgâr hızı verileri kaydedilmelidir.	Önceki test koşulları uygulanarak, ilk testte uygulanan basınçlandırma (pressurization) ya da basınçsızlaştırma (depressurization) testinin tersi tekrar edilmelidir.	ASTM E779'a uygun biçimde ağırlıklandırılmamış regresyon aracılığıyla analiz edilmelidir. Her test için akış üs değeri (flow exponent) hesaplanmalıdır: $n < 0.45$ ya da $n > 1.05$ ise geçersiz test. $r^2 < 0.99$ ise problemli test	test sonucu > sızdırmazlık limit değeri ise yapı kabuğu sızdırmaz değildir test sonucu $\leq$ sızdırmazlık limit değeri ise yapı kabuğu sızdırmaz değildir
Tekrarlı tek nokta testi	En az 120 saniye süresince referans değer kaydı yapılmalıdır. Referans değer alınan kayıt değerlerin zamansal ortalaması olmalıdır. Test öncesi iç sıcaklık, dış sıcaklık ve rüzgâr hızı verileri kaydedilmelidir.	Referans değer basıncı İndüklenmiş kabuk basıncının her uygulamasından önce test öncesi ve test sonrası referans değer kaydı tekrar edilmelidir.	İndüklenmiş bina basıncının test edilmesi (düzenlenmemiş) Belirlenmiş bir indüklenmiş basınç yoksa 75Pa kullanılmalıdır. (10Pa < P < 100Pa) Eşit aralıklarla en az 5 kez ölçüm tekrarlanmalıdır.	İndüklenmiş bina basıncının tekrar test edilmesi (düzenlenmemiş) Önceki test koşulları uygulanarak, ilk testte uygulanan basınçlandırma (pressurization) ya da basınçsızlaştırma (depressurization) testinin tersi tekrar edilmelidir.	Veri Analizi ASTM E1827'ye uygun biçimde analiz edilmelidir. Tekrarlı ölçümlerin ortalaması alınmalıdır.	Değerlendirme test sonucu > sızdırmazlık limit değeri ise yapı kabuğu sızdırmaz değildir test sonucu $\leq$ sızdırmazlık limit değeri ise yapı kabuğu sızdırmaz değildir

Çizelge 2.4. devam

ABAA Standardı Test Prosedürleri						
	Test öncesi	Referans değer basıncı	İndüklenmiş bina basıncının test edilmesi (düzenlenmemiş)	İndüklenmiş bina basıncının tekrar test edilmesi (düzenlenmemiş)	Veri Analizi	Değerlendirme
Tekrarlı iki nokta testi	En az 120 saniye süresince referans değer kaydı yapılmalıdır. Referans değer alınan kayıt değerlerin zamansal ortalaması olmalıdır. Test öncesi iç sıcaklık, dış sıcaklık ve rüzgâr hızı verileri kaydedilmelidir.	İndüklenmiş kabuk basıncının her uygulamasından önce test öncesi ve test sonrası referans değer kaydı tekrar edilmelidir.	P1 ve P2 basınçları için en az 5 tekrarlı ölçüm alınmalıdır. ($10Pa < P1$ & $P2 < 100Pa$)	Önceki test koşulları uygulanarak, il testte uygulanan basınçlandırma (pressurization) ya da basınçsızlaştırma (depressurization) testinin tersi tekrar edilmelidir.	ASTM E1827'ye uygun biçimde analiz edilmelidir. Tekrarlı ölçümlerin ortalaması alınmalıdır.	test sonucu > sızdırmazlık limit değeri ise yapı kabuğu sızdırmaz değildir test sonucu $\leq$ sızdırmazlık limit değeri ise yapı kabuğu sızdırmaz değildir

ABBA (2016) kesinlik ve sapma ve genel ölçüm belirsizlik düzeylerinin ASTM E779 ve ASTM E1827'ye uygun biçimde hesaplanması ve raporlanması gerektiğini belirtmektedir. Bu detaylar ilerleyen kısımda bu iki referansın irdelenmesi sürecinde aktarılacaktır.

American Society for Testing and Materials (ASTM) tarafından hazırlanmış olan **“Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization - Fan Basınçlandırma yoluyla Hava Kaçış Oranının Belirlenmesi İçin Standart Test Yöntemi”** isimli **ASTM E779 (2003)** kodlu standart, kontrollü basınçlandırma ve basınçsızlaştırma altında yapı kabuğundan hava kaçış oranını ölçmeye yönelik standartlaştırılmış bir yöntem belirlemektedir. Bu yöntem düşük iç-dış sıcaklık farklarında ve düşük rüzgâr basıncı durumlarında uygulanabilir nitelikte olup genellikle tek hacimli yapılar için uygundur, ancak birden fazla hacimden oluşan yapıların iç hacimleri arasındaki kapılar açık tutularak uygulanabilmektedir. Diğer standartlara benzer şekilde sınır koşullarının denetlenmesi ve teste uygun hale getirilmesi, uygun ekipman kullanımına yönelik önerileri içermektedir (ASTM E779, 2003). Diğer yandan yapı kabuğunun hangi noktalarından en etkin ölçümün alınabileceği de bu standart tarafından işaret edilmektedir (Şekil 2.6). Kesintisiz devam eden ve iç bükey olmayan cephe düzlemlerinde en etkin ölçüm yapı kabuğunun merkezine yakın bir noktadan alınabiliyorsa bu tercih edilmelidir.



Şekil 2.6. Yapı kabuğunda etkin ölçüm yapılabilecek noktaların plan düzleminde gösterimi (ASTM E779, 2003).

ASTM E779 (2003) tek bir test yöntemi önermektedir ve ilk iki standartta ele alınmış olan çoklu-nokta yöntemi ile benzer adım ve uygulamalar içermektedir. Çizelge 2.5'te

özetlendiği gibi, ASTM E779 (2003) test yöntemi test öncesi birtakım kontrollerin yapılmasını, bu kontrollerin sağlanamaması halinde testin gerçekleştirilmemesini önermektedir. Denetleme ve veri toplama dışında kalan test öncesi kontrol sürecinde iç ve dış sıcaklık farkının tespit edilmesine ilişkin hesaplama Denklem 2.11’de sunulmaktadır:

$$(T_{dış} - T_{iç}) \times h_{bina} < 200 \text{ m}^\circ\text{C} \quad \text{Denklem (2.11)}$$

Burada,

h_{bina} = zemin ile çatı kotu arasında kalan cephe yüksekliğini ifade etmektedir.

Bu kontrolün sağlanamadığı, yani iç ve dış sıcaklık farkının ya da cephe boyutlarının çok yüksek olduğu durumlarda indüklenen basınç farkı ile oluşacak baca etkisi (*stack effect*) çok büyük olacağı için testin uygulanmaması gerektiği belirtilmiştir. Diğer yandan, 0-2 m/s aralığındaki rüzgâr hızı ve 5-35°C aralığındaki dış sıcaklık değerlerinin uygun ölçüm koşulları sağladığı ASTM E779 (2003) tarafından ifade edilmektedir.

ASTM E779 (2003) referans değer kaydı için “sıfır akış basıncı” ifadesini kullanmakta ve sadece test öncesi belirli bir süreyle alınması ve ortalama referans değerinden indüklenmiş basınç uygulamalarından bir düzeltme faktörü olarak çıkarılması gerektiğini ifade etmektedir (Çizelge 2.5).

Ek olarak, ASTM E779 (2003) ölçüm raporlamasına ilişkin olarak şu bilgilerin belirtilmesi gerektiğinin altını çizmektedir: (a) binaya ait tanımlamalar: konum, rakım, (b) bina özellikleri: yapım sistemi, yapım yılı, mekanların taban alanı ve hacimleri, (c) açıklıkların özellikleri, (d) ısıtma soğutma havalandırma sistemlerine ait özellikler, (e) test prosedürü: kullanılan ekipmana ait bilgiler, (f) ölçüm verileri ve (g) hesaplamalar: hava akış katsayısı – basınçlandırma ve basınçsızlaştırma için, efektif sızma alanı – ELA, güven aralıkları.

Çizelge 2.5. ASTM E779 standardı tarafından tanımlanan test prosedürü

ASTM E779 Standardı Test Prosedürü				
Test öncesi kontroller	Test öncesi <i>referans değer</i> kaydı	İndüklenmiş bina basıncının uygulanması	Veri Analizi	Değerlendirme
Genel gözlem (yapı kabuğu elemanlarının etüdü) $(T_{dış} - T_{iç}) \times h_{bina}$ değerinin $200 \text{ m}^{\circ}\text{C}$ düzeyinden düşük olduğuna dair kontrollerin yapılması Rüzgâr hızı kontrolü: $0-2 \text{ m/s}$ Dış sıcaklık sınır değerleri: $5 - 35^{\circ}\text{C}$ Binanın denizden yüksekliği saptanmalıdır	Sıfır akış basıncı olarak da tanımlanan <i>referans değer kaydı</i> fan açıklığı kapalıyken alınmalı ve basınçlandırma ve basınçsızlaştırma ölçümlerinde uygulanacak indüklenmiş basınçlardan çıkarılmalıdır.	İndüklenen basınç farkları, kullanılan cihazın kapasitesine bağlı olarak, 10 ila 60 Pa aralığında olmalıdır. Yüksek basınç elde edilemediği durumlarda en az 5 farklı basınç farkına ait veri elde edilebildiğinden emin olunmalıdır. İndüklenen basınç farkları, çoklu nokta okumaları için 5 ya da 10 Pa aralıklarında düzenlenmelidir. Her basınç farkı için hava akış oranı ve yapı kabuğunu etkileyen basınç farkı kaydedilmelidir. Her test için hem basınçlandırma ve basınçsızlaştırma verisi toplanmalıdır.	Ağırlıklandırılmamış regresyon aracılığıyla analiz edilmelidir. Her test için akış üs değeri (flow exponent) hesaplanmalıdır: $n < 0.5$ ya da $n > 1.00$ ise geçersiz test. $r^2 < 0.99$ ise problemli test.	test sonucu $>$ sızdırmazlık limit değeri ise yapı kabuğu sızdırmaz değildir test sonucu $\leq$ sızdırmazlık limit değeri ise yapı kabuğu sızdırmaz değildir

American Society for Testing and Materials (ASTM) tarafından hazırlanmış bir diğer standart “*Standard Test Method for Determining Airtightness of Buildings Using an Orifice Blower Door - Orifis Blower Door Kullanarak Binaların Hava Sızdırmazlığının Belirlenmesi İçin Standart Test Yöntemi*” isimli *ASTM E1827 (2007)* kodlu standarttır. ASTM E779’a benzer şekilde kontrollü basınçlandırma ve basınçsızlaştırma altında yapı kabuğundan hava kaçış oranını ölçmeye yönelik iki farklı yöntem önermektedir. Bu yöntemlerin her ikisi de binayı tek bir hacim olarak ölçebilmeye yöneliktir. Her iki yöntem de bir blower door kullanarak yapı kabuğu boyunca basınç farklarının indüklenmesine ve indüklenen basınç farklarına bağlı olarak ortaya çıkan hava akışlarını ölçmeye odaklanmaktadır. Basınç farkı ölçümleri ve hava akış oranları bina sızdırmazlığını belirlemek için kullanılmaktadır. Bu yöntemler düşük iç-dış sıcaklık ve düşük rüzgâr basıncı

altında uygulanabilmektedir ve ölçüm belirsizliği bu değerlerdeki artışlara bağlı olarak artmaktadır (ASTM E1827, 2007).

Bir yapı kabuğunun sızdırmazlık özellikleri, basınç farkları ile ortaya çıkan hava akış oranlarındaki ilişki üzerinden değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, ASTM E1827 (2007) tarafından tanımlanan test yöntemleri, bir binanın mekanik olarak basınçsızlaştırılmasında veya basınçlandırılmasında kullanılan bir veya daha fazla fan basınçlandırma ekipmanından hava akış hızı ölçümleri yapılmasına dayanmaktadır. Bu standart kapsamında, tek-nokta ve iki-nokta testi olmak üzere iki alternatif ölçüm ve analiz prosedürü tanımlanmıştır (Çizelge 2.6).

ASTM E1827 (2007) tarafından tanımlanan tek-nokta testi $P_1=50$ Pa basınç farkında çoklu akış ölçümleri yaparak ve akış üs değerini $n=0,65$ olarak kabul ederek yapı kabuğundan hava akış oranlarının tahmin edilmesini sağlamaktadır. İki-nokta testi ise bina akış katsayısının ve hava akış üs değerinin tahminine izin verecek biçimde $P_1=50$ Pa ve $P_2 = 12,5$ Pa basınç farklarının uygulanması ve çoklu akış ölçümlerinin yapılması yoluyla yapı kabuğundan hava akış oranlarının tahmin edilmesini sağlamaktadır (Çizelge 2.6).

ASTM E1827 (2007) ölçüm ve hesaplama metodolojisini büyük ölçüde ASTM E779'a (2003) dayandırmaktadır. ASTM E1827'in (2007) ASTM E779'e (2003) kıyasla temel farkı orifis adı verilen kesiti daraltılmış fan kullanılarak basınçlandırma ölçümlerinin yapılması ve daha küçük hacimli/tekil hacimli binaların ölçümünde kullanılmasıdır.

Çizelge 2.6. ASTM E1827 standardı tarafından tanımlanan test prosedürü

ASTM E1827 Standardı Test Prosedürleri		
	Test öncesi kontroller	Test koşulları
Tek-nokta testi	Genel gözlem (yapı kabuğu elemanlarının etüdü) Test ekipmanının kurulması: Fanın basınçsızlaştırma veya basınçlandırma için uygun şekilde yönlendirilmesi (basınçsızlaştırma: içe bakan şekilde, basınçlandırma: dışa bakan şekilde)	$P_1=50$ Pa basınç farkında çoklu akış ölçümleri yapılmalıdır. Akış üs değerini $n=0,65$ olarak kabul edilmelidir.
İki-nokta testi	Basınç sensörlerinin sıfırlanması: İç-dış basınç sensörü portlarının birbirine bağlanması ve basınç farkı sensörünün sıfırlanması. Basınç farkının belirlenmesi: Fan basınçlandırma test ekipmanında uygulanacak her ölçümden önce ve sonra, fan açıklığı kapatılarak sıfır hava akışında iç-dış basınç farkı Pa cinsinden ölçülür ve kaydedilir (<i>referans değer</i>).	$P_1=50$ Pa ve $P_2=12,5$ Pa basınç farkları uygulanarak çoklu akış ölçümleri yapılmalıdır. Bina akış katsayısının ve hava akış üs değeri hesaplanmalıdır.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers tarafından hazırlanmış olan **“ASHRAE 1478 RP: Measuring air-tightness of mid and high-rise non-residential buildings- Orta ve yüksek katlı konut dışı binaların hava sızdırmazlığının ölçülmesi” (2013)** standardı da ASTM E1827’ye (2007) benzer şekilde ölçüm ve hesaplama metodolojisini ASTM E779’a (2003) dayandırmaktadır. ASHRAE 1478 RP’ye göre (2013) tekil bir konutun sızdırmazlık testlerinin yürütülmesi ile karmaşık detay ve mekanik sistemlere sahip konut dışı binaları test edilmesi arasında belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Bu bağlamda, ASTM E779’dan (2003) farklı olarak, az katlı küçük konutlarda kullanılan test basıncı olan 50Pa yerine 75Pa basınçta testlerin yürütülmesi gerektiğinin ve binanın hava basıncı sınırlarını belirlemede mekanik, elektrik ve jeneratör odaları gibi binanın doğrudan dışarıdan havalandırılan mekanlar olarak kabul edilmesi ve sızdırmazlık ölçüm sınırlarının içinde ele alınmaması gerektiğinin altını çizmektedir (ASHRAE 1478 RP, 2013).

Son olarak ele alınan standart **“International Standard – ISO 9972 Thermal performance of buildings — Determination of air permeability of buildings — Fan pressurization method - Binaların ısı performans - Binaların hava geçirgenliğinin saptanması - Fan basınçlandırma yöntemi” (2006)** isimli ISO standardıdır. Bu standart kapsamında fan basınçlandırma yöntemi kullanılarak (a) tüm binanın ya da binanın bir kısmının hava geçirgenliğini ölçmek ve sızdırmazlık spesifikasyonuna uygunluğunu saptamak, b) benzer binaların veya bina alt bölümlerinin bağıl hava geçirgenliğini karşılaştırmak, c) hava akış noktalarını belirlemek, d) uygulanacak iyileştirmelerin sızdırmazlık değerlerindeki etkisini değerlendirmek gibi amaçlarla kullanılmaktadır (ISO 9972, 2006).

Diğer standartlara benzer olarak ISO 9972 (2006) yapı kabuğundan hava kaçışının ölçümü için bir binanın veya binanın bir bölümünün basınçsızlaştırılması veya basınçlandırılması gerektiğinin altını çizmektedir. Ölçüm prosedürlerinin doğruluğunun büyük ölçüde kullanılan ekipmana ve verilerin alındığı ortam koşullarına bağlı olduğu ifade edilmektedir (ISO 9972, 2006). Genel olarak, basınçsızlaştırma testlerine ait ölçüm sonuçlarının basınçlandırma sonuçlarına kıyasla daha yüksek olduğu, bu durumun sızdırmazlığı yüksek binalarda hemen hemen eşit olduğu da ISO 9972 (2006) tarafından ifade edilmektedir.

ISO 9972 (2006) bir binada yapılacak ölçüme ait kapsamın belirlenmesi konusunda da belirli tanımlar yapmaktadır. Bu bağlamda, (a) tüm bina ölçümlerinin şartlandırılmış tüm alanları içermesi gerektiği, kısmi ölçümlerde ise tekrar eden (apartman dairesi gibi) mekanların tekil olarak ele alınabileceğini ancak sonuçların yorumlanmasında ölçülen hava akışının içerisinde binanın bitişik bölümleri ile gerçekleşen akışların da olabileceğinin dikkate alınması gerektiği ifade edilmektedir.

ASTM E779 (2003) tarafından test öncesi kontrol sürecinde iç ve dış sıcaklık farkının tespit edilmesi gerekliliği ve koşulların Denklem 2.11’de belirtildiği şekilde kontrol edilmesi gerektiği ifade edilmiştir. ISO 9972 de (2006) benzer bir kriter ortaya koymaktadır: iç/dış sıcaklık farkının ($^{\circ}\text{K}$) tüm binanın veya ölçülen bölümünün metre cinsinden ifade edilen yüksekliği ile çarpımının $250 \text{ m}^{\circ}\text{K}$ ’den büyük olması halinde ölçüme uygun sıfır akışlı basınç farkı elde edilmesi mümkün olmayacağı belirtilmektedir. Yine ASTM E779’a (2003) benzer şekilde rüzgâr hızına dair limit değerlerin de belirlendiği görülmektedir: yere yakın rüzgâr hızının 3 m/s ’yi aşması, meteorolojik rüzgâr hızının 6 m/s ’yi aşması ya da Beaufort ölçeğinde 3’e ulaşması halinde ölçüme uygun sıfır akış basınç farkının elde edilmesi olası değildir.

ISO 9972 (2006) tek bir ölçüm yöntemi önermektedir ve bu ölçüm yöntemi diğer standartlarda da ifade edilen çoklu-nokta test adımları ile benzerlikler içermektedir. Ölçüm aşamasının başlangıcından itibaren yürütülmesi gereken adımlar Çizelge 2.7’de özetlenmektedir. Binada yürütülecek ölçüm sürecinden önce tamamlanması gereken kontrollere ilişkin yönergeler diğer standartlarla benzerlikler taşımaktadır ancak ISO 9972 (2006) farklı olarak geniş akış alanları (örn., yapı kabuğundaki büyük çatlaklar) ve geçici olarak kapatılmış açıklıklarda (örn., havalandırma menfezleri) sorun olup olmadığını saptamak için test sürecinde kullanılacak en yüksek basınç farkıyla tüm bina kabuğunun ön kontrolü yapılması gerektiğini, bu tür akış alanları ya da kapatma problemlerinin tespit edilmesi halinde not edilmesi ve düzeltilmesi gerektiğini ifade etmektedir.

Çizelge 2.7. ISO 9972 Standardı tarafından tanımlanan test prosedürü

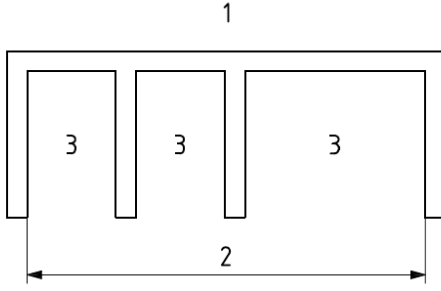
ISO 9972 Standardı Test Prosedürü						
	Test öncesi kontroller	Sıfır akış basınç farkının değerlendirilmesi (<i>referans değer - test öncesi</i>)	İndüklenmiş bina basınç farklarının test edilmesi	Sıfır akış basınç farkının değerlendirilmesi (<i>referans değer - test sonrası</i>)	Veri Analizi	Değerlendirme
Çoklu-nokta testi	Geniş akış alanları ve geçici kapatılmış açıklıklarda sorun olup olmadığını saptamak için test sürecinde kullanılacak en yüksek basınç farkıyla tüm bina kabuğunun ön kontrolü yapılmalıdır. Bu tür sızınma alanları ya da kapatma problemlerinin tespit edilmesi halinde not edilmesi ve düzeltilmesi önem taşımaktadır.	En az 30 saniye süreyle sıfır akış basınç farkı pozitif değerleri kaydedilmeli ve ortalaması alınmalıdır.	Yaklaşık 10Pa farkla artan bir dizi indüklenmiş basınç farkı üzerinden hava akış hızı ve iç-dış basınç farkı ölçümleri alınarak gerçekleştirilir.	Sıfır akış basınç farkının değerlendirilmesi (<i>referans değer</i>) test sonrasında tekrar yapılmalıdır.	Hacim, toplam yapı kabuğu alanı, duvar ve çatı alanı, net zemin alanı gibi değerler raporlanmalıdır.	test sonucu > sızdırmazlık limit değeri ise yapı kabuğu sızdırmaz değildir test sonucu ≤ sızdırmazlık limit değeri ise yapı kabuğu sızdırmaz değildir
	Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme bileşenlerinin kapalı olması gerekmektedir.	Sıfır akışlı basınç farkı ortalama değerlerinden herhangi biri 5 Pa 'dan büyükse test yapılmamalıdır.	İndüklenmiş en düşük basınç farkı 10Pa ya da sıfır akış basınç farkı ortalamasının (pozitif veya negatif ortalamalardan büyük olanın) beş katı olmalıdır.	Sıfır akış basınç farkı 5Pa 'dan büyükse, testin geçerli olmadığı beyan edilmelidir.	Hava akış oranı hesaplanmalıdır.	
	Sıhhi tesisat sistemlerindeki çıkışların dolu veya kapalı olduğu kontrol edilmelidir.	5Pa 'dan az ise tüm sıfır akışlı basınç farkı değerlerinin ortalamasını referans değer olarak kabul edilmelidir.	İndüklenmiş en yüksek basınç farkı, (a) tekil konutlar ve küçük binalar için en az 50Pa , (b) büyük binalar için 50Pa elde edilemiyorsa elde edilebilecek en yüksek basınçla test gerçekleştirilebilir.	Böyle bir test için bir test raporu düzenlenecekse gerekli test koşullarının sağlanmadığı belirtilmelidir.	Referans basınç farkında hava değişim oranı hesaplanmalıdır.	
	Hava yoğunluğunu belirlemede kullanılan hava akış hızı ölçümünü düzeltmek amacıyla test öncesi, sırası ve sonrasında bina iç sıcaklık ve dış sıcaklık değerleri, ayrıca rüzgâr hızı kaydedilmelidir.				Spesifik akış oranı ve alanı hesaplanmalıdır.	

Referans basınç değerinin saptanması için belirlenen yöntem sıfır akış basınç farkının değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Fan kapalı durumdayken ölçüm yapılarak en az 30 saniye süreyle sıfır akış basınç farkı pozitif değerleri kaydedilmeli ve ortalaması alınmalıdır. Aynı işlem en az 30 saniye süreyle tekrar edilmeli, sıfır akış basınç farkı negatif değerleri kaydedilmeli ve ortalaması alınmalıdır. Sıfır akışlı basınç farkı ortalama değerlerinden herhangi biri 5Pa'dan büyükse test yapılmamalıdır. 5Pa'dan az ise tüm sıfır akışlı basınç farkı değerlerinin ortalamasını referans değer olarak kabul edilmelidir. Elde edilen referans değer basınç farkı Denklem 2.12'de ortalama olarak ifade edilen ve ölçülen basınç farkından çıkarılan değere karşılık gelmektedir ve indüklenen basınç farkları için bir düzeltme faktörü olarak kullanılmaktadır. Bu adımlar test sonunda da uygulanmakta ve pozitif ve negatif referans değerlerin 5Pa seviyesinin altında olduğundan emin olunmalıdır (ISO 9972, 2006; Çizelge 2.7).

$$\Delta p = \Delta p_m - \frac{\Delta p_{0,1} + \Delta p_{0,2}}{2} \quad \text{Denklem (2.12)}$$

İndüklenmiş bina basınç farkı ile sızdırmazlığın test edilmesi için yaklaşık 10Pa farkla artan bir dizi basınç farkı üzerinden hava akış hızı ve iç-dış basınç farkı ölçümleri alınması önerilmektedir. İndüklenmiş en düşük basınç farkı 10Pa ya da sıfır akış basınç farkı ortalamasının (pozitif veya negatif ortalamalardan büyük olanın) beş katı olmalıdır. İndüklenmiş en yüksek basınç farkı, (a) tekil konutlar ve küçük binalar için en az 50Pa, (b) büyük binalar için 50Pa elde edilemiyorsa elde edilebilecek en yüksek basınçla test gerçekleştirilebilir (ISO 9972, 2006; Çizelge 2.7).

Verilerin değerlendirilmesinde hacim (V), toplam yapı kabuğu alanı (A_e), duvar ve çatı alanı, net zemin alanı (A_f) gibi değerlerin raporlanması gerektiği ifade edilmektedir (ISO 9972, 2006; Çizelge 2.7). Şekil 2.7 bu parametrelerin hesaplanmasına ilişkin genel çerçeveyi ifade etmektedir.



Şekil 2.7. Yapı kabuğu alanının hesaplanmasında kabul edilen sınırlar: 1. dış, 2. toplam iç ölçü, 3. iç

ISO 9972 (2006) düzeltilmemiş hava akış ölçümünün (q_r) ölçülen sıcaklık değerlerine göre düzeltilmesi gerektiğini (q_m) ifade etmektedir (Denklem 2.13; ISO 9972, 2006).

$$q_m = f(q_r) \quad \text{Denklem (2.13)}$$

Bu düzeltme yapıldıktan sonra, basınçsızlaştırma testleri için, düzeltilmiş hava akış oranının (q_m) yapı kabuğundan gerçekleşen hava akış oranına (q_{env}) çevrilmesi için Denklem 2.14, basınçlandırma testleri için ise Denklem 2.15 kullanılmaktadır:

$$q_{env} = q_m \left(\frac{\rho_{iç}}{\rho_{dış}} \right) = \left(\frac{T_{dış}}{T_{iç}} \right) \quad \text{Denklem (2.14)}$$

$$q_{env} = q_m \left(\frac{\rho_{dış}}{\rho_{iç}} \right) = \left(\frac{T_{iç}}{T_{dış}} \right) \quad \text{Denklem (2.15)}$$

Burada,

$\rho_{iç}$, metreküp başına kilogram olarak ifade edilen iç hava yoğunluğu,

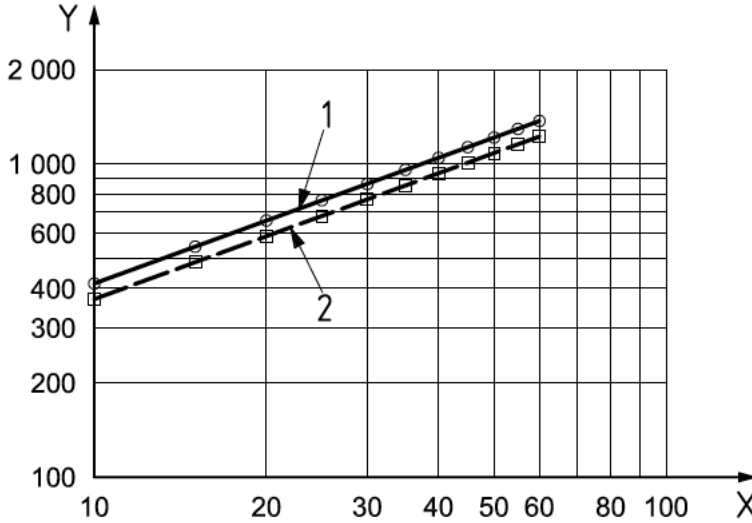
$\rho_{dış}$, metreküp başına kilogram olarak ifade edilen dış hava yoğunluğu,

$T_{iç}$, Kelvin cinsinden ifade edilen iç hava mutlak sıcaklığı,

$T_{dış}$, kelvin cinsinden ifade edilen dış hava mutlak sıcaklığıdır.

Hesaplanan yapı kabuğundan gerçekleşen hava akış oranları (q_{env}) karşılıklı basınç farkları ile hem basınçlandırma hem de basınçsızlaştırma için grafik olarak ifade edilmelidir (Şekil 2.8; ISO 9972, 2006). Şekil 2.8’da görülen grafik basınçlandırma test verilerinin yaygın sunum yöntemidir. Bu sunum yöntemi hem test sürecinde ölçüm güvenilirliğinin kontrol edilmesi hem de verilerin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Şekil 2.8’de

görülen “Y” değerleri Pa cinsinden basınç farklarını, “X” değerleri m³/h cinsinden hava akış oranlarını, “1” basınçsızlaştırma ölçüm verilerini ve “2” basınçlandırma ölçüm verilerini ifade etmektedir. Diğer standartlar tarafından ifade edilen ve ölçüm güvenilirliğinin kontrol edilmesini sağlayan korelasyon katsayısı (r^2) değerleri de bu her iki ölçüme ait noktaların lineer ilişkisi üzerinden hesaplanmaktadır.



Şekil 2.8. Basınçlandırma ve basınçsızlaştırma testleri için basınç farkı (x eksen) ve hava akış oranları grafiği (y eksen) (ISO 9972, 2006)

Denklem 2.14 ve Denklem 2.15 kullanılarak dönüştürülen veriler, en küçük kare tekniği kullanılarak Denklem 2.16'ya göre hava akış katsayısını (C_{env}) ve hava akış üs değerini (n) belirlemekte kullanılmaktadır (ISO 9972, 2006).

$$q_{env} = C_{env}(\Delta p)^n \quad \text{Denklem (2.16)}$$

Burada n , hava akış üs değeridir.

Denklem 2.16 ile elde edilen verilerin uygunluğunu belirlenmesinde, hava akış katsayısı (C_{env}) ve hava akış üs değerinin (n) güven aralıkları da hesaplanmalı ve bu hesaplamalar basınçlandırma ve basınçsızlaştırma testleri için ayrı ayrı hesaplanmalıdır. ISO 9972 bu hesaplamalar için Ek C'nin kullanılmasını önermektedir (ISO 9972, 2006). ISO 9972 (2006) test sonuçlarının geçerli kabul edilebilmesi için n değerinin 0,5 ile 1 aralığında ve r^2 değerinin ise 0,96'dan az olmaması gerektiğini, ancak böylelikle uluslararası

geçerliliğin sağlanabileceğini ifade etmektedir. ASTM E779 ile benzer bir hesaplama ve test geçerlilik değerlendirmesi yapıldığı görülmektedir.

ISO 9972'ye (2006) göre hava akış katsayısı (C_L) basınçsızlaştırma testleri için Denklem 2.17, basınçlandırma testleri için Denklem 2.18 kullanılarak hesaplanmaktadır (normal şartlar altında; $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ve $1,103 \times 10^5 \text{Pa}$).

$$C_L = C_{env} \left(\frac{\rho_{dış}}{\rho_0} \right)^{1-n} \approx C_{env} \left(\frac{T_0}{T_{dış}} \right)^{1-n} \quad \text{Denklem (2.17)}$$

$$C_L = C_{env} \left(\frac{\rho_{iç}}{\rho_0} \right)^{1-n} \approx C_{env} \left(\frac{T_0}{T_{iç}} \right)^{1-n} \quad \text{Denklem (2.18)}$$

Burada,

ρ_0 , kg/m^3 cinsinden normal şartlar altında hava yoğunluğu,

T_0 , Kelvin cinsinden normal şartlar altında havanın mutlak sıcaklığıdır. Diğer değerler için ISO 9972'de (2006) bulunan EK B kullanılmaktadır. Denklem 2.17 ve 2.18'e bağlı olarak hava sızma oranı, q_L , Denklem 2.19 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$q_L = C_L (\Delta_p)^n \quad \text{Denklem (2.19)}$$

Yukarıda özetlenen ölçüme dayalı değerler dışında bu değerlerden elde edilebilecek diğer değerler şu şekilde özetlenmektedir: Referans basınç farkındaki (genellikle 50Pa) hava değişim oranı (Δ_{pr}) ve hava sızma oranı, q_{pr} Denklem 2.20 ile belirlenmektedir. Basınçlandırma ve basınçsızlaştırma testleri için 50Pa'da ortalama hava sızma oranı için türetilen değerler hesaplanır. Örneğin 50Pa basınç farkındaki hava değişim oranı, n_{pr} , Denklem 2.21 kullanılarak 50Pa'daki ortalama hava sızma oranının hacme bölünmesiyle hesaplanır (ISO 9972, 2006):

$$q_{pr} = C_L (\Delta_{pr})^n \quad \text{Denklem (2.20)}$$

$$n_{pr} = \frac{q_{pr}}{V} \quad \text{Denklem (2.21)}$$

ISO 9972'ye (2006) göre 50Pa basınç farkındaki hava geçirgenliği, q_{a50} , 50Pa'daki ortalama hava sızma oranının yapı kabuğu alanına bölünmesiyle elde edilmektedir (Denklem 2.22):

$$q_{a50} = \frac{q_{50}}{A_E} \quad \text{Denklem (2.22)}$$

Spesifik sızma oranı ise, w_{50} , 50 Pa'daki ortalama hava sızma oranının net kullanım alanına bölünmesiyle hesaplanır (Denklem 2.23; ISO 9972, 2006):

$$w_{50} = \frac{q_{50}}{A_F} \quad \text{Denklem (2.23)}$$

Referans basınç farkındaki hava sızma oranı q_{pr} (m³/h) Denklem 2.20 ile hesaplanmakta (ISO 9972, 2006), referans basınç farkına (Δ_{pr}) bağlı sızma alanı (A_L) ise Denklem 2.24 ile hesaplanmaktadır:

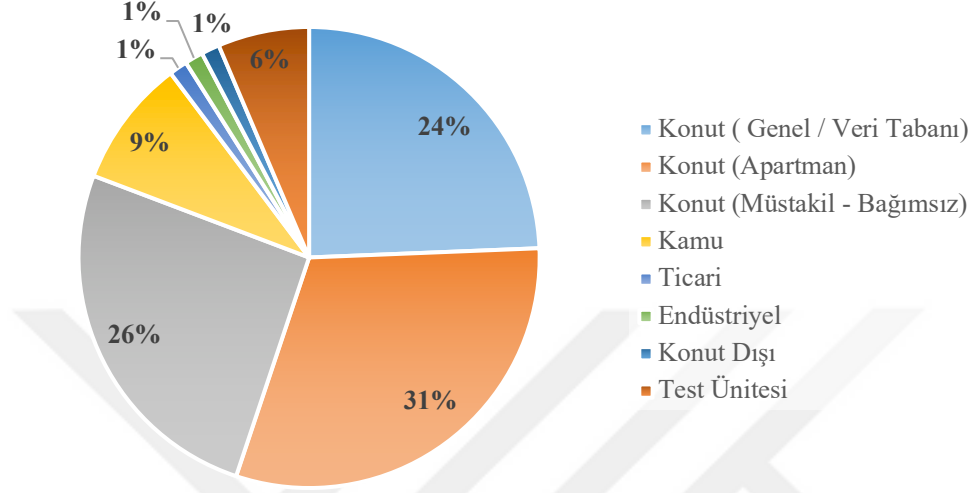
$$A_L = C_L \left(\frac{\rho_0}{2} \right)^{0,5} (\Delta_{pr})^{n-0,5} \quad \text{Denklem (2.24)}$$

Tüm incelenen standartlar göz önüne alındığında, özellikle Chapter Eight RESNET (2013) ölçüm sürecindeki çevresel koşulların kontrolünü, ASTM E779 (2003) ve ISO 9972 (2006) hesaplama yöntemi ve test geçerliliği kriterlerini net bir biçimde tanımlamaktadır.

2.3. Meta Analiz: Yapılarda Fan Basınç Testi ile Sızdırmazlık Ölçümü

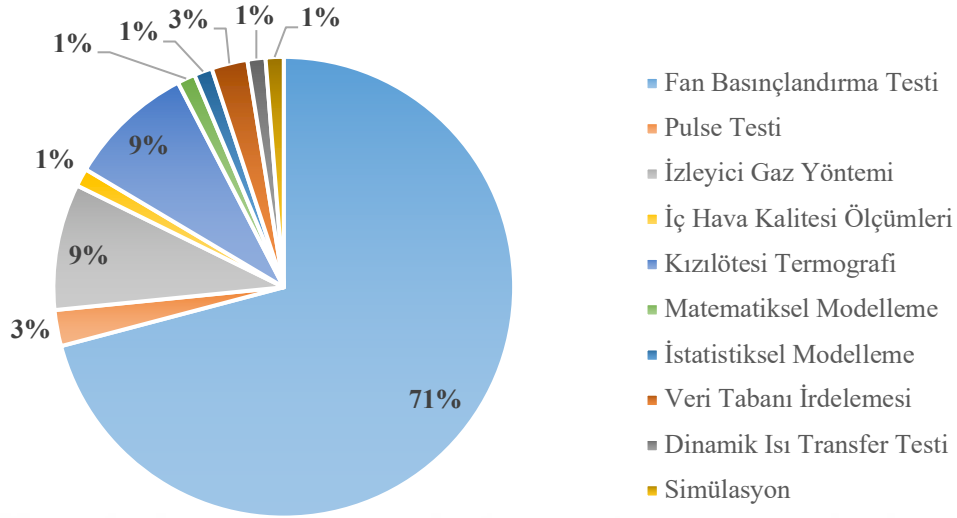
Giriş bölümünde de belirtildiği gibi, binalarda sızdırmazlığın belirlenmesine yönelik çalışmaların çoğunluğu müstakil ve tekil konut binalarında yürütülmektedir. Son on yılı kapsayan süreç için (2011-2020) Web of Science'da (WoS) “bina sızdırmazlık – *building airtightness*” ve “testing – *test*” anahtar kelimelerini kullanılarak yapılan literatür taraması sonucunda 149 makale belirlenmiş ve bu makalelerden 70'inin bina sızdırmazlık ölçümlerine odaklandığı saptanmıştır. Çizelge 2.8'de seçilen makaleler bina tipolojisi, ölçüm/değerlendirme yöntemi ve ilişkili standartlar üzerinden sunulmaktadır. Çizelge 2.8'de görüldüğü gibi, seçilen 70 çalışmada 78 farklı tipolojinin incelendiğine rastlanmış olup (örneğin, bir çalışma birden çok yapı tipolojisinde yürütülmüştür) bina tipolojilerine

ilişkin ağırlıklar Şekil abc’de sunulmuştur. Şekil 2.9’da görüldüğü gibi, çalışmaların %81’i konut yapılarında sızdırmazlık üzerine odaklanmakta olup, kamu yapıları, ticari yapılar gibi diğer tipolojilerin toplam çalışılan tipolojilere oranı yaklaşık %12 civarındadır. Toplam 5 çalışmanın ise sızdırmazlığın belirlenmesinde test ünitelerine odaklandığı saptanmıştır.



Şekil 2.9. Literatür taraması kapsamında seçilmiş yayınlarda ele alınan bina tipolojilerinin dağılımı

Çalışmaların %80’den fazlasının konut tipolojilerinde yürütülmüş olması önemli bir bulgudur. Konut tipolojilerine ait çalışmaların %31’i çok ailenin yaşadığı apartman yapılarına odaklanmış, %26’sı müstakil, bağımsız ya da yarı bağımsız konutlarda yürütülmüş ve diğer kısmı ise (%24) geniş ulusal ve uluslararası veri tabanlarında bulunan sızdırmazlık değerlerini irdeleyerek konut stoğundaki sızdırmazlık değerlerini enerji performansı üzerinden ele almayı hedeflemiştir. Bu noktada vurgulanması gereken önemli bir bulgu, çalışmaların yürütüldüğü bazı ülkelerde konut binası sızdırmazlık değerlerinin uygun test yöntemiyle belirlenerek ve veri tabanlarına aktarılmış olduğudur (Walker ve Sherman, 2013; Tiberio ve Branchi, 2013; Martin-Garin vd., 2020; Khemet ve Richman, 2018; Feijo-Munoz vd., 2019). Böylelikle, belirli yapı sistemleri, bina yaşı, iyileştirme potansiyelleri, enerji performansı ve karbondioksit emisyonlarını iyileştirme hedefleri gibi yapı çevreyi doğrudan etkileyen konularda karar verme sürecinde sızdırmazlık önemli bir kriter halini alabilmektedir. Diğer yandan irdelenen çalışmalarda kullanılan ölçüm ve değerlendirme yöntemleri de Çizelge 2.8 ve Şekil 2.10’da sunulmaktadır. İrdelenen çalışmaların %71’inde fan basınçlandırma testi uygulandığı saptanmıştır. Fan basınçlandırma testi dışında en yaygın kullanılan iki diğer yöntem izleyici gaz yöntemi ve kızılötesi termografidir (%9, Şekil 2.10).

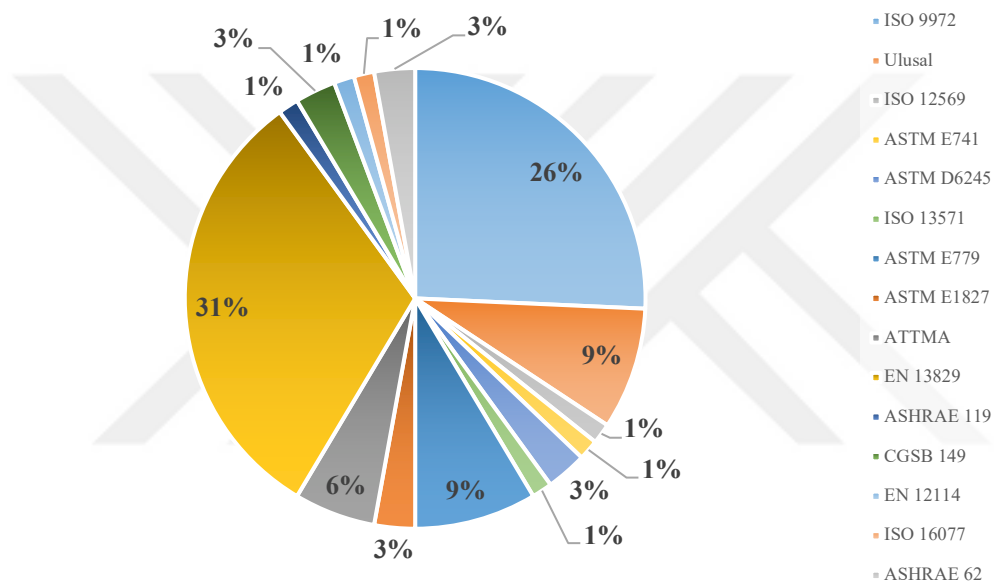


Şekil 2.10. Seçilmiş yayınlarda ele alınan ölçüm ve değerlendirme yöntemlerinin dağılımı

Sızdırmazlık üzerine çalışan araştırmacılar farklı ölçüm yaklaşımlarının geliştirilmesi gerektiğini de savunmaktadır. Örneğin, Moller, Rasmussen ve Nicolajsen (2010), yapı kabuğunun sızdırmazlığını test etmek amacıyla geliştirilmiş bir çok ayrıntılı yöntem dışında bir öneride bulunmuş ve bir silindir aracılığıyla sıkıştırılan hava üzerinden kurgulanan alternatif ve basitleştirilmiş ölçüm yöntemini test etmişlerdir. Fine vd. (2020), fan basınçlandırma testinin bina hava sızdırmazlığını belirlemek için yaygın bir yaklaşım olduğunu kabul etmekte, ancak büyük binalarda test uygulamalarının kompartımanlar üzerinden yapılması gerektiğinin altını çizmekte ve bu tip testlerin kısmen pratik olmadığını savunmaktadır. Bu nedenle, ölçüm ve kalibre edilmiş simülasyon yaklaşımını birleştiren bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu tür araştırma problemlerinin ortaya konması, yapı kabuğu sızdırmazlık testlerine ilişkin araştırmadaki boşluklarını ve konut dışı ve büyük binalarda yapılan ölçümlerle ilgili yetersizlikleri de işaret etmektedir.

Son olarak, WoS'a dayalı olarak yürütülmüş olan literatür taraması kapsamında belirlenen 70 çalışmanın hangi standartları yaygın olarak kullandığı irdelenmiştir. Çizelge 2.8 ve Şekil 2.11'de görüldüğü gibi ölçüm yöntemi ve sonuçların irdelenmesine yönelik süreci belirlemede en fazla ISO 9972 (%26) ve EN 13829 (%31) kullanılmaktadır. Bu iki standarttan EN 13289 2015 yılının Eylül ayına kadar geçerli olan ve sonrasında gerekli revizyonlarla birlikte ISO 9972'ye dönüştürülmüş ve 9 Eylül 2015 tarihinden beri geçerli olan standarttır. ISO 9972 (2006) Bölüm 2.2'de detaylı olarak irdelenmiştir. Dolayısıyla

İncelenen yayınların %57'si bu standartlarla tanımlanmış ölçüm metodolojilerini ve değerlendirme kısıtlarını dikkate almıştır. ISO 9972 ve önceki EN versiyonu dışında en sık kullanılan diğer standartlar sırasıyla ülkelerin kendi belirledikleri ya da uluslararası standartlardan uyarladıkları ulusal standartlar ve ASTM International standartlarından E779'dur (%9, Şekil 2.11; 2003). ASTM 779 standardına ilişkin detaylı bilgiler Bölüm 2.2'de sunulmuştur. Bazı çalışmaların bir standarttan ziyade The Air Tightness Testing and Measurement Association (ATTMA) tarafından önerilen ölçüm prosedürlerine referansla çalışmaları yürütmüşlerdir (%6, Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Seçilmiş yayınlarda ele alınan ölçüm ve değerlendirme yöntemlerinin dağılımı

Birçok çalışmanın uluslararası standartlara ya da bağlı ulusal standartlara dayalı olarak uygulandığı ve sıklıkla konut stoğuna ilişkin sızdırmazlık değerleri veri tabanı oluşturmaya yönelik olarak yürütüldüğü saptanmıştır (Melois vd., 2019; Crawley vd. 2019; Khemet ve Richman, 2018, vb.). Türkiye’de bina sızdırmazlığına ilişkin özelleşmiş bir standart bulunmamakta olup Binalarda Enerji Performansı yönetmeliği (2008) sızdırmazlığın EN 13829 standardına dayalı olarak belirlenmesi gerektiğini ifade etmektedir.

Çizelge 2.8. Meta Analiz: Bina tipolojisi, ölçüm ve değerlendirme yöntemi ve kullanılan standartlara ilişkin literatür taraması

No	Yazar / Yıl	Başlık	Bina Tipolojisi	Ölçüm/ Değerlendirme Yöntemi	Standart
1	Martin-Garin vd. (2020)	Airtightness Analysis of the Built Heritage-Field Measurements of Nineteenth Century Buildings through Blower Door Tests	Konut (Kültürel Miras)	Fan Basınçlandırma Testi	ISO 9972:2015
2	Rodrigues vd. (2020)	Quantifying airtightness in Brazilian residential buildings with focus on its contribution to thermal comfort	Konut (Apartman)	Pulse Testi	Brezilya Standardı NBR 15575
3	Almeida, Barreira ve Moreira (2020)	A Discussion Regarding the Measurement of Ventilation Rates Using Tracer Gas and Decay Technique	Konut (Müstakil – Bağımsız)	İzleyici Gaz Yöntemi	ISO 12569 ASTM E 741 ASTM D6245
4	Ji vd. (2020)	Air infiltration rate of typical zones of public buildings under natural conditions	Kamu Binası	İzleyici Gaz Yöntemi	-
5	Lai, Ridley ve Brimblecombe (2020)	Blower-door estimates of PM2.5 deposition rates and penetration factors in an idealized room	Test Ünitesi	Fan Basınçlandırma Testi / İç hava kalitesi ölçümleri	ISO 9972:2015
6	Galaj ve Saleta (2020)	Impact of Apartment Tightness on Temperature Variability during a Fire	Konut (Apartman)	Kızılötesi Termografi	ISO 13571 ISO 9972:2015
7	Fin vd. (2020)	An investigation of alternative methods for determining envelope airtightness from suite-based testing in multi-unit residential buildings	Konut (Apartman)	Simülasyon	ASTM E779- 10
8	Bielek vd. (2020)	Infrared thermography diagnostics of air permeability through building openings - Assessment of its reliability	Test Ünitesi	Kızılötesi Termografi	-
9	Heim ve Miszczuk (2020)	Modelling building infiltration using the airflow network model approach calibrated by air-tightness test results and leak detection	Konut (Müstakil – Bağımsız)	Fan Basınçlandırma Testi	-
10	Laine (2020)	Pressure difference in buildings with good air-tightness: control measurements after IAQ renovations	Kamu Binası	İzleyici Gaz Yöntemi	-
11	Galaj ve Saleta (2020)	Impact of Apartment Tightness on the Concentrations of Toxic Gases Emitted During a Fire	Konut (Apartman)	Veri Tabanı	Polonya Standardı (PN-B-02852:2001)
12	Fernandez-Aguera vd. (2019)	Predictive models for airtightness in social housing in a Mediterranean region	Konut (Apartman)	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829:2002
13	Zheng vd. (2019)	Experimental insights into the airtightness measurement of a house-sized chamber in a sheltered environment using blower door and pulse methods	Test Ünitesi	Fan Basınçlandırma Testi / Pulse Testi	-
14	Melois vd. (2019)	Improving building envelope knowledge from analysis of 219,000 certified on-site air leakage measurements in France	Konut (Apartman) / Konut (Müstakil – Bağımsız)	Ölçüm (Belirsiz)	ISO 9972
15	Crawley vd. (2019)	Inferring the as-built air permeability of new UK dwellings	Konut (Belirsiz)	Matematiksel Modelleme	UK Passivhaus Standardı
16	Shrestha vd. (2019)	Impact of Low-Income Home Energy-Efficiency Retrofits on Building Air Tightness and Healthy Home Indicators	Konut (Apartman)	Fan Basınçlandırma Testi	ASHRAE 119
17	Dominguez-Amarillo vd. (2019)	Effect of Airtightness on Thermal Loads in Legacy Low-Income Housing	Konut (Apartman)	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829:2002
18	Crawley, Wingfield ve Elwell (2019)	The relationship between airtightness and ventilation in new UK dwellings	Konut (Müstakil – Bağımsız)	İstatistiksel Modelleme	UK Passivhaus Standardı

Çizelge 2.8. devam

No	Yazar / Yıl	Başlık	Bina Tipolojisi	Ölçüm/ Değerlendirme Yöntemi	Standart
19	Fernandez-Aguera, Dominguez-Amarillo ve Campano (2019)	Characterising Draught in Mediterranean Multifamily Housing	Konut (Apartman)	Kızılötesi Termografi / Fan Basınçlandırma Testi / İzleyici Gaz Testi	EN 13829:2002
20	Prignon vd. (2019)	A method to quantify uncertainties in airtightness measurements: Zero-flow and envelope pressure	Konut (Apartman)	Fan Basınçlandırma Testi	ISO 9972:2015
21	Feijo-Munoz vd. (2019)	Airtightness of residential buildings in the Continental area of Spain	Konut (Müstakil – Bağımsız) / Konut (Apartman)	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829:2000
22	Fernandez-Aguera vd. (2019)	Social housing airtightness in Southern Europe	Konut (Apartman)	Fan Basınçlandırma Testi	-
23	Khemet ve Richman (2018)	A univariate and multiple linear regression analysis on a national fan (de) Pressurization testing database to predict airtightness in houses	Konut (Müstakil – Bağımsız)	Fan Basınçlandırma Testi	Kanada Standardı CGSB 149 [9] ve R-2000
24	Gupta ve Kotopouleas (2018)	Magnitude and extent of building fabric thermal performance gap in UK low energy housing	Konut (Müstakil – Bağımsız)	Veri Tabanı	ATTMA Standartları
25	Rodriguez-Jimenez, Carretero-Ayuso ve Claro-Ponce (2018)	Influence of infiltrations in the energy retrofit of the envelope. A case study from the action plans in the public housing stock of Andalusia	Konut (Apartman)	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829
26	Tanyer, Tavukcuoglu, ve Bekboliev (2018)	Assessing the airtightness performance of container houses in relation to its effect on energy efficiency	Konut (Müstakil – Bağımsız)	Fan Basınçlandırma Testi / İzleyici Gaz Testi	-
27	Jesus vd. (2018)	Methodology for the Study of the Envelope Airtightness of Residential Buildings in Spain: A Case Study	Konut	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829
28	Hong ve Kim (2018)	Airtightness of electrical, mechanical and architectural components in South Korean apartment buildings using the fan pressurization and tracer gas method	Konut (Apartman)	Fan Basınçlandırma Testi / İzleyici Gaz Testi	ASTM E779-10, ASTM E1827-11 CGSB 149.10 ISO 9972
29	Bist ve Apte (2018)	Measuring Infiltration Rates & Leakage in Residential Buildings of Ahmedabad Using Blower Door Method	Konut (Müstakil – Bağımsız) / Konut (Apartman)	Fan Basınçlandırma Testi	-
30	Miszczuk (2018)	The influence of construction and material solutions on the level of air tightness in single energy buildings	Konut (Müstakil – Bağımsız)	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829
31	Love vd. (2017)	'Hitting the target and missing the point': Analysis of air permeability data for new UK dwellings and what it reveals about the testing procedure	Konut (Müstakil – Bağımsız)	Fan Basınçlandırma Testi	ISO 9972
32	Ji, Lin ve Li (2017)	Building air leakage analysis for individual apartments in North China	Konut (Apartman)	Fan Basınçlandırma Testi	ISO 9972 ASTM E779-10
33	Ji ve Lin (2017)	Airtightness field tests of residential buildings in Dalian, China	Konut (Müstakil – Bağımsız)	Fan Basınçlandırma Testi	ISO 9972
34	Kalamees, Alev ve Parnalaas (2017)	Air leakage levels in timber frame building envelope joints	Konut (Müstakil – Bağımsız)	Fan Basınçlandırma Testi	EN 12114
35	Barreira, Almeida ve Moreira (2017)	An infrared thermography passive approach to assess the effect of leakage points in buildings	Konut (Müstakil – Bağımsız)	Kızılötesi Termografi	EN 13829:2006

Çizelge 2.8. devam

No	Yazar / Yıl	Başlık	Bina Tipolojisi	Ölçüm/ Değerlendirme Yöntemi	Standart
36	Cuce (2017)	Role of airtightness in energy loss from windows: Experimental results from in-situ tests	Konut (Müstakil – Bağımsız)	Dinamik Isı Transfer Testi	-
37	Almeida, Ramos ve Pereira (2017)	A contribution for the quantification of the influence of windows on the airtightness of Southern European buildings	Kamu Binası	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829 ISO 9972
38	Pereira vd. (2017)	Occupant influence on residential ventilation patterns in mild climate conditions	Konut	Fan Basınçlandırma Testi	ASTM-D6245
39	Colijn, Entrop ve Toxopeus (2017)	Evaluating the effectiveness of improved workmanship quality on the airtightness of Dutch detached houses	Konut (Müstakil – Bağımsız)	Fan Basınçlandırma Testi	-
40	Miszczuk (2017)	Influence of air tightness of the building on its energy-efficiency in single-family buildings in Poland	Konut (Müstakil – Bağımsız)	Fan Basınçlandırma Testi	ISO 9972:2015
41	McLauchlan, Gomis and Cooper (2017)	Impact of a Pilot Draught Sealing Program on Public Housing Air Permeability	Konut (Apartman)	Fan Basınçlandırma Testi	ISO 9972
42	Ambrose ve Syme (2017)	Air tightness of new Australian residential buildings	Konut	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829:2001 ATTMA Standartları
43	Ji ve Lin (2017)	Air-tightness test and air infiltration estimation of an ultra-low energy building	Konut	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829
44	Krstic vd. (2016)	Validation of neural network model for predicting airtightness of residential and non-residential units in Poland	Konut Konut Dışı	Fan Basınçlandırma Testi	ISO 9972:2015 EN ISO 13829:2002
45	Alfano vd. (2016)	Experimental Air-Tightness Analysis in Mediterranean Buildings after Windows Retrofit	Konut	Fan Basınçlandırma Testi	ISO 9972:2015 EN ISO 13829:2002
46	Fernandez-Aguera vd. (2016)	An approach to modelling envelope airtightness in multi-family social housing in Mediterranean Europe based on the situation in Spain	Konut (Apartman)	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829: 2002
47	Moon, Sohn ve Hwang (2016)	Indoor Air Quality Performance of Ventilation Systems in Classrooms	Kamu Binası	Fan Basınçlandırma Testi / İzleyici Gaz Testi	-
48	Miszczuk (2016)	The level of airtightness in energy-efficient single-family houses in Poland	Konut (Müstakil – Bağımsız)	Fan Basınçlandırma Testi	ISO 9972:2015
49	Srba vd. (2016)	Estimation of Air Leakage Rate Of Wood-Based Residential Buildings Constructed in the Czech Republic in the Years 2006-2014 Using Blower Door Test	Konut	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829: 2001
50	Tanasa vd. (2016)	Air Tightness Measurements for an Energy Efficient Residential House Using the Blower Door Procedure	Konut	Fan Basınçlandırma Testi	-
51	Gillot vd. (2016)	Improving the airtightness in an existing UK dwelling: The challenges, the measures and their effectiveness	Konut	Fan Basınçlandırma Testi	ATTMA Standartları
52	Brojan, Weil ve Clouston (2015)	Air tightness of straw bale construction	Test Ünitesi / Konut	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829: 2001
53	Ren ve Chen (2015)	Estimation of air infiltration for Australian housing energy analysis	Konut	Fan Basınçlandırma Testi	ATTMA Standartları
54	Meiss ve Feijo-Munoz (2015)	The energy impact of infiltration: a study on buildings located in north central Spain	Konut (Apartman)	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829 ISO 9972

Çizelge 2.8. devam

No	Yazar / Yıl	Başlık	Bina Tipolojisi	Ölçüm/ Değerlendirme Yöntemi	Standart
55	Wojcik ve Kosinski (2015)	Seeming air tightness of construction partitions	Kamu Binası	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829
56	Urquhart, Richman ve Finch (2015)	The effect of an enclosure retrofit on air leakage rates for a multi-unit residential case-study building	Konut (Apartman)	Fan Basınçlandırma Testi	ASTM 779
57	Brinks, Kornadt ve Oly (2015)	Air infiltration assessment for industrial buildings	Endüstriyel Yapı	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13789
58	Bobadilla vd. 2014	Proposal of Acceptable Air Tightness Classes for Buildings in Chile	Konut	Fan Basınçlandırma Testi	ASTM E779-10
59	Baumler ve Muller (2014)	Experimental study on the tightness of glazing bead butt joints of aluminium windows considering comfort aspects	Test Ünitesi	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829
60	Bohac vd. (2014)	Leakage Reductions for Large Building Air Sealing	Ticari Yapı	Fan Basınçlandırma Testi	ASTM E779-10
61	Laverge vd. (2014)	Airtightness Assessment of Single-Family Houses in Belgium	Konut (Müstakil – Bağımsız)	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829
62	Oravec, Hruha ve Perina (2014)	The Windows in the Modular Structure - Air Tightness and Quality of Installation Diagnostics	Konut (Apartman)	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829
63	Ipbuker vd. (2014)	Uncertainty evaluation of single-point fan pressurization measurements for calm and assumed windy conditions	Konut (Apartman)	Fan Basınçlandırma Testi	-
64	Walker ve Sherman (2013)	Applying Large Datasets to Developing a Better Understanding of Air Leakage Measurement in Homes	Konut – Veri Tabanı	Fan Basınçlandırma Testi	ASHRAE 62.2-2010
65	Tiberio ve Branchi (2013)	A study of air leakage in residential buildings	Konut – Veri Tabanı	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829
66	Villi vd. (2013)	Building leakage analysis and infiltration modelling for an Italian multi-family building	Konut (Apartman)	Fan Basınçlandırma Testi	UNI 10339
67	Alfano vd. (2012)	Experimental analysis of air tightness in Mediterranean buildings using the fan pressurization method	Konut	Fan Basınçlandırma Testi	ASHRAE 62 EN 15251 ISO 16077
68	Sinnot & Dyer (2012)	Air-tightness field data for dwellings in Ireland	Konut (Müstakil – Bağımsız)	Fan Basınçlandırma Testi	EN 13829
69	Fernandez-Aguera, Sendra ve Dominguez (2011)	Protocols for measuring the airtightness of multi-dwelling units in Southern Europe	Konut (Apartman)	Fan Basınçlandırma Testi	ASTM E 1827-96 EN 13829 ISO 9972
70	Kauppinen ve Siikanen (2011)	Improvement of energy efficiency - the use of thermography and airtightness test in verification of thermal performance of school	Kamu Binası	Fan Basınçlandırma Testi / Kızılötesi Termografi	-

Bu bölümdeki meta analize dair genel bakışın ardından seçili makalelerin daha detaylı olarak irdelenmesi önem taşımaktadır. Martin, Garin ve Betanzos (2020) İspanya'daki 8 ayrı tarihi binada bulunan 37 hacimde yürüttükleri fan basınçlandırma testlerini ISO 9972:2015 standardına bağlı olarak uygulamıştır. 1882 ve 1919 yılları arasında yapılan konut, kültür, eğitim, idari gibi farklı fonksiyonlarla kullanılan bu binalarda ortalama hava değişim oranının (ACH) $n_{50} = 9.03 \text{ h}^{-1}$, bina sızdırmazlık değerlerinin ise 0,68 ile 37,12 h^{-1} aralığında olduğu saptanmıştır.

Fernández-Agüera vd. (2019) yine İspanya'da kamu ve özel kuruluşların yeni inşa edilmiş yapılarda kış koşulları, etkin cephe alanı, banyo havalandırmasının varlığı ve cephe tipi gibi parametreleri göz önüne alarak fan basınçlandırma testleri uygulamışlardır. İspanya ve Avrupa standartlarını kullanarak yaptıkları bu testler sonucunda yapı morfolojisinin sızdırmazlıkta önemli olduğunu saptamışlardır. Yaptıkları bir diğer çalışmada (Dominguez-Amarillo vd., 2019) 1950-1979 yılları arasında inşaa edilen sosyal konutlar üzerinde 5 Akdeniz iklim bölgesinde yer alan 21 site içerisinde bulunan 53 konutta Blower Door Test uygulamışlardır. Yapılan ölçümlerde İspanya'da yapılar inşaa edilirken uyulması gereken standartların bulunmadığı dönemde dahi yapı kabuğu sızdırmazlık seviyelerinin çok yüksek olduğunu sert iklim tiplerinde bu durumun enerji verimliliğini etkilediğini saptamışlardır. Yine aynı sene yaptıkları bir diğer çalışmada güney İspanya'da bulunan 159 sosyal konut üzerinde ölçümlerini gerçekleştirmiş, Güney Avrupa'daki sosyal konutlardaki değerlere benzer şekilde $n_{50}=7 \text{ h}^{-1}$ bulmuşlardır. Bu sebeple çalışma yapıların iklimsel konumlanmalarının yanı sıra yapı yaşı, diğer morfolojik ve yapısal özelliklerin etkisi bakımından literatüre önemli bir katkı sağlamıştır.

Feijó-Muñoz Jesus vd. (2019) İspanya'da karasal iklimde bulunan 129 konut üzerinde yaptıkları fan basınçlandırma testleri ve termal kamera görüntülemeleri aracılığıyla sızdırmazlık değerlerini ve kaçak alanlarını saptamış ve apartmanların tekil/müstakil konutlara göre daha sızdırmaz olduğunu tespit etmişlerdir. Müstakil konutlarda $n_{50}=6.1 \text{ h}^{-1}$ apartmanlarda $n_{50}=7.1 \text{ h}^{-1}$ olduğunu belirlenmiştir. Araştırmacılar çeşitli yapı sistemlerinin kullanıldığı konutları test etmiş ancak tüm değişkenleri kontrol edemedikleri için istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde edememişlerdir. Yine Jesus vd. (2018) İspanya'da yapı sistemleri, yapı yılları ve bulundukları iklim bölgeleri farklı olan 413 konutta vaka

çalışması yürütmüş ve hava sızma alanlarının en çok pencere kenarları, birleşim yerleri ve panjur kutularının çevresinden olduğunu tespit etmişlerdir.

Hong ve Kim (2018) Güney Kore’de bulunan apartmanlarda, fan basınçlandırma testi ve izleyici gaz metodunu kullanarak ölçümler yapmışlardır. Hacim içindeki bütün açıklıkları kapatarak yaptıkları ölçümlerde; n_{50} değeri $0,7 \text{ h}^{-1}$ ve 1 h^{-1} değerleri arasında çıkarken, açıklıklar kapalı yapılan ölçümlerde; n_{50} değeri $1,6 \text{ h}^{-1}$ ve $2,7 \text{ h}^{-1}$ aralığında bulunmuştur. Hava kaçaklarının çoğunlukla giriş kapısı, pencere sistemleri, mekanik hava sistemleri, su giderleri ve elektrik armatürlerinden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Araştırmacılar bu detayların iyileştirilmesiyle sızdırmazlığın kontrol edilebileceği belirtilmiştir.

Miszczuk’un (2018) Polonya’da yaptığı fan basınçlandırma testleri farklı yapı malzemesine sahip hacimlerde uygulanmış ve yapı malzemesi ve sızdırmazlık arasında hiçbir doğrusal ilişki saptanamamıştır. Krstic vd. (2016) Hırvatistan ve Sırbistan’da bir ölçüm kampanyası yürütmüşler, sonrasında Polonya’da bu ölçümlerdeki hacimlerle benzer fiziksel özelliğe sahip yapıları test etmişlerdir. 1918-2014 yılları arasında inşaa edilen 20 örnekleme yapılan testler konut ve ofis binalarını içermektedir. Ülkelerin benzer iklime ve yapım biçimlerine sahip olması verilerin karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır.

Fernandez-Aguera vd. (2016) Güney İspanya’da 45 açık galerili apartman dairesinde fan basınçlandırma testleri yapmış ve n_{50} değeri ortalama $5,72 \text{ h}^{-1}$ olarak buldular. Bu değer standartlardaki sınır değerlerin çok üzerinde olmasına rağmen, kuzey İspanya, İtalya ve Portekiz’de de benzer değerler rapor edilmiştir. Farklı plan tiplerine sahip bu binalarda yapılan çalışmalar sonucunda, hiçbir tasarım kararının sızdırmazlığı etkilemediği, sızdırmazlık konusunda detay çözümleri ve işçiliğe odaklanmak gerektiği sonucuna varılmıştır. Yapılan testlerde düşey elemanlar ve döşeme arasında bölücü duvarlarda çatı ve altı birimlerde herhangi bir sızma gözlemlenmemiştir. Bu nedenle araştırmacılar cephe duvarların iyileştirilmesi amacıyla çalışma yürütülmesini önermiştir.

Srba vd. (2016) Çek Cumhuriyeti’nde yeni inşaa edilmiş ve ahşap strüktürlü 203 düşük enerjili ve pasif evde fan basınçlandırma testleri yapmışlardır. Mekanik hava sistemiyle donatılmış düşük enerjili binaların iç mekan hava kalitesi için gereken azami hava

değişim oranlarına sahip olmadığını tespit etmiş, hava değişim oranlarındaki azalma eğiliminin sürdürülmesi halinde düşük enerjili binalarda mekanik havalandırma sağlanmasının uygun olacağını belirtmiştir. Yapı kabuğu bileşenlerinin, özellikle pencere ve kapıların sızdırmazlık düzeylerinin üst düzeyde kontrol ediliyor olmasının binalarda sağlıklı bir iç ortam oluşması bakımından yeterli hava değişimlerinin oluşmadığı saptamasını ortaya koymuşlardır. Ayrıca ölçüm için kullanılan 50Pa basınç farkının gerçekçi olmadığını, normal koşullarda yapıların asla bu basınçta çalışmadığı bu sebeple ölçümlerden yanlış sonuçlar elde ettiğini savunmuşlardır.

Laverge vd. (2014) sızdırmazlık testlerinde iki ayrı test grubu belirlemişlerdir. İlki tesadüfen seçilmiş ve yeni inşaa edilmiş konut yapılardan oluşmaktayken ikinci grup sahipleri tarafından sızdırmaz olması talep edilen konutlardan oluşturulmuştur. İki test grubu arasında büyük farklar gözlemlenirken, sızmanın büyük bir kısmının tasarım ve işçilikteki farklılıklar ile çatı katları ve garajlardaki büyük sızma alanlarından kaynaklandığı ortaya koyulmuştur. Cephe ve havalandırma sistemi türleri bakımından sızdırmazlık değerlerinin ciddi düzeyde farklılaşmadığı saptanmıştır. Gözlemlenen farklılıkların, önceki çalışmalarda gözlemlenenlerle ve resmi veri tabanlarında bulunan verilerle uyumlu olduğu saptanmıştır.

Alfano vd. (2012) İtalya’da sızdırmazlığın Avrupa’daki diğer ülkelere kıyasla daha az araştırıldığını, bu durumun gerekli standartların eksikliği ve binaların hali hazırda yüksek sızdırmazlık değerlerine sahip olmasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Güney İtalya’da bulunan 20 konutta gerçekleştirilen fan basınçlandırma testleri sonucunda özellikle 70’li yıllardan önce inşa edilen konutlarda n_{50} değerinin oldukça yüksek olduğunu ve sızmanın çoğunlukla pencerelerden kaynaklandığını saptamışlardır.

Sinnot ve Dyer (2012) 1944 ile 2008 yılları arasında inşa edilen daha sonra iyileştirilmiş 28 konutta sızdırmazlık ölçümlerini fan basınçlandırma testi kullanarak tamamlamış ve elde edilen bulguları geçmiş çalışmalar ve standartlarla karşılaştırılmıştır. Yapı tipi, yaşı, tasarım detayları ve iyileştirme uygulamalarının sızdırmazlık üzerindeki etkisini incelemiş, yüksek kalite işçiliğin sızdırmazlığı büyük ölçüde etkilediğini saptamışlardır.

Šadauskienė vd. (2016) Litvanya’da binaların enerji performans sınıfını tanımlamaya yönelik oluşturulmuş standardın 2006 yılından sonra inşa edilen binaların enerji performans sınıfının C’den düşük olmamasını zorunlu kıldığını ve 2013’ten günümüze A sınıfı binaların yapımına izin verdiğini ifade etmiştir. Büyük çaplı iyileştirme geçiren yapıların performansının da D sınıfından düşük olmaması gerektiğini ifade etmişlerdir. Litvanya standardı A sınıfı konutlar için ACH50 değerinin üst sınırını 0,6 olarak belirlemiştir. Bu bağlamda, Šadauskienė vd. (2016) Litvanya’da 2007-2011 yılları arasında inşaa edilmiş 27 A, B ve C sınıfı yapı üzerinde fan basınçlandırma testleri yürütmüş ve B ve C sınıfı binaların yasal değerden yaklaşık iki kat yüksek ACH50 değerine sahip olduğunu saptamışlardır. Çalışmanın yapıldığı konutlarda tipik hava kaçağı noktalarının tavan ve döşemenin dış duvarla birleşimi, bölücü duvarların dış duvar ve çatı ile birleşimi, elektrik ve sıhhi tesisat tesisatlar, pencere ve kapılardan kaynaklandığını saptamışlardır. Bir binanın enerji verimliliği hesaplamasında ve enerji performans sınıfının belirlenmesinde yapının sızdırmazlık değerlerinin önemli bir kriter olarak ele alınması gerektiğinin altını çizmişlerdir.

Salehi, Torres ve Ramos (2017) 4 farklı konutta fan basınçlandırma yöntemiyle basınçlandırma ve basınçsızlaştırma testleri yapmışlardır. Sızdırmazlıkta yapı geometrisi ve uygulama kalitesinin önemli olduğunu ortaya koymuşlardır. Basınçsızlaştırma testlerinde saptanan sızma oranlarının basınçlandırma testlerine kıyasla daha yüksek olduğu da bu çalışmanın önemli bulgularından biri olmuştur.

Özetle, birçok çalışma bulgularını fan basınçlandırma testine dayandırmış ve yapı kabuğundaki farklı malzemeler arasında detay çözümü gerektiren birleşimlerin sızdırmazlığı etkileyen en önemli parametreler olduğunu saptamışlardır.

2.4. Sonuç ve Tartışma

Bu tez çalışması kapsamında yürütülen literatür çalışması temelde sızdırmazlık alanında ele alınan parametreleri ve bilimsel bilgiyi, uluslararası standartları ve ölçüm protokollerini, yaygın olarak yürütülen çalışmaları saptamaya yönelik olarak kurgulanmıştır. Özetle, belirli bir basınç farkı uygulandığında bir yapı kabuğunda gerçekleşen akış oranı ve

sızma alanı gibi ifadeler benzer bilgiler içermektedir ve bu ölçütler test edilen yapı kabuğundaki toplam sızma miktarını ifade etmek için kullanılmaktadır. Karşılaştırmalı çalışmalarda yapı büyüklüğü, işlevi gibi verileri göz önünde bulundurmaksızın karşılaştırma yapabilmek için ölçüm sonuçları genellikle ACH50 (n_{50}) değeri kullanılmaktadır (Sherman ve Chan, 2004). İncelenen standartlar da benzer bir duruma işaret etmektedir. Tüm standartlarda ACH50 (n_{50}) hesaplanmasına yönelik yöntem tanımı yapılmaktadır.

Sızdırmazlığın belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan üç parametre bina hacmi, cephe alanı ve taban alanıdır (Sherman ve Chan, 2004). Bu verilerin derlenmesine ve ilgili ölçüm çalışmalarının yürütülmesine yönelik olarak irdelenen standartlardan özellikle Chapter Eight RESNET (2013) ölçüm sürecindeki çevresel koşulların kontrolünü, ASTM E779 (2003) ve ISO 9972 (2006) hesaplama yöntemi ve test geçerliliği kriterlerini net bir biçimde tanımlamaktadır.

Sızdırmazlık verilerinin tespit edilmesi zahmetli bir süreçtir ve bina ne kadar büyük ve karmaşıksa, verileri toplamak o kadar zor ve zaman alıcı olmaktadır. Bu nedenle, Bölüm 2.3'te de tartışıldığı gibi mevcut çalışmaların çoğu tekil ve müstakil konutlarda yürütülmüştür. Çok katlı, kamu kullanımına açık, hücre tipi plan organizasyonuna sahip yapılarda yürütülen çalışma sayısı oldukça azdır.

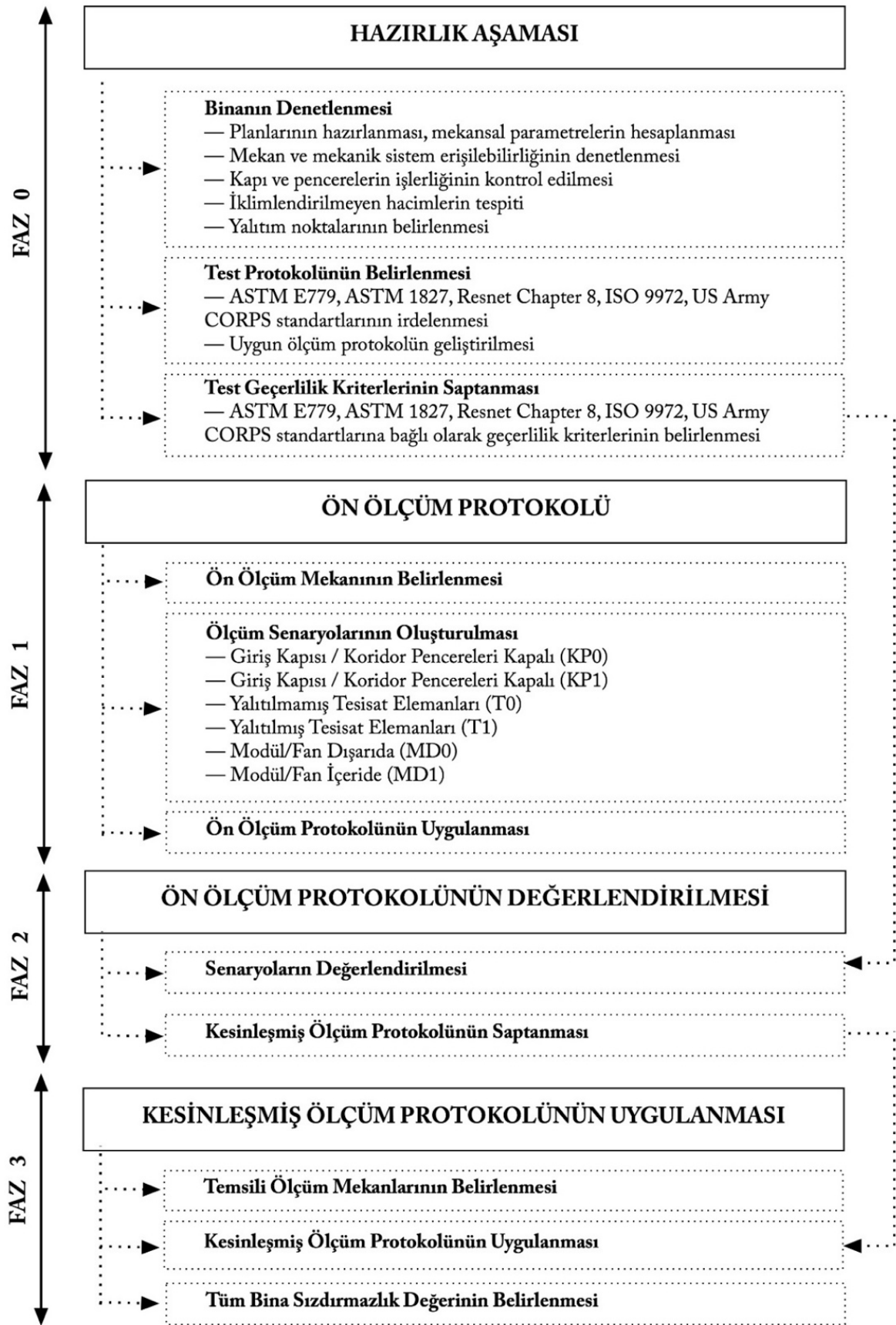
Literatür çalışmasından elde edilen bu veriler Bölüm 1'de ifade edilen araştırma problemi ve araştırma sorularının anlamlı olduğunu ve bu problem ve sorulara bağlı olarak kurulmuş hipotezin test edilmesini meşru kılmaktadır. Yöntem bölümünde hipotezin test edilmesine yönelik olarak kurgulanan süreç özetlenecektir.

3. YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında Bölüm 1’de belirlenen araştırma sorularına yanıt verebilmek amacıyla deneysel alan çalışması yürütülmüştür. Araştırma tasarımı nicel veri toplamaya yönelik ölçümler ve bulgularının ilgili standartlarla karşılıklı değerlendirilmesine dayanmaktadır. Yöntem bölümünün alt başlıklarında araştırma tasarımı ve kullanılan materyal ve metodlar ile değerlendirme kriterlerine ilişkin ana kararlar aktarılmaktadır.

Giriş bölümünde belirtilen araştırma soruları ve hipoteze ilişkin bir deneysel çerçeve oluşturabilmek amacıyla bu tez çalışması kapsamında yürütülen araştırma adımları Şekil 3.1’de sunulmaktadır.

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, “Hazırlık Aşaması (Faz 0)” binada öncelikli olarak bir ön denetleme sürecinin yürütülmesine odaklanmaktadır. Bu aşamada binaya ait sızdırmazlığa ilişkin veriler detaylı biçimde toplanmış, uygulanacak ölçüme dayalı nicel çalışmanın ilgili tüm alt parametreleri belirlenmiştir. Bu adıma ait çalışmalar Bölüm 3.1’de sunulmaktadır. Bu aşamadan sonra “Ön Ölçüm Protokolü (Faz 1)” kapsamında kesinleşmiş ölçüm protokolünde kullanılacak yaklaşımı belirlemek amacıyla tek bir mekânda farklı ölçüm yaklaşımları test edilmiştir (Bölüm 3.2). “Ön Ölçüm Protokolünün Değerlendirilmesi (Faz 2)” kapsamında ise ölçüm sonuçlarının ön incelemesi tamamlanmış (Bölüm 3.3) ve kesinleşmiş ölçüm yöntemine karar verilmiştir. Kesinleşmiş Ölçüm Protokolünün Uygulanması (Faz 3) kapsamında (Bölüm 3.4), temsili hacimlerde kesinleşen ölçüm protokolü kullanılarak ölçüm süreci tamamlanmıştır. Elde edilen veriler Bölüm 3.1.2 ve 3.1.3’te tanımlanan ölçüm ve değerlendirme kriterleri kapsamında ele alınmış ve bulgular irdelenmiştir.



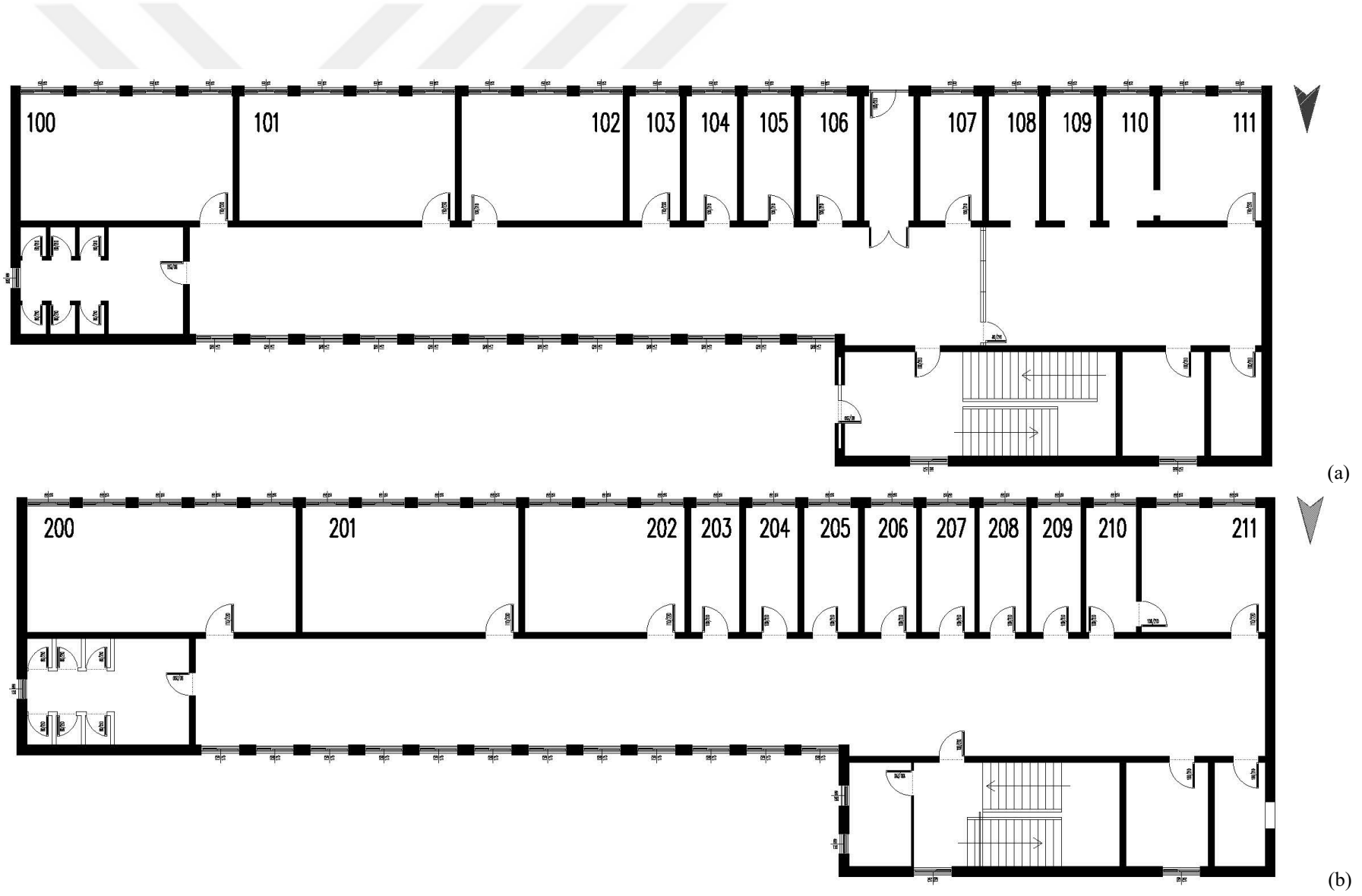
Şekil 3.1. Tez çalışması kapsamında uygulanan araştırma tasarımı adımları

3.1. Hazırlık Aşaması (Faz 0)

Bu tez çalışmasına kapsamında kurgulanan yöntemin, Faz 0: Hazırlık Aşamasında binaya ilişkin tüm verilerin toplandığı bir ön denetleme süreci yürütülmüştür. Bu bağlamda, bu adım kapsamında binada röleve çalışması yürütülmüş ve plan, kesit ve üç boyutlu temsiller hazırlanmıştır. Binaya ait sızdırmazlık çalışmalarını etkileyebilecek ve Bölüm 2.1.2’de tartışılmış olan mekanların hacim ve alan bilgileri, efektif yapı kabuğu sızma alanı gibi parametreler hesaplanmış, pencere ve kapıların işlerliği, mekân erişilebilirliği gibi parametreler kontrol edilmiştir. Diğer yandan, ölçüm protokolünün belirlenebilmesi için Bölüm 2.2’de özetlenen standartlar detaylı olarak incelenmiş, uygun ölçüm protokolü ortaya koyulmuştur. Test geçerlilik kriterleri de bu aşamada belirlenmiş olup Bölüm 3.1.3’te ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

3.1.1. Binanın Denetlenmesi ve Yapısal Özelliklerin Saptanması

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bademlik Kampüsü 39°45'34.9"N, 30°31'22.6"E konumunda bulunan M2 binası 1980’li yıllarda inşa edilmiş, bodrum, zemin ve birinci kat olmak üzere toplam 3 kattan oluşmaktadır. 584 m² taban alanına sahip yapıda: bodrum kat; maket atölyesi, lazer kesim odası, 2 adet mescit ve 4 adet depodan, zemin kat; stüdyo ve çalışma odaları, 5 adet öğretim görevlisi odası, 2 derslik, kulüp odası ve tuvaletlerden, birinci kat 6 öğretim görevlisi odası, 1 yapı fiziği laboratuvarı, bilgisayar laboratuvarı, 2 derslik, switch odası, mutfak ve tuvaletlerden oluşmaktadır. Röleve çalışmaları sonucu kesinleştirilmiş olan M2 binasına ait kat planları Şekil 3.2’de, görünüşler Şekil 3.3’te ayrıca bağlamın anlaşılmasına yardımcı olacak görseller Şekil 3.4’te sunulmaktadır. Şekil 3.5’te ise binadaki ana mekanlarda kullanılan pencere tipolojileri görülmektedir. Bu pencere tipolojileri ana mekanlarda ve bodrum kat ve ıslak hacimlerde kullanılan pencere modüllerini içermektedir.



Şekil 3.2. M2 Binasına ait kat planları (a) zemin kat, (b) birinci kat



Şekil 3.3. M2 Binasına ait kat görünüşler (a) güney, (b) kuzey, (c) doğu, (d) batı

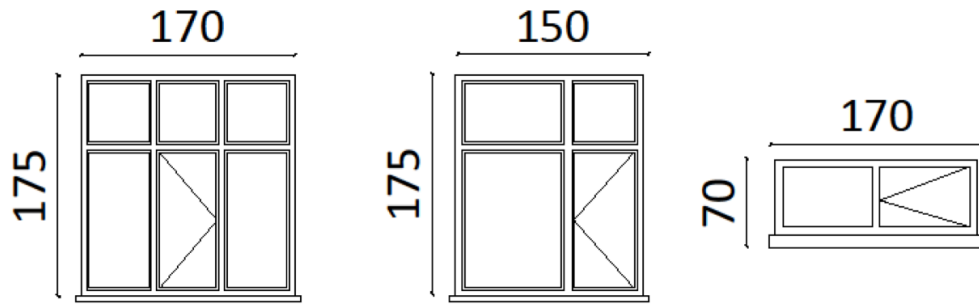


(a)



(b)

Şekil 3.4. M2 Binasının (a) güney ve (b) kuzey görünümü



Şekil 3.5. Binadaki ana mekanlarda kullanılan pencere tipolojileri

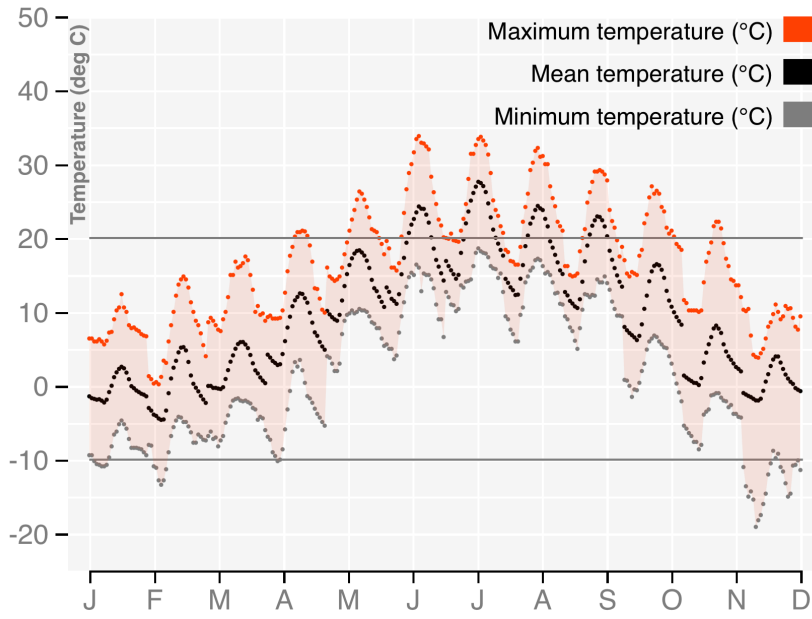
Sızdırmazlık ölçüm protokolünün belirlenmesinde ve sonuçların irdelenmesinde kullanılacak olan veriler hesaplanmış ve Çizelge 3.1’de sunulmuştur. Bu verilerden net alan, hacim ve etkin cephe alanı özellikle temsili ölçüm hacimlerinin saptanması bakımından önem taşımaktadır. Etkin cephe alanı ölçüm gerçekleştirilen her bir hacim için ölçümün

yapıldığı yazılıma aktarılacak olup, toplam pencere alanı, pencere çevresi ve açılan kanat çevresi gibi veriler özellikle tüm bina sızdırmazlık değerinin saptanmasında dikkate alınacaktır.

Çizelge 3.1. Binadaki mekanların kodları ve sızdırmazlığı etkileyen parametreler

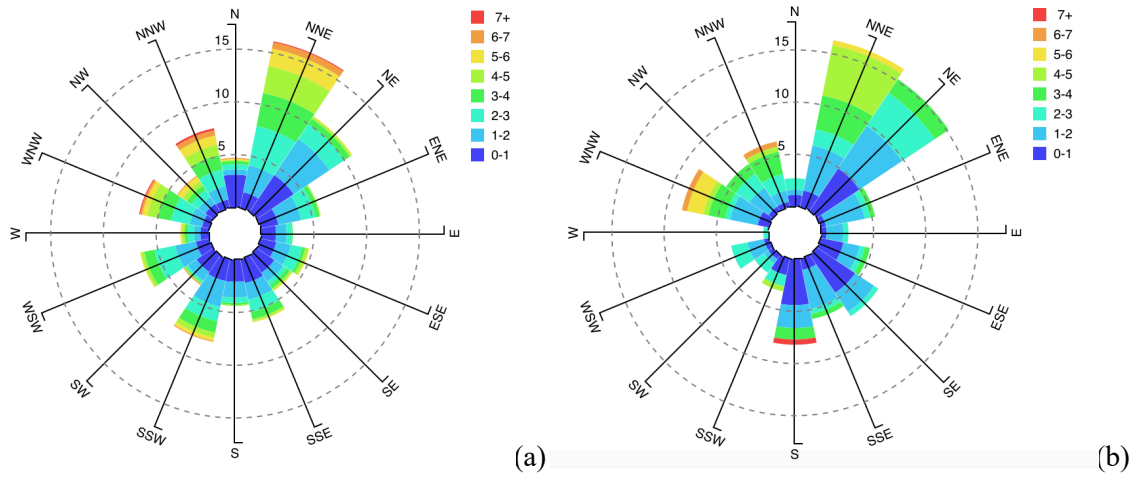
Mekan kodu	Net alan (m ²)	Kat yüksekliği (m)	Etkin cephe alanı (m ²)	Hacim (m ³)	Toplam pencere alanı (m ²)	Pencere çevresi (m)	Açılan kanat pencere çevresi (m)
100	40.90	3.10	25.88	126.79	11.88	27.60	14.00
101	41.60	3.10	26.35	128.96	11.88	27.60	14.00
102	31.10	3.10	16.68	96.41	8.91	20.70	10.50
103	9.80	3.10	6.20	30.38	2.97	6.90	3.50
104	9.80	3.10	6.20	30.38	2.97	6.90	3.50
105	9.80	3.10	6.20	30.38	2.97	6.90	3.50
106	10.40	3.10	6.89	32.24	2.97	6.90	3.50
107	11.90	3.10	7.50	36.89	2.97	6.90	3.50
108	9.80	3.10	6.20	30.38	2.97	6.90	3.50
109	9.80	3.10	6.20	30.38	2.97	6.90	3.50
110	9.80	3.10	6.20	30.38	2.97	6.90	3.50
111	19.60	3.10	12.40	60.76	5.94	13.80	7.00
200	52.00	3.10	35.86	160.89	14.85	34.50	17.50
201	41.60	3.10	26.35	128.96	11.88	27.60	14.00
202	31.10	3.10	16.68	96.41	8.91	20.70	14.00
203	9.30	3.10	5.89	28.83	2.97	6.90	3.50
204	10.10	3.10	6.30	31.31	2.97	6.90	3.50
205	10.40	3.10	6.60	32.24	2.97	6.90	3.50
206	9.90	3.10	6.30	30.69	2.97	6.90	3.50
207	10.10	3.10	6.30	31.31	2.97	6.90	3.50
208	9.00	3.10	5.73	27.90	2.97	6.90	3.50
209	9.50	3.10	6.00	29.45	2.97	6.90	3.50
210	9.80	3.10	6.20	30.38	2.97	6.90	3.50
211	23.80	3.10	15.0	73.78	5.94	13.80	7.00

Bina denetleme ve belgeleme süreci dışında Eskişehir’e ait uzun yıllar ortalaması iklim verileri ClimaPlus (2021) üzerinden elde edilmiştir. Eskişehir gibi kış mevsiminin sert olduğu iklimlerde sızdırmazlık önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir (US DOE, 2012; Çizelge 2.2). Isıtma yüklerinin dominant olduğu iklimlerde özellikle istenmeyen hava kaçışlarına bağlı olarak ısı kayıpları söz konusu olabilmektedir. Bu bağlamda, Eskişehir iklimine ilişkin parametreler Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de sunulmaktadır. Şekil 3.6’da görüldüğü gibi, ölçümlerin yürütüldüğü Nisan ve Mayıs ayları arasında sıcaklık en düşük -10°C, en yüksek ise 20°C bandındadır, uzun yıllar ortalaması ise sıcaklıkların 5-15°C arasında dalgalandığını ortaya koymaktadır.



Şekil 3.6. Eskişehir en yüksek, en düşük ve ortalama sıcaklık değerleri (°C) (Kaynak: Climaplus, 2021)

Şekil 3.7’de Eskişehir için yıllık ve Nisan-Mayıs aylarındaki rüzgâr yön ve hızı sunulmaktadır. Bu veri özellikle ölçüm sürecinde rüzgâr etkisini irdeleyebilmek bakımından önemlidir. Ölçüm yapılacak bina hacimlerinin tümünün güney yönlenmeli olması hâkim rüzgâr etkisinin doğrudan ölçüm sürecini etkilemeyeceğini düşündürmektedir.



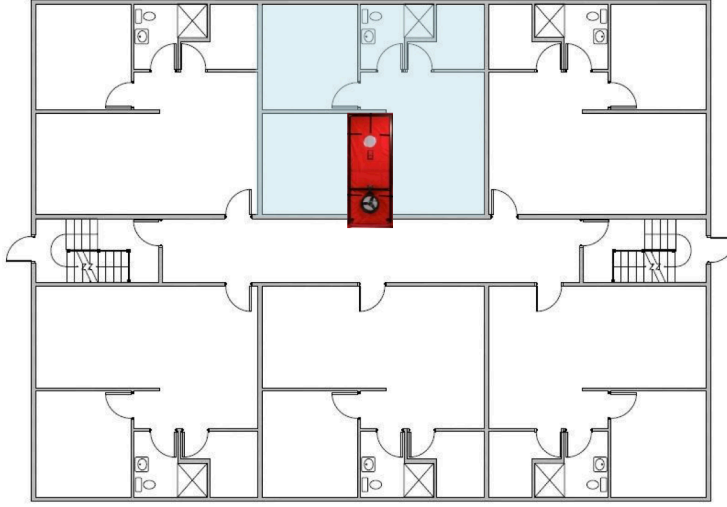
Şekil 3.7. Eskişehir rüzgâr yönü ve hızı (m/s) – (a) tüm yıl, (b) Nisan ve Mayıs ayları (Kaynak: Climaplus, 2021)

3.1.2. Test Prosedürünün Belirlenmesi

Bu tez çalışması kapsamında uygulanan fan basınçlandırma testlerinde uygulanan tüm yöntem ve yaklaşımlar Bölüm 2.2’de irdelenen standartlara dayandırılmaktadır. Ölçüm mekanları ve ön prosedürler çoğunlukla ABBA (2016) ve Chapter Eight RESNET’e dayandırılmıştır (2013). Diğer yandan ISO 9972 (2006) tarafından Sayfa 47’de (a) – (d) olarak ifade edilen amaçlara bağlı olarak bir binanın ayrı kısımlarında ölçüm yapabilmeye yönelik bir yaklaşım geliştirebilmek amacıyla; (a) bina alt bölümlerinin sızdırmazlık değerlerini karşılaştırma ve (b) yapı kabuğundaki deformasyonları hava akış oranlarıyla ilişkilendirebilmek hedeflenmiştir.

Test Prosedürünün belirlenmesinde, ayrıca, fan basınçlandırma test ekipmanı sağlayıcısının kılavuz ve eğitimleri (TEC, 2012; TEC, 2017; TEC, 2020a) tarafından belirlenmiş kriterler de dikkate alınmıştır. Bölüm 2.2 ve Bölüm 2.3’te de belirtildiği gibi, fan basınçlandırma yöntemi genellikle küçük ölçekli konut yapılarında tüm bina ölçümleri için kullanılmıştır. Ancak bu tez çalışması kapsamında ortaya koyulan araştırma soruları ve hipotez, Bölüm 3.1.1.1’de detayları aktarılan kamu kullanımına açık bir yapının sızdırmazlığının belirlenmesine odaklanmıştır. Bu bağlamda, çalışmanın yöntemi ve binada gerçekleştirilecek test süreci bir ön ölçüm protokolü ve kesinleşmiş ölçüm protokolü üzerinden kurgulanmıştır (Şekil 3.1). İleriki bölümlerde detaylı olarak aktarılacak olan bu protokoller özellikle konut dışı yapılarda kompartıman ya da korumasız (*unguarded*) ölçüm yöntemi ile kurgulanmıştır (TEC, 2021).

Şekil 3.8’de görüldüğü gibi, tek bir hacmin kompartıman olarak ele alınması yoluyla toplam sızmanın saptanmasına yönelik çalışma yürütmek mümkün olmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle büyük ve çok sayıda birimden oluşan binalarda uygulama ve test sürecinin yönetilmesi bakımından kolaylık sağlamaktadır (TEC, 2020b). Bu testin uygulanması sürecinde binadaki diğer tüm birimlerin kapılarının kapalı olması gerekmekte ve fan basınçlandırma test ekipmanı ortak alanla ilişkili olan bir kapıya kurulabilmektedir. Kompartıman/korumasız test yönteminin temel amacı tekil birimlerde gerçekleşen toplam sızma miktarını belirleyebilmektir (TEC, 2020b).



Şekil 3.8. Kompartmanlaştırma ya da korumasız test prosedürü (TEC, 2020b).

ABAA Standardı da (2016) binada test prosedüründen önce testin binanın tümü ya da kısmi bölümlerine mi uygulanacağına karar verilmesi gerektiğinin altını çizmektedir. Bu karar aynı zamanda tekil-zon testi, birden fazla alt alanın tekil-zon olarak test edilmesi ya da izole edilmiş alt alanların bağımsız testlerin yürütülmesi konusundaki kararları da içermektedir. Ayrıca literatür araştırması sürecinde irdelenen çalışmalardan Fine vd. (2020), büyük binalarda test uygulamalarının kompartmanlar üzerinden yapılması gerektiğini vurgulamıştır. Bu bağlamda alan çalışmasının yürütüldüğü binada izole edilmiş alt alanlarda bağımsız testlerin yapılmasına (kompartıman) karar verilmiştir.

Tek bir birim üzerinde toplam sızmayı belirlemeye yönelik yürütülen kompartmanlaştırma testlerinde en karmaşık faktör tekrarlanabilir test koşullarının sağlanabilmesidir. Bu durumda özellikle verilmesi gereken karar, ortak hacmin dışarıya açık mı kapalı mı olarak ölçümün gerçekleştirildiğidir. Ortak hacmin dışarı açılması test koşullarının tekrar edilebilirliğini güçlendirebilmektedir (TEC, 2021).

Bu çalışma kapsamında tek bir fan sızdırmazlık test ekipmanı ile farklı hacimlerde yapılacak ölçümler ile tüm bina sızdırmazlık oranlarının saptanmasına yönelik test prosedürünü tanımlayacak protokollerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Test prosedüründeki ortak noktalar şu şekilde belirlenmiştir:

- Tekil hacimlerde kompartıman/korumasız test yürütülmelidir.
- Her birim için yapı kabuğu basıncı ayrı ayrı ölçülmelidir.

- Tüm hacimlerde basınçlandırma ve basınçsızlaştırma testlerinin her ikisi de yürütülmelidir.
- Ölçüm ekipmanındaki A kanalı ile yapı kabuğu basıncı ölçülmelidir.
- Ölçüm ekipmanındaki B kanalı ile fan basıncı ölçülmelidir.

Kompartıman testi yapılırken tekil-zon durumunun sağlanması önem taşımaktadır. Test sırasında, test alanı içindeki herhangi iki konum arasındaki indüklenen basınçtaki maksimum fark, indüklenen yapı kabuğu basıncının %10'undan fazla değilse, tek bölge koşulu mevcut olarak kabul edilmektedir (ABAA, 2016). Ölçüm prosedürü belirlenirken bu kriter de göz önüne alınmış, 50Pa basınç uygulanan testlerde ölçüm yapılan mekanın komşu mekanlarında %10'undan fazla basınç farkı oluşmadığı gözlenmiş dolayısıyla komşu hacimlerin kapıları kapalı olarak yapılan ölçümler esnasında, ölçüm yapılan mekanların tekil zon olarak davrandığı da saptanmıştır.

Prosedürün geliştirilmesi sürecinde yapılan ön testler, bazı mekanlarda 15Pa altında basınç indüklenemediğini ortaya koymuştur, bu nedenle bu tez çalışması kapsamında **çoklu-nokta ölçüm yöntemi** benimsenmiştir (Chapter Eight RESNET, 2013). Diğer yandan, ASTM E779 (2003) ve ISO 9972 (2006) çoklu-nokta testi dışında bir ölçüm prosedürü kabul etmemektedir. Değerlendirme kriteri olarak bu standartların belirlediği ölçütler göz önüne alınmaktadır ve bu tez kapsamında çoklu-nokta ölçüm prosedürlerinin benimsenmesi yoluyla çalışmanın doğruluk düzeylerinin artırılması amaçlanmıştır.

Ölçüm cihazları ABAA (2016) standardının önerdiği ölçüm hassasiyetlerine sahiptir. Basınç ölçüm cihazının 0.1Pa çözünürlüğünde, sıcaklık ölçümü yapılan cihazların ise $\pm 2^{\circ}\text{C}$ (4°F) doğruluk düzeyinde ölçüm yapmaktadır. Ayrıca ABAA Standardı (2016) tarafından önerilen mekansal örnekleme prosedürü ve binaya özel test planı tez çalışması kapsamında geliştirilmiş ve 3.1.2 bölümünde raporlanmıştır.

Tez çalışması kapsamında yürütülen tüm sızdırmazlık testi uygulamalarında aşağıdaki ortak adımlar uygulanmıştır:

- Yapı kabuğu basıncını ölçmek için tek fanlı Minneapolis Blowerdoor Model 3 ve TECLOG4 yazılımı kullanılmıştır.

- 12 adet Testo 174 veri kaydedici cihaz ile sızdırmazlık ölçümünün yapıldığı birim ve çevreleyen diğer birimlerin sıcaklık ve nem profilleri 10 dakikalık aralıklarla ölçüm öncesi, süresince ve sonrasında kaydedilmiştir.
- Tüm ölçümler süresince, ölçüm yapılan binanın karşısında bulunan bir başka binanın çatısında konumlandırılmış DavisPro Vantage hava istasyonu aracılığıyla 10 dakikalık aralıklarla mikroklimatik veriler kaydedilmiştir.
- Testo 480 ile çevreyelen hacimlerde basınç ölçümleri manuel okuma ile yapılmıştır.

Yapılan tüm ölçümlerde ortak olan bir dizi sınır koşullu belirlenmiştir ve uygulanmıştır:

- Ölçüm yapılan hacimlerin komşu hacimlerinde dışa açılan tüm pencereler kapalı tutulmuştur.
- Ölçüm yapılan tüm hacimlerin her katta ortak koridora açılan hacimler olması gerekmektedir.
- Cephe hattının ortasına yakın olan alanlar örneklem olarak seçilmiştir. Bina köşelerine yakın hacimlerde basınç ölçümü yapılması hatalı sonuçlar verebileceği için cephe ortasına yakın konumlarda ölçüm yapılmıştır. (Şekil 2.6; ASTM E779, 2003).

Test prosedürlerine ait genel çerçeve bu bölümde tanımlanmış olup, diğer bölümlerde bu bölüme atıfla detaylara yer verilecektir.

3.1.3. Test Geçerlilik Kriterlerinin Belirlenmesi

Ölçümlerin geçerliliğinin sağlanabilmesi için standartlarca belirlenen bazı ön kontroller yapılmıştır. Test uygulama öncesi ve sürecinde aşağıda raporlanan ve yöntem kurgusunun bir parçası olarak sunulan geçerlilik kriterleri kabul edilmiştir.

Bu kriterlerden ilki denetleme ve veri toplama dışında kalan test öncesi kontrol süreçlerine ilişkindir ve iç ve dış sıcaklık farkının tespit edilmesinde Denklem 2.11 (Sayfa 44), ASTM E779'a (2003) bağlı kalarak kullanılmıştır. Her test, iç ve dış sıcaklık farkının ya da cephe boyutlarının ölçüme uygunluğu ve baca etkisinin oluşmadığından emin

olunduktan sonra uygulanmıştır. Denklem 2.11, dış ve iç sıcaklık farkının mutlak değerinin cephe yüksekliği ile çarpılmasında elde edilen sonucun 200 m°C'den küçük olması gerektiğini önermektedir. Çizelge 3.2'de ön ölçüm ve kesinleşmiş ölçüm protokolü kapsamında yürütülmüş olan tüm testlerin ölçülen iç ve dış sıcaklık farkı ve cephe yüksekliği bağıntısında baca etkisi oluşturmadığı, yürütülen ölçümlerin ön koşullarının test geçerliliğini etkilemediği saptanmıştır. Benzer bir ön kriter ISO 9972 (2006) tarafından da tanımlanmıştır, dolayısıyla ölçüm koşulları ISO 9972'ye de (2006) uygundur.

Diğer iki kriter olan ve ASTM E779 (2003) tarafından belirlenen ölçüm koşullarından 0-2 m/s aralığındaki rüzgâr hızı ve 5-35°C aralığındaki dış sıcaklık şartlarının sağlandığı da Çizelge 3.2'de görülmektedir.

Çizelge 3.2. Ölçüm koşullarının ön kontrolü (ASTM E779, 2003; ISO 9972, 2006)

	Ölçüm kodları	Rüzgâr hızı (m/s)	T _{dış} (°C)	T _{iç} (°C)	(t _{dış} -t _{iç})xh _{bina} (7.4 m)
ÖN ÖLÇÜM PROSEDÜRÜ	M01Y	1,17	11,17	26,81	115,736
	M02Y	1,50	12,86	27,05	105,006
	M03Y	1,93	11,16	27,15	118,326
	M04Y	1,33	12,66	27,12	109,964
	M05Y	1,93	10,93	26,92	107,966
	M06Y	1,20	12,60	27,19	119,066
	M07Y	1,80	11,10	27,19	106,634
	M08Y	0,90	12,90	27,31	133,126
	M01G	1,03	8,86	26,85	112,332
	M02G	0,40	13,63	28,81	121,582
	M03G	1,80	10,90	27,33	117,438
	M04G	2,06	13,00	28,87	126,984
	M05G	1,63	9,86	27,02	112,184
	M06G	1,00	13,70	28,86	121,656
	M07G	1,80	10,66	27,10	105,746
	M08G	1,60	14,40	28,69	112,295
KESİNLEŞMİŞ ÖLÇÜM PROSEDÜRÜ	101P	1,90	9,12	24,30	107,855
	101D	2,35	9,42	24,00	51,541
	102P	0,65	18,72	25,69	55,648
	102D	0,56	18,56	26,08	62,974
	108P	0,73	17,56	26,07	69,634
	108D	1,03	16,93	26,34	85,063
	201P	0,65	14,12	25,62	65,638
	201D	0,73	16,93	25,80	64,639
	202P	1,67	14,82	23,56	74,185
	202D	1,45	13,47	23,50	41,07
	206P	0,90	17,46	23,01	30,969
	206D	1,00	19,02	23,21	59,681
	208P	1,10	15,52	23,59	70,744
	208D	0,73	13,76	23,32	107,966

Çizelge 3.2'de görülen ön ölçüm prosedürüne ait M04G kodlu ölçüm ve kesinleşmiş ölçüm prosedürüne ait 101D kodlu ölçümde rüzgâr hızının 2 m/s sınır değerden (ASTM

E779, 2003) fazla olduğu görülmektedir. M04G kodlu ölçüm için bu değer ihmal edilebilir düzeydedir. Ancak 101D kodlu ölçüm için kısmen fazladır. Ancak ISO 9972'nin (2006) yere yakın rüzgâr hızının 3 m/s'yi aşması, meteorolojik rüzgâr hızının 6 m/s'yi aşması ya da Beaufort ölçeğinde 3'e ulaşması halinde ölçüme uygun sıfır akış basınç farkının elde edilmesi olası değildir ifadesi göz önüne alındığında 101D kodlu ölçümde de rüzgâr hızı geçerli test koşulları bakımından kabul edilebilir düzeyde olarak değerlendirilmiştir.

Ölçüm sürecinde ASTM E779 (2003) ve ISO 9972 (2006) tarafından testlerin geçerli olmasının en önemli ön koşullarından biri olarak kabul edilen ve sıfır fan basıncında *referans değer kaydı* hem ölçüm öncesi hem ölçüm sonrası alınmıştır (Çizelge 2.5 ve Çizelge 2.7). Sıfır akış basınç farkı 5Pa'dan büyük olması durumunda testin geçerli olmadığı beyan edileceği ISO 9972'ye (2006) göre kabul edilmiştir. İndüklenen basınç aralığı 10Pa – 50Pa arasında olacak şekilde uygulanmıştır (ASTM E779, 2003; ISO 9972, 2006).

Ölçüm sonrasında verilerin değerlendirilmesinde yine ASTM E779 (2003) ve ISO 9972 (2006) tarafından kabul edilen ağırlıklandırılmamış regresyon aracılığıyla veriler analiz edilmiştir. Kullanılan Minneapolis Blower Door Model 3 ile birlikte kullanılan TECLOG 4 yazılımı bu analizi ölçüm sonucunda sunmaktadır. Akış üs değerleri de (*flow exponent*) ölçüm sonucunda bu yazılımdan elde edilmektedir. ASTM E779 (2003) akış üs değerinin $n < 0.5$ ya da $n > 1.00$ ise testin geçersiz olduğunu ifade etmektedir. Bu veri, gerektiğinde hatalı ölçümler devre dışı bırakılmak üzere her ölçüm için kontrol edilmiştir. Yine ASTM E779'a göre (2003), korelasyon katsayısı, $r^2 < 0.99$ ise testte belirli problemlerin olduğu düşünülmektedir. Bu veri de bir değerlendirme kriteri olarak belirlenmiştir.

Sızdırmazlık verileri Çizelge 2.1'de sunulan (Sayfa 29) değerlere uygun olarak değerlendirilmiştir (TEC, 2017):

- 0.0 – 1.5 ACH: İleri düzeyde sızdırmaz
- 1.5 – 3.0 ACH: Sızdırmaz
- 1.0 – 5.0 ACH: Kısmen sızdırmaz
- 5.0 – 7.0 ACH: Oldukça sızdıran
- 7.0 – 10.0 ACH: İleri düzeyde sızdıran

Ayrıca Çizelge 2.2’de (Sayfa 29) sunulmuş olan soğuk iklim bölgeleri için 50Pa basınç farkında ölçülen ACH değerinin 3’ten küçük olması da değerlendirme kapsamında ele alınmıştır.

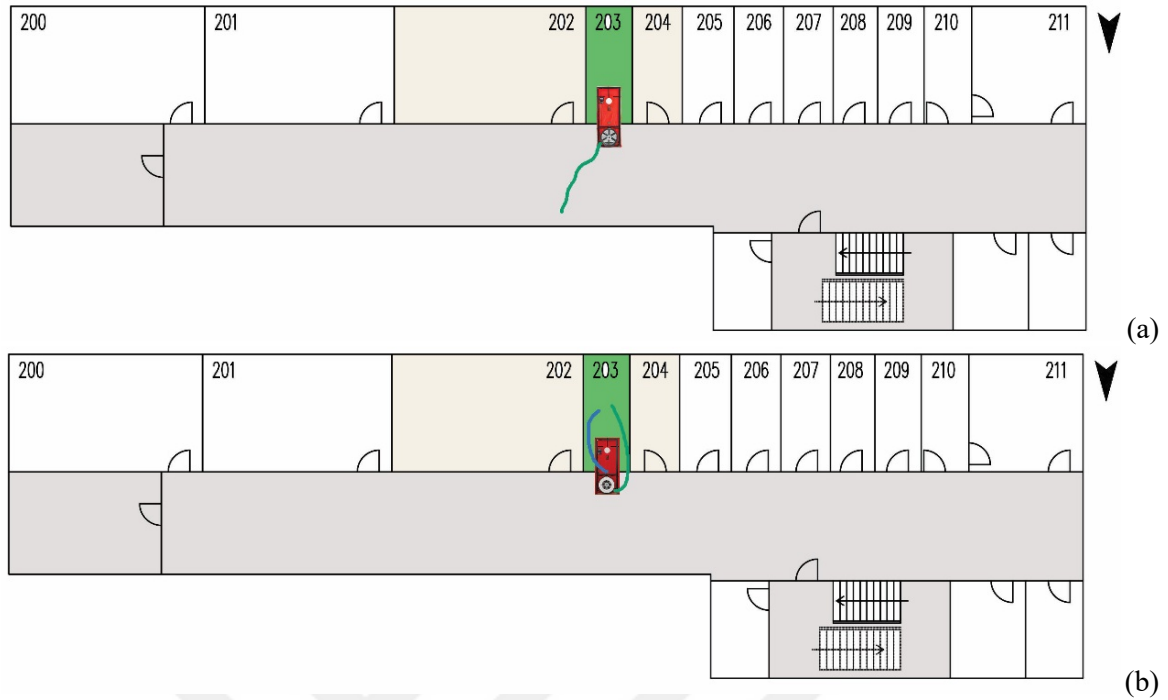
Test geçerliliği ve sonuçların değerlendirilmesine ilişkin çerçeve bu bölüm kapsamında çizilmiş olup, bulguların tartışılması süreci bu alt bölüme referansla yürütülmektedir.

3.2. Ön Ölçüm Protokolü (Faz 1)

“Ön Ölçüm Protokolü (Faz 1)” kapsamında kesinleşmiş ölçüm protokolünde kullanılacak yaklaşımı belirlemek amaçlanmıştır (Şekil 3.1). Farklı sınır durumları kapsamında farklı ölçüm yöntemlerinin irdelenebilmesi için bir ön ölçüm protokolü önerilmiş ve bu ön ölçüm protokolünün uygulanabilmesi için bir mekân belirlenmiştir. Detaylı bilgiler 3.2.1 ve 3.2.2 bölümlerinde aktarılmaktadır.

3.2.1. Ön Ölçüm Mekanının Belirlenmesi

Tüm bina sızdırmazlık değerinin saptanmasında kullanılacak olan kesinleşmiş ölçüm protokolünün belirlenebilmesi için temsili hacim olarak 203 kodlu ofis hacmi seçilmiştir (Şekil 3.9). Bu hacmin ön ölçüm protokolü için seçilmesinin temel amacı yapının güney cephesinin yaklaşık ortasında bulunması, dolayısıyla ön sızdırmazlık ölçümlerinde olabildiğince bina köşelerine yaklaşmaya bağlı olarak ortaya çıkabilecek basınç farklılıklarından kaynaklı hata payını azaltmaktır. Bu ofis mekanı Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi net taban alanı 9.3 m^2 , kat yüksekliği 3.1 m , etkin cephe alanı 5.89 m^2 , hacmi 28.83 m^3 ’tür. Toplam pencere alanı 2.97 m^2 , pencere çevresi 6.9 m , açılan kanat pencere çevresi 3.5 m dir. Yapının deniz seviyesinden yükseklik 851 m ’dir.



Şekil 3.9. Ön ölçüm protokolü için seçilen 203 kodlu mekân, (a) basınçsızlaştırma testi kurgusu, (b) basınçlandırma testi kurgusu

3.2.2. Ön Ölçüm Protokolünün Geliştirilmesi ve Uygulanması

Ön ölçümler ve kesinleşmiş ölçümlerin tümünde fan basınçlandırma testleri için Minneapolis Blower Door Model 3 kullanılmıştır (Şekil 3.10). Fan basınçlandırma testi ile sızdırmazlık düzeyi saatlik olarak nicel hava değişimi üzerinden ölçülmüştür. Minneapolis Blower Door Model 3 bilgisayar tarafından kontrol edilen ve bina hava sızdırmazlığını belirlemek için kullanılan basınçlandırma/basınçsızlaştırma test ekipmanıdır ve ölçüm ve veriler TECLOG 4.0 yazılımı kullanılarak yürütülmekte ve analiz edilmektedir (TEC, 2020).

Minneapolis Blower Door Model 3, 3/4 beygir gücünde bir AC motora sahiptir ve bu motora bağlı olan fan aracılığıyla hava akışı sağlanmaktadır (Şekil 3.10, a ve c). Akış oranları bir basınç ölçüm aygıtı tarafından manuel olarak ya da bilgisayar üzerinden kontrol edilebilmektedir (Şekil 3.10, a ve b). Fan çalışır haldeyken hava fanın içeriye bakan yönünde çekilir (Şekil 3.10, c ve d) ve diğer yönden tahliye edilir. Uygulanacak basınç farklarını yönetebilmek amacıyla A, B, C, D ve E olarak adlandırılan farklı akış halkaları kullanılmaktadır (Şekil 3.10, d) (TEC, 2020).



Şekil 3.10. Fan basınçlandırma test ekipmanı: (a) Minneapolis Blower Door Model 3, (b) basınç ölçüm ağı, (c) fan, (d) hava akış halkaları (TEC, 2020)

Şekil 3.9’da görülen akış halkalarının (d) kullanımına bağlı olarak uygulanabilecek hava akış aralıkları Çizelge 3.3’te görülmektedir. Fan akışı okumalarında en yüksek doğruluk, gereken akış oranının sürekli olarak sağlanabilmesi ile ilişkilidir ve akışın sürekliliğinin sağlanması için daha küçük açıklıklı akış halkalarına gereksinim duyulabilmektedir (TEC, 2020).

Çizelge 3.3. Minneapolis Blower Door M3 için farklı halkalarına ait akış aralıkları (TEC, 2020).

Fan Akış Aralıkları	
Akış Halkası	Akış aralığı (CFM)
Açık (akış halkası yok)	6100 – 2435
Halka A	2800 – 915
Halka B	1100 – 300
Halka C (isteğe bağlı)	330 – 85
Halka D (isteğe bağlı)	115 – 30
Halka E (isteğe bağlı)	45 – 11

Yapı sızdırmazlığı ölçümlerinde kullanılan deney düzeneğinin kurulumu Şekil 3.11’de sunulmaktadır. Test ekipmanının kurulumu, ölçüm yapılacak mekânın kapı çerçevesine ayarlanabilir bir kasanın kurulmasıyla başlamaktadır. Daha sonra bu kasa üzerine hava geçirmez bir naylon kumaş sabitlenmektedir. Bu naylon kumaş üzerindeki dairesel açıklığa fan sızdırmaz bir biçimde yerleştirilir.



Şekil 3.11. 203 no’lu hacme kurulan Minneapolis Blower Door 3 test düzeneği (a) basınçsızlaştırma testi – fan/cihaz içeride, (b) basınçlandırma testi – fan/cihaz dışarıda

Şekil 3.9’da görülen 203 no’lu hacimde yürütülecek olan ön ölçüm protokolüne ait senaryolar Çizelge 3.4’te sunulmaktadır. Ön ölçüm protokolü kesinleşmiş ölçüm protokolünde kullanılacak olan sınır koşullarını kesinleştirmek amacıyla üç temel yaklaşımın kombinasyonlarının test edilmesine yönelik olarak kurgulanmıştır. Ön ölçüm protokolü temelde:

(a) Kompartıman testlerinde değerlendirilmesi gereken, ortak hacmin dışarıya açık mı kapalı mı olarak ölçümün gerçekleştirildiği, ortak hacmin dışarı açılmasının test koşullarının tekrar edilebilirliğini güçlendirebildiği (TEC, 2021) savını test edebilmek amacıyla *bina/koridor kapılarının açık ya da kapalı* olduğu;

(b) Hong ve Kim'in (2018) ve Šadauskienė vd.'nin de (2016) çalışmalarında uyguladığı gibi elektrik armatürlerinin sızdırmazlık ölçümlerine etkisini test edebilmek amacıyla, **elektrik armatürlerinin sızdırmaz hale getirilmesi ya da olduğu gibi bırakılması** (Şekil 3.12);

(c) Basınçlandırma ve basınçsızlaştırma testlerinin her ikisinin ölçüm yapılan mekânda yapılabilmesi için **basınç ölçüm aygıtı ve fanın mekânın içinde ya da dışında konumlanması** (Şekil 3.11) gibi üç kategoride tanımlanabilecek ölçüm kriterlerinden en etkin olan kombinasyonun saptanması ve kesinleşmiş ölçüm protokolünde bu kombinasyonun uygulanması amacıyla oluşturulmuştur.



Şekil 3.12. 203 no'lu hacimde yapılan ölçümlerde (a) elektrik armatürlerinin sızdırmaz hale getirildiği, (b) elektrik armatürlerinin olduğu gibi bırakıldığı durum

Çizelge 3.4'te görüldüğü gibi M01 ve M08 kodları ile ifade edilen 8 farklı ölçüm ayrı iki günde (yağmurlu gün ve güneşli gün, kodlara Y ve G olarak eklenmiştir) uygulanmıştır. Bu ölçümlerde, KP0 bina/koridor kapıları/koridor pencerelerinin kapalı olduğu, KP1 bina/koridor kapıları/koridor pencerelerinin açık olduğu, E0 elektrik armatürlerinin sızdırmaz hale getirildiği, E1 elektrik armatürlerinin olduğu gibi bırakıldığı, AF0 basınç ölçüm aygıtı ve fanın ölçüm yapılan mekânda içeride olduğu (basınçsızlaştırma testine karşılık gelen ölçüm yaklaşımı) ve son olarak AF1 basınç ölçüm aygıtı ve fanın ölçüm yapılan mekânda dışarıda olduğu (basınçlandırma testine karşılık gelen ölçüm yaklaşımı) ölçüm olasılıkları arasında kombinasyonlar oluşturulmuştur.

Çizelge 3.4'te görülen M01, M03, M05 ve M07 kodlu ölçümler AF0 basınç ölçüm aygıtı ve fanın ölçüm yapılan mekânda içeride olduğu için basınçsızlaştırma testleri uygulanmış ve bu senaryolardan M01 ve M03 dış ortamla bağlantısız olarak 203 no'lu hacmin test edilmesine odaklanmış, iki senaryo arasındaki tek fark elektrik armatürlerinin sızdırmaz hale getirilmesi ve olduğu gibi bırakılması olarak ele alınmıştır. M05 ve M07 kodlu ölçümlerde ise yine basınçsızlaştırma testi, bina/koridor kapıları/koridor

pencerelerinin açık olarak, diğer bir deyişle ortak hacimlerin dış mekân gibi davranmaya şartlandırıldığı koşullarda ölçüm gerçekleştirilmiştir. M05 ve M07 arasındaki temel farklılık da elektrik armatürlerinin sızdırmaz hale getirilmesi ve olduğu gibi bırakılmasıdır.

Çizelge 3.4'te görülen M02, M04, M06 ve M08 kodlu ölçümler AF0 basınç ölçüm aygıtı ve fanın ölçüm yapılan mekânın dışında koridora yönelmiş olarak basınçlandırma testlerinin yapıldığı senaryolardır. Bu senaryolardan M02 ve M04 bina/koridor kapıları/koridor pencerelerinin kapalı olarak 203 no'lu hacmin test edilmesine odaklanmış, iki senaryo arasındaki tek fark elektrik armatürlerinin sızdırmaz hale getirilip getirilmediğidir. M06 ve M08 kodlu ölçümlerde ise yine basınçsızlaştırma testi, bina/koridor kapıları/koridor pencerelerinin açık, diğer bir deyişle ortak hacimlerin dış mekân gibi davranmaya şartlandırıldığı koşullarda basınçlandırma testleri yürütülmüştür. M06 ve M08 arasındaki temel farklılık da elektrik armatürlerinin sızdırmaz hale getirilip getirilmediğidir.

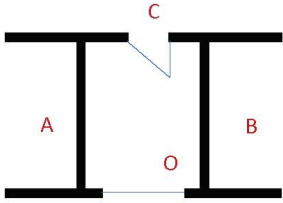
Çizelge 3.4. Ön ölçüm protokolü kapsamında test edilen sınır koşulları

Ölçüm No	Ön Ölçüm Sınır Koşulları (Olasılıklar)						Senaryo
	Bina / Koridor Kapıları / Koridor Pencereleri Kapalı (KP0)	Bina / Koridor Kapıları / Koridor Pencereleri Açık (KP1)	Elektrik Armatürleri Kapatılmış (E0)	Elektrik Armatürleri Kapatılmamış (E1)	Basınç Ölçüm Aygıtı / Fan İçeride (AF0)	Basınç Ölçüm Aygıtı / Fan Dışarıda (AF1)	
M01	x		x		x		KP0/E0/AF0
M02	x		x			x	KP0/E0/AF1
M03	x			x	x		KP0/E1/AF0
M04	x			x		x	KP0/E1/AF1
M05		x	x		x		KP1/E0/AF0
M06		x	x			x	KP1/E0/AF1
M07		x		x	x		KP1/E1/AF0
M08		x		x		x	KP1/E1/AF0

Bu ölçümlerin yağmurlu ve güneşli ayrı iki günde tekrarlanmasının temel amacı, testlerin hava koşullarından etkilenme düzeylerini saptamak ve belirli bir hata payının belirlenmesi durumunda bu hata payını kesinleşmiş ölçüm protokolünde, gerektiği durumlarda bir düzeltme aracı olarak kullanmaktır.

Diğer yandan, ölçümlerin Bölüm 3.1.2 ve 3.1.3'te belirlenmiş olan kriterlere bağlı olarak yönetilebilmesini sağlayacak bir kontrol listesi oluşturulmuştur. Bu kontrol listesi sayesinde ölçüm prosedüründe manuel düzenlemelere dayalı veri kaybı ve hatalı

uygulamaların olabildiğince bertaraf edilmesi amaçlanmıştır. Kontrol listesi hem ön ölçüm hem de kesinleşmiş ölçüm protokolünde kullanılmıştır. Şekil 3.13’de görülen kontrol listesinin ilk sayfasında Adım 1 olarak tanımlanan kısımda, ölçüm yapılan mekâna (O) ve çevreleyen mekanların (A, B ve C) her birine sıcaklık ve nem ölçen 3 adet Testo 174 veri kaydedici cihazın yerleştirilmesi ve seri numaralarının kaydedilmesi gerekmektedir. Bu cihazlardan elde edilen verilerin, ölçüm sürecindeki ortalamaları alınmış ve bulguların irdelenmesi kapsamında bu ortalamalar değerlendirmeye alınmıştır.

Ölçüm Kodu:		Dosya Adı:		Tarih:				
Adım 1: Çevreleyen mekanlara Isı/Nem kaydedicilerin yerleştirilmesi								
				O				
				A				
				B				
				C				
Adım 2: Testo 480 iç mekan basınç okumaları (Manuel)								
A	 / / / / / / / / /							
B	 / / / / / / / / /							
C	 / / / / / / / / /							
Adım 3: Blowerdoor Test Kurgu								
Koridor Kapı / Pencere	Açık	☐	Elektrik Prizleri	Açık	☐	Fan Pozisyonu	İçeride	☐
	Kapalı	☐		Kapalı	☐		Dışarıda	☐
Adım 4: Ölçüm								
ÖNEMLİ NOTLAR	(1) Ölçüm yapılan mekanın pencereleri her zaman kapalı olacak							
	(2) Fan / gauge dışarıda (koridora bakarken) yapılan ölçümlerde, ölçüm yapılan mekan "PRESSURIZE" edilecek.							
	(3) Fan /gauge içeride yapılan ölçümlerde, ölçüm yapılan mekan "DEPRESSURIZE" edilecek.							
PARAMETRE KONTROLÜ	Pressurize? (+Pa)		Evet	☐				
	Depressurize? (-Pa)		Evet	☐				
	Pre Baseline alındı mı?		Evet	☐				
	Pre Baseline değerine göre uygulanacak Pa (+/- dikkat edilerek) normalize edildi mi?		Evet	☐				
	Uygulanması gereken basınç aralıkları (FAN Por) ile kaydedilecek		75 Pa	☐				
			60 Pa	☐				
			50 Pa	☐				
			40 Pa	☐				
			30 Pa	☐				
			20 Pa	☐				
		10 Pa	☐					
		5 Pa	☐					
Post Baseline alındı mı?		Evet	☐					
Results Tab kontrol edilip korelasyon kontrol edildi mi?		Evet	☐					
Dosya ölçüm ismiyle birlikte kaydedildi mi?		Evet	☐					

Şekil 3.13. Ölçüm kontrol listesi, ön sayfa

Kontrol listesinin ikinci adımı ikinci bir kişinin ölçüm esnasında A, B ve C mekanlarında kısa süreli giriş çıkış yaparak Testo 480 cihazından yapılan manuel basınç okumalarının kaydedilmesi için düzenlenmiştir (Şekil 3.13). Kontrol listesinin üçüncü adımı ise Çizelge 3.4’te kurgulanmış olan senaryoların doğru uygulanmasına yönelik bir düzenlemedir. Ölçüm sürecinde ön kontroller dördüncü adım kapsamında belirlenmiş ve parametrelerin tek tek kontrol edilebilmesine yönelik olarak düzenlenmiştir (Şekil 3.13).

Ölçüm Kodu:	Dosya Adı:	Tarih:
Adım 5: Gözlem / Ölçüm		
Notlar: Planlara İşlenen Mekan Kodu:		
Eskizler / Fotoğraflama*		
Çatlaklar / boyut / vb. (Saptamak için bir çubuğa bağlı streç film kullanılabilir)		

*Fotoğraflara mekan kodları verilmeli

Şekil 3.14. Ölçüm kontrol listesi, arka sayfa

Şekil 3.14'te görülen kontrol listesinin arka sayfası ölçüm sürecindeki öznel değerlendirilmelerin not edilmesi, yapı kabuğundaki hava akış çatlak uzunluklarının folyo testi ile saptanması, uzunlukların not edilmesi, ilgili fotoğraflama ve eskizlerin belgelenmesi amacıyla düzenlemiştir.

Bu alt bölümde özetlenen kapsam ve yöntemlere bağlı olarak **ön ölçüm protokolü** 19 Nisan 2021 (yağmurlu gün – M01Y-M08Y – 8 ölçüm) ve 20 Nisan 2021 (güneşli gün – M01G-M08G – 8 ölçüm) tarihlerinde toplam 16 ölçüm ile tamamlanmıştır.

3.3. Ön Ölçüm Protokolünün Değerlendirilmesi (Faz 2)

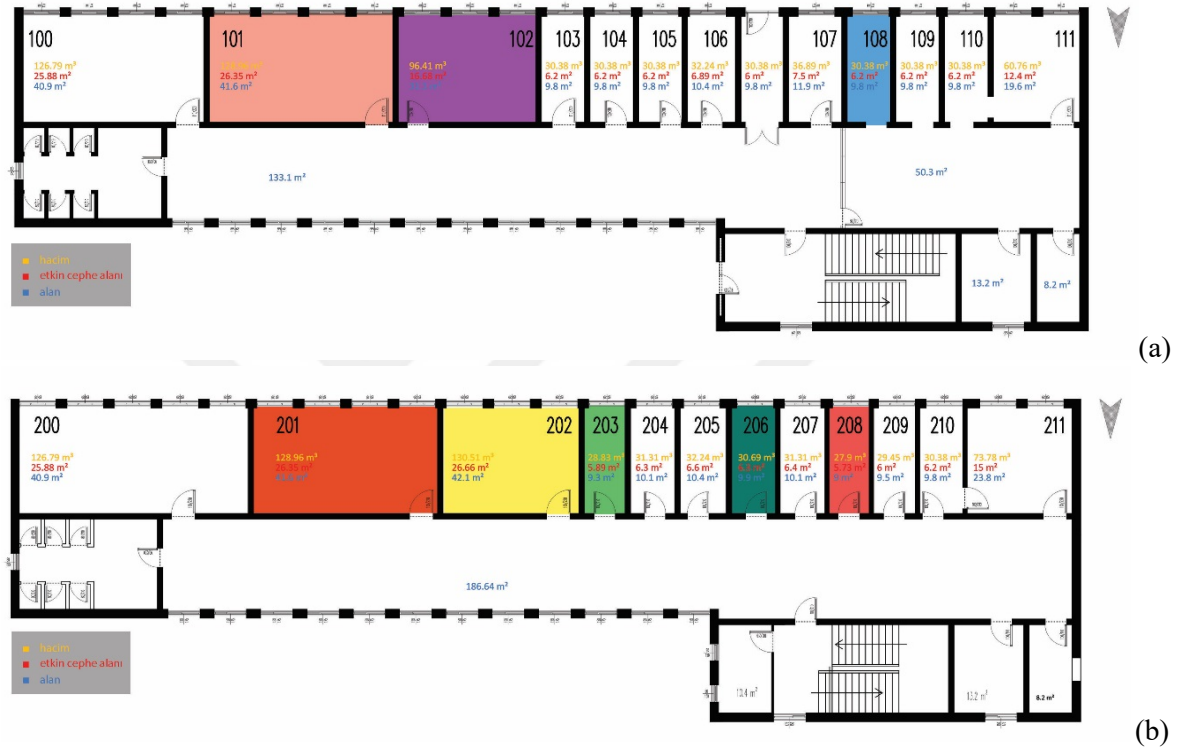
Ön ölçüm protokolü tamamlandıktan sonra, kesinleşmiş ölçüm protokolüne başlanabilmesi için, Çizelge 3.4'te kurgulanmış olan senaryolardan en güvenilir ölçüm sonuçlarını veren kombinasyon ya da kombinasyonların saptanabilmesi için veriler değerlendirilmiştir. Verilerin değerlendirilmesinde Bölüm 3.1.3'te belirlenen değerlendirme kriterleri dikkate alınmıştır. Ön ölçüm protokolünün değerlendirilmesi Bulgular bölümünde tartışılmaktadır.

3.4. Kesinleşmiş Ölçüm Protokolünün Uygulanması (Faz 3)

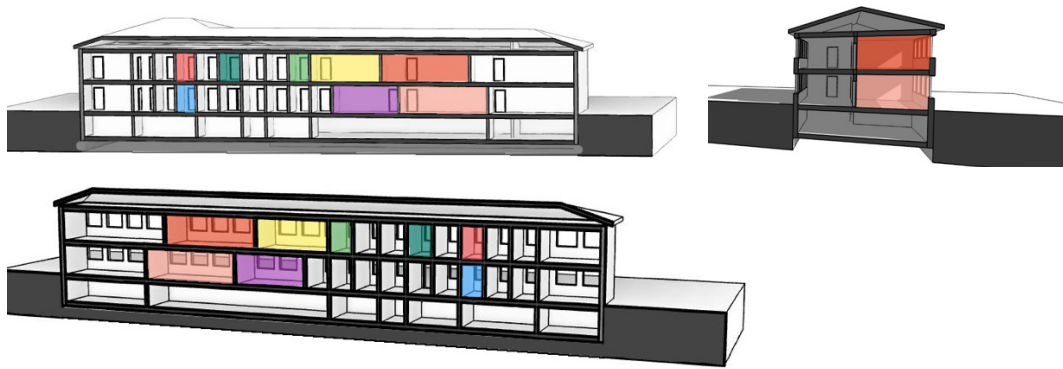
Ön ölçüm protokolünden elde edilen verilere bağlı olarak, kesinleşmiş ölçüm protokolünde; (a) ölçüm yapılan hacimlerde bulunan tüm pencereler kapalı, (b) ölçüm yapılan mekanın açıldığı ortak koridordaki tüm pencerelerin ve bina kapısının açık olduğu, (c) elektrik armatürlerinin olduğu gibi bırakıldığı test koşulları tüm ölçümlere uygulanmıştır. Kesinleşmiş ölçüm protokolünde basınçlandırma ve basınçsızlaştırma testlerinin verilerin güvenilirliği bakımından (ASTM E779, 2003; ISO 9972, 2006) uygulanmasına karar verilmiştir. Şekil 3.12 ve 3.13'te belirlenen tüm kontrol ve ölçüm koşulları kesinleşmiş ölçüm protokolündeki testlerde de uygulanmıştır.

Kesinleşmiş ölçüm protokolü için seçilen mekanlar Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da sunulmaktadır. Bu mekanların seçimi, cephe kenarlarına yaklaşımsızın benzer hacimlerde

zemin ve birinci katta temsili nitelikte olma durumu değerlendirilmiştir. Birinci katta toplam 3 mekanda (101: derslik, 102: derslik, 108: ofis), ikinci katta da toplam 5 mekanda ölçüm yapılmıştır (201: derslik, 202: derslik, 203: ofis, 206: ofis, 208: ofis). 203 mekanındaki ölçümler tekrar edilmemiş, ön ölçüm protokolünde tamamlanan ölçümler dikkate alınmıştır. Tüm 8 mekan için toplam 16 ölçüm tamamlanmıştır (basınçlandırma – *pressurization*, *P* ve basınçsızlaştırma – *depressurization*, *D*).



Şekil 3.15. Kesinleşmiş ölçüm protokolünün yürütüldüğü hacimler, (a) birinci kat, (b) ikinci kat



Şekil 3.16. Kesinleşmiş ölçüm protokolünün yürütüldüğü hacimler, kesit görünüş temsilleri.

Kesinleşmiş ölçüm protokolüne ait basınçlandırma testlerinden bir görünüm Şekil 3.17’de sunulmaktadır. Şekil 3.16 TECLOG 4.0 programının ölçüm ara yüzünü ve manuel basınç okumalarının yapıldığı Testo 480 cihazı da görülmektedir.



Şekil 3.17. Kesinleşmiş ölçüm protokolü, örnek basınçlandırma ölçümü

Bulgular bölümünde kesinleşmiş ölçüm protokolü kapsamında yürütülen tüm testlere ait veriler Bölüm 3.1.2 ve 3.1.3’te belirlenmiş kriterler üzerinden kapsamlı olarak tartışılmaktadır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasının yöntem bölümünde tanımlanan tüm sınır koşulları, ölçüm prosedürleri ve değerlendirme kriterleri kapsamında yürütülen ön ölçüm protokolü ve kesinleşmiş ölçüm protokolüne ait bulgular alt bölümlerde tartışılmaktadır. Karşılaştırmalı irdelemeler ve öznel gözlemlerin sayısal verilerle olan ilişkisinin saptanmasına ilişkin yürütülen çalışmalar da bulgular bölümünde sunulmaktadır.

4.1. Ön Ölçüm Protokolüne ait Bulgular

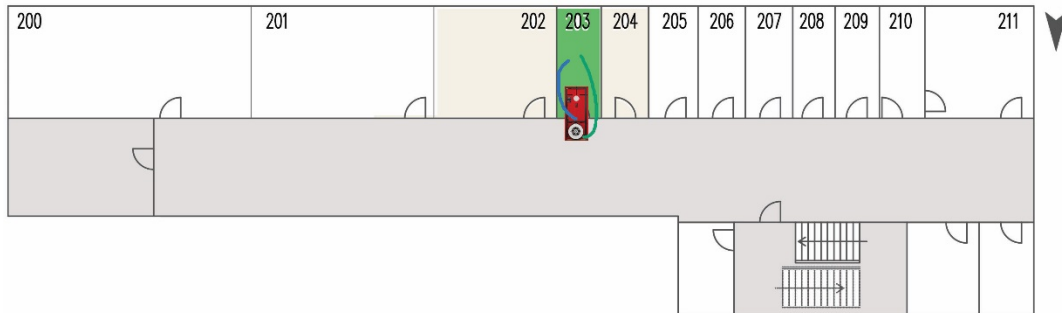
Ön ölçüm protokolü kapsamında yürütülen testlere ait detaylı bilgiler her ölçüme özel bir alt başlıkta ele alınmaktadır. Ön ölçüm protokolündeki bulguların değerlendirilmesine ilişkin ortak noktalar şöyle özetlenebilir:

- Ölçüm yapılan hacim, komşu hacimler ve koridora her mekan için 3 adet olmak üzere ısı ve nem kaydedici Testo 174 cihaz yerleştirilmiştir. Ortam iç sıcaklıkları bu cihazla 10 dakikalık aralıklarla kaydedilen verilerin ölçüm saatlerindeki ortalaması alınarak elde edilmiştir.
- Dış hava koşullarına ilişkin mikroklimatik veriler (rüzgar hızı - m/s, dış sıcaklık - °C, dış hava basıncı - Pa) ölçüm yapılan binanın karşısında bulunan bir başka binanın çatısında konumlandırılmış DavisPro Vantage hava istasyonu aracılığıyla 10 dakikalık aralıklarla kaydedilmiştir. Bu veriler, 10 dakikalık aralıklarla kaydedilen ölçüm saatlerindeki ortalama alınarak kesinleştirilmiştir.
- Ölçüm yapılan hacimlerin komşu hacimlerine ait iç mekan basınç ölçümleri Testo 480 kullanılarak manuel olarak kaydedilmiş ve ortalaması alınmıştır.
- Ön ölçüm protokolünde uygulanacak tüm testlerden önce 10Pa alt sınır 50Pa üst sınır olmak üzere alt ve üst indüklenmiş basınç değerleri test edilmiştir.
- Tüm basınçlandırma ve basınçsızlaştırma testlerinde ölçüme başlamadan önce sıfır fan akışında ön referans değer (*pre-baseline*) ve ölçüm sonunda koşulların değişmediğini kontrol edebilmek ve ölçümü kabul edebilmek amacıyla sıfır fan akışında son referans değer (*post-baseline*) ölçümleri 120 sn süreyle TECLOG 4.0

yazılımı ile yapılmıştır. TECLOG 4.0 ön ve son referans değerlerin ortalamasını vermektedir.

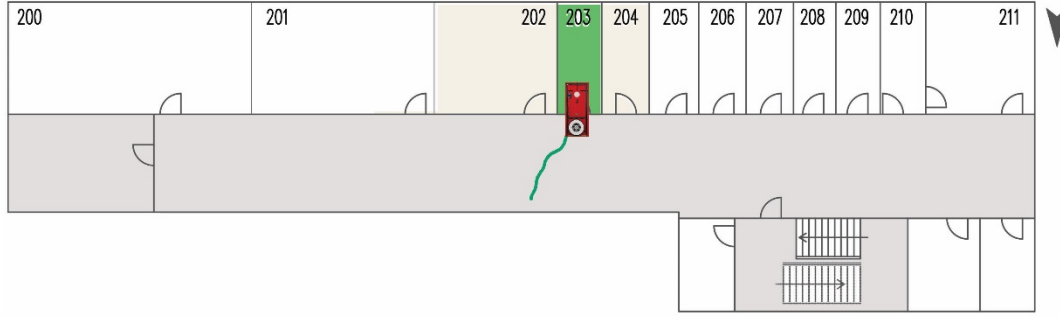
- TECLOG 4.0 tarafından 120 saniyelik ortalama olarak verilen ön referans değer (*pre-baseline*) ölçüm için indüklenecek basınç farkı değerlerine her seferinde eklenmiş ve 30 sn'lik indüklenmiş basınç ölçümleri alınmıştır. İndüklenmiş basınç farkları 50Pa, 40Pa, 30Pa, 20Pa, 10Pa olarak uygulanmıştır.
- Ön ölçüm protokolündeki ölçümlerde düşük basınç farkı sağlanamadığında akış halkası küçültülmüştür ancak bulgulara detaylı olarak görülebileceği gibi bu yöntemin sonuç doğruluk yüzdesini etkilediği tespit edilmiş ve kesin ölçüm protokolünde bu yaklaşım kullanılmamıştır.
- Ölçümler son referans değerinin (*post-baseline*) 120 sn süreyle kaydedilmesi ve TECLOG 4.0 yazılımının aldığı ortalamanın kontrol edilmesi ile tamamlanmıştır.

Çizelge 3.4'te detaylı biçimde tanımlanmış olan ön ölçüm protokolüne ait senaryoların yağmurlu ve güneşli ayrı iki günde tekrarlandığı Yöntem bölümünde belirtilmiştir. Bu yaklaşımın amacı kesinleşmiş ölçüm protokolüne geçişte testlerin hava koşullarından etkilenme düzeylerini irdelemek ve ortaya çıkan bir hata payı saptandığında bu hata payının bir düzeltme aracı olarak kullanılması olarak özetlenmiştir. Şekil 4.1.'de 203 no'lu hacimde uygulanmış basınçlandırma testlerinin şeması ve ilgili ölçüm senaryolarının kodları sunulmaktadır. Basınçlandırma testi uygulanırken kabuk basıncını ölçen ve ölçüm cihazına bağlanan yeşil tüpün açık ucu iç mekânda, fan basıncını ölçmeye yarayan kırmızı tüp fan ve cihaz arasında bağlanmıştır. Basınçlandırma testinde ölçüm cihazının A kanalına mekânda oluşacak pozitif basıncı ölçebilmek amacıyla ayrıca mavi bir tüp bağlanmakta ve ucu iç mekânda serbest bırakılmaktadır.



Şekil 4.1. Ön ölçüm prosedürü: M02Y/G- M04Y/G-M06Y/G- M08Y/G kodlu basınçlandırma testleri.

Şekil 4.2’de ise 203 no’lu hacimde uygulanmış basınçsızlaştırma testlerinin şeması ve ilgili ölçüm senaryolarının kodları sunulmaktadır. Basınçlandırma testi uygulanırken kabuk basıncını ölçen ve ölçüm cihazına bağlanan yeşil tüpün açık ucu ortak dolaşım hacminde ve fan basıncını ölçmeye yarayan kırmızı tüp fan ve cihaz arasında bağlanmıştır.



Şekil 4.2. Ön ölçüm prosedürü: M01Y/G- M03Y/G-M05Y/G- M07Y/G kodlu basınçsızlaştırma testleri.

Ön ölçüm protokolündeki tüm ölçümler, güney yönlenmeli olan 203 no’lu hacimde yürütülmüş olup bu hacmin net taban alanı 9.3 m^2 , kat yüksekliği 3.1 m , etkin cephe alanı 5.89 m^2 , hacmi 28.83 m^3 ’tür. Toplam pencere alanı 2.97 m^2 , pencere çevresi 6.9 m , açılan kanat pencere çevresi 3.5 m dir. Yapının bulunduğu yükseklik 851 m olarak alınmıştır.

Tüm ölçümler sıcaklık ve rakım bilgisi düzeltilmesi yapılmadan gerçekleştirilmiş (nominal CFM50) ve ölçüm sonrasında düzeltilmiş ACH50 rakım, dış ve iç sıcaklık ortalamaları ve test çeper alanı verilerinin TECLOG4 yazılımına entegre edilmesi ile saptanmıştır. Yağmurlu ve güneşli gün ölçümlerine ait iç ve dış ortam verileri Çizelge 4.1’de sunulmaktadır. Alt bölümlerde irdelenen ölçüm senaryolarına ait bulgular bu tabloya referansla tartışılmaktadır.

Çizelge 4.2’de ön ölçüm protokolü kapsamında yapılmış ölçümlere ait düzeltilmemiş veriler, 4.3’te ise rakım, dış ve iç sıcaklık ortalamaları ve test çeper alanı ile düzeltilmiş veriler sunulmaktadır. Bu veriler ilgili alt bölümlerde tartışılacaktır.

Çizelge 4.1. Ön ölçüm prosedüründe yağmurlu (Y) ve güneşli (G) gün ölçümlerine ait iç ve dış ortam verileri

Ölçüm	Tarih	Ölçüm Başlangıç	Ölçüm Bitiş	İç Ortam Sıcaklık Ortalamaları (°C)				İç Ortam Basınç Ortalamaları (Pa)			Dış Sıcaklık Ortalama (°C)	Dış Ortam Basınç Ortalama (Pa)	Rüzgâr Yönü	Rüzgâr Hızı (m/s)
				A	B	C	O	A	B	C				
M01Y	19.04.2021	11:54	12:08	27,58	23,51	23,12	26,81	918,95	918,93	918,94	11,17	1008,6	KKD - KD	1,17
M02Y	19.04.2021	17:35	17:49	26,79	23,69	22,78	27,05	914,07	914,05	914,06	12,86	1003,5	GGB-GD	1,5
M03Y	19.04.2021	13:05	13:23	27,37	23,50	23,07	27,15	917,59	917,58	917,57	11,16	1007	KD	1,93
M04Y	19.04.2021	16:49	17:05	27,02	23,63	23,17	27,12	914,82	914,83	914,88	12,66	1004,66	G-GB	1,33
M05Y	19.04.2021	12:12	12:29	27,29	23,50	23,22	26,92	918,43	918,40	918,43	10,93	1008,1	GB	1,93
M06Y	19.04.2021	17:14	17:30	26,97	23,67	22,81	27,19	913,98	913,96	913,98	12,6	1004,033	G-GGB-GB	1,2
M07Y	19.04.2021	12:47	13:02	27,35	23,50	22,65	27,19	917,42	917,44	917,45	11,1	1007,2	KD	1,8
M08Y	19.04.2021	16:31	16:45	27,14	23,68	23,18	27,31	914,81	914,80	914,82	12,9	1004,5	GD-G	0,9
M01G	20.04.2021	08:26	08:43	26,63	23,06	25,57	26,85	914,36	914,34	914,33	8,86	1005,233	GGD-GGB	1,03
M02G	20.04.2021	13:31	13:47	27,43	23,53	24,51	28,81	914,37	914,34	914,33	13,63	1005,36	GB-GGD-GGB	0,4
M03G	20.04.2021	09:29	09:41	26,78	22,81	22,84	27,33	914,41	914,49	914,45	10,9	1005,3	G-GGD	1,8
M04G	20.04.2021	12:40	12:59	27,34	23,43	22,91	28,87	914,78	914,77	914,76	13	1005,76	GGD-GGB-G	2,066
M05G	20.04.2021	08:56	09:10	26,68	22,78	23,67	27,02	914,34	914,32	914,37	9,86	1005,3	GD-GGD	1,63
M06G	20.04.2021	13:53	14:09	27,46	23,55	24,17	28,86	914,53	914,51	914,52	13,7	1005,46	GGB-GGD-GB	1
M07G	20.04.2021	09:12	09:24	26,71	22,77	22,34	27,10	914,47	914,41	914,42	10,66	1005,3	G-GGD	1,8
M08G	20.04.2021	11:41	11:57	27,27	23,39	24,52	28,69	914,64	914,65	914,65	14,4	1005,7	G-GB-GGD	1,6

Çizelge 4.2. Ön ölçüm protokolündeki testlere ait veriler (düzeltilmemiş)

Ölçüm	Test Tipi	CFM @50Pa /sqft	Hava Akışı @50Pa (m³/h)	Hava Akışı Hata Payı (±%)	Akış Üs Değeri (n)	Akış Üs Değeri (n) Hata Payı (±)	EqLA (10Pa) (cm²)	EqLA (10Pa) Hata Payı (±%)	ELA (4Pa) (cm²)	ELA (4Pa) Hata Payı (±%)	C (Coef) (m³/h/Pa ⁿ)	C (Coef) Hata Payı (±%)	Korelasyon Katsayısı (r²)
M01Y	D	172,00	293,00	36,90	0,952	0,426	70,50	47,40	28,50	83,40	7,10	140,90	0,94402
M02Y	P	218,00	370,00	0,70	0,565	0,008	166,00	0,90	95,50	1,50	40,5	2,60	0,99994
M03Y	D	176,00	298,00	30,30	1,008	0,293	65,70	29,80	25,20	53,40	5,80	92,60	0,95876
M04Y	P	236,00	401,00	0,40	0,549	0,005	185,00	0,50	108,10	0,90	46,90	1,50	0,99998
M05Y	D	165,00	280,00	39,00	1,059	0,452	56,70	50,30	20,80	88,50	4,40	146,90	0,94876
M06Y	P	217,00	369,00	0,30	0,571	0,004	164,10	0,40	93,30	0,70	39,50	1,20	0,99999
M07Y	D	172,00	293,00	37,80	0,947	0,438	71,10	48,80	28,90	85,80	7,20	145,00	0,94971
M08Y	P	235,00	399,00	0,70	0,550	0,008	183,50	0,90	107,10	1,60	46,30	2,80	0,99993
M01G	D	142,00	242,00	38,60	1,117	0,440	44,60	48,70	15,50	85,80	3,10	145,20	0,95603
M02G	P	72,86	124,00	0,40	0,581	0,004	54,20	0,50	30,80	0,90	12,80	1,50	0,99998
M03G	D	146,00	248,00	64,60	1,256	1,181	36,60	146,00	11,20	251,70	1,80	414,00	0,91294
M04G	P	74,00	126,00	1,00	0,588	0,012	54,40	1,30	30,70	2,30	12,60	3,90	0,99988
M05G	D	142,00	241,00	39,10	1,103	0,450	45,50	50,00	16,00	87,90	3,20	148,60	0,95312
M06G	P	72,43	123,00	1,40	0,580	0,016	54,00	1,80	30,70	3,10	12,70	5,30	0,99977
M07G	D	139,00	236,00	41,10	1,101	0,473	44,80	52,60	15,80	92,50	3,20	156,40	0,94814
M08G	P	229,00	389,00	59,10	1,149	0,686	68,30	76,40	23,00	134,40	4,30	227,10	0,90448

Çizelge 4.3. Ön ölçüm protokolündeki testlere ait veriler (düzeltilmiş)

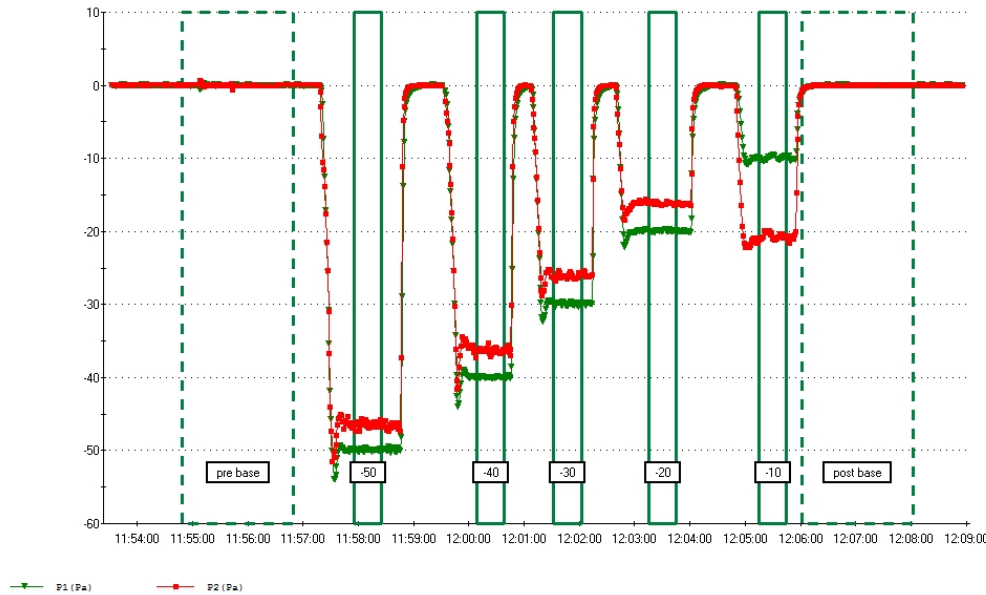
Ölçüm	Test Tipi	CFM @50Pa /sqft	Hava Akışı @50Pa (m³/h)	Hava Akışı Hata Payı (±%)	Akış Üs Değeri (n)	Akış Üs Değeri (n) Hata Payı (±)	EqLA (10Pa) (cm²)	EqLA (10Pa) Hata Payı (±%)	ELA (4Pa) (cm²)	ELA (4Pa) Hata Payı (±%)	C (Coef) (m³/h/Pa ⁿ)	C (Coef) Hata Payı (±%)	Korelasyon Katsayısı (r²)
M01Y	D	169,00	287,00	36,90	0,952	0,426	69,20	47,40	28,00	83,40	6,90	140,90	0,94402
M02Y	P	225,00	383,00	0,70	0,565	0,008	171,80	0,90	98,90	1,50	41,90	2,60	0,99994
M03Y	D	173,00	293,00	30,30	1,008	0,293	64,60	29,80	24,80	53,40	5,70	92,60	0,95876
M04Y	P	244,00	414,00	0,40	0,549	0,005	190,90	0,50	111,60	0,90	48,40	1,50	0,99998
M05Y	D	162,00	275,00	39,00	1,059	0,452	55,80	50,30	20,40	88,50	4,40	146,90	0,94876
M06Y	P	225,00	382,00	0,30	0,571	0,004	170,00	0,40	97,30	0,70	40,90	1,20	0,99999
M07Y	D	169,00	287,00	37,80	0,947	0,438	69,80	48,80	28,30	85,80	7,10	145,00	0,94971
M08Y	P	242,00	412,00	0,70	0,550	0,008	189,50	0,90	110,60	1,60	47,80	2,80	0,99993
M01G	D	138,00	235,00	38,60	1,117	0,440	43,30	48,70	15,00	85,80	3,00	145,20	0,95603
M02G	P	75,81	129,00	0,40	0,581	0,004	56,40	0,50	32,00	0,90	13,30	1,50	0,99998
M03G	D	144,00	245,00	64,60	1,256	1,181	36,60	146,00	11,20	251,70	1,80	414,00	0,91294
M04G	P	77,24	131,00	1,00	0,588	0,012	56,80	1,30	32,00	2,30	13,10	3,90	0,99988
M05G	D	139,00	235,00	39,10	1,103	0,450	44,50	50,00	15,60	87,90	3,10	148,60	0,95312
M06G	P	75,36	128,00	1,40	0,580	0,016	56,20	1,80	31,90	3,10	13,20	5,30	0,99977
M07G	D	137,00	233,00	41,10	1,101	0,473	44,20	52,60	15,60	92,50	3,10	156,40	0,94814
M08G	P	263,00	447,00	59,10	1,149	0,686	78,40	76,40	26,40	134,40	5,00	227,10	0,90448

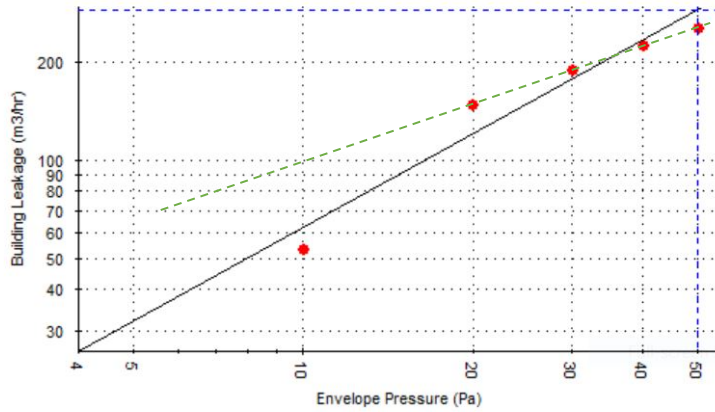
4.1.1. Ön Ölçüm Protokolüne Ait Veriler

4.1.1.1. Basıncısızlaştırma Testi: M01Y ve M01G Kodlu Ölçümler

M01Y kodlu ölçüm, belirlenen ön ölçüm protokollerine uygun olarak, 203 nolu birimde bina koridor kapı ve pencereleri kapalı, elektrik armatürleri açık, basınç ölçüm aygıtı ve fan içeri konumda olacak şekilde, 19.04.2021 tarihinde, 11:54-12:08 saatleri arasında, 11,17°C dış sıcaklık ortalaması, 26,81°C iç sıcaklık ortalaması, 1008,60 Pa dış basınç ortalaması, KKD-KD rüzgâr yönü, 1,17 m/s rüzgâr hızında basıncısızlaştırma testi uygulanarak gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.1; Şekil 4.3).

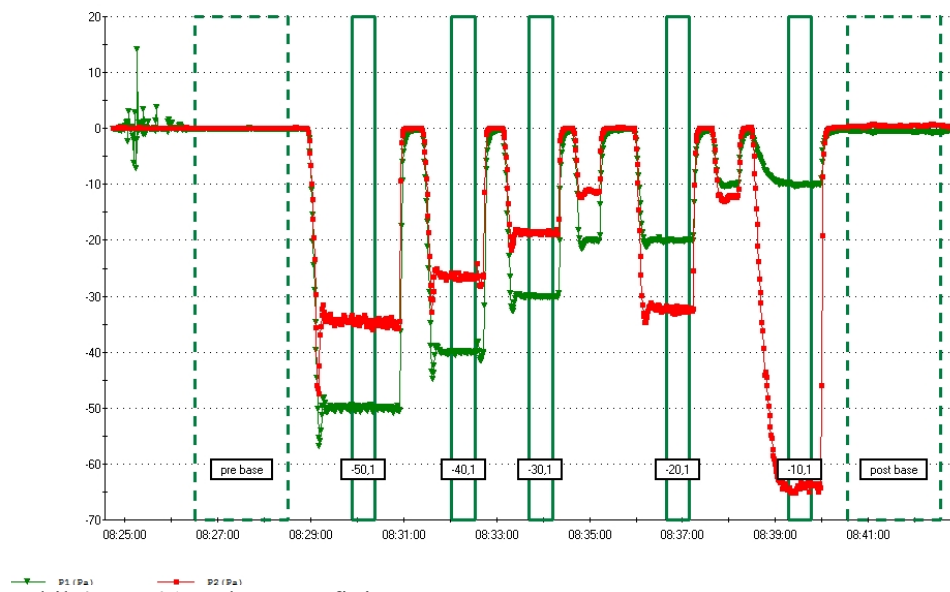
Şekil 4.3'te yeşil ölçülen yapı kabuğu basıncını, kırmızı ise fan basıncını temsil etmektedir. Kesikli çizgi ile ifade edilen aralıktaki değerler ön referans basınç ve son referans basınç okumaları için 120 saniyelik ölçüm aralığını temsil etmektedir. Sürekli çizgi ile çerçevelenen aralıkta (30 sn.) tüm indüklenen basınç farklarında gerçekleşen yapı kabuğu ve fan basınç değerleri sızdırmazlık hesaplamasında kullanılmakta ve bu değerlere ait ortalamalar aracılığıyla Şekil 4.4'te görülen %95 güven aralığında hesaplanan ağırlıklandırılmamış regresyon grafiği kurulabilmekte ve CFM50, n , r^2 değerleri bu verilere bağlı olarak hesaplanmaktadır.



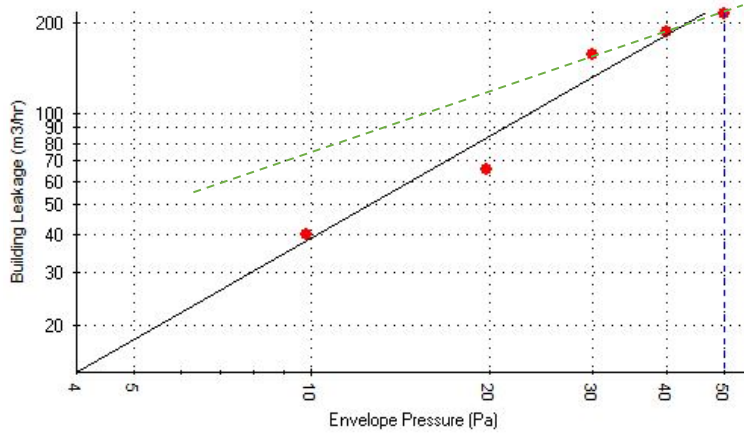


Şekil 4.4. M01Y kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

TECLOG 4.0'dan elde edilen sıfır fan akışında ölçülen ön referans değer (*pre-baseline*) ortalaması 0.0Pa'dır. Dolayısıyla bu referans değer indüklenmiş basınca eklenmemiştir. Ölçüme C halkası ile başlanılmış ancak 10Pa'a inilemediği için son ölçümde D halkası kullanılmıştır. Yapılan ölçümde saptanan düzeltilmemiş hava akış değeri 293 m³/h @50Pa olarak saptanmış (Çizelge 4.2), ölçüm iç sıcaklık, dış sıcaklık, rakım ve hacim verileri girildikten sonra düzeltilmiş hava akış değeri 288 m³/h olarak tespit edilmiştir (Çizelge 4.3). Hata payı $\pm 36,90$, akış üs değeri (n) 0.952 n , akış üs değeri hata payı ± 0.426 ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,94402 olarak saptanmıştır (Şekil 4.4). Bu değerler ASTM E779 (2003) tarafından tanımlanan $n < 0.5$ ya da $n > 1.00$, ve $r^2 < 0.99$ geçersiz test koşullarına işaret etmektedir. M01Y ölçümünde D halkası ile indüklenen 10Pa basıncın ihmal edildiği sonuçlar ise $n = 0,590 (\pm 0.0023)$ ve $r^2 = 0,99984$ değerlerini sağlamaktadır (Şekil 4.4 – kesikli çizgi).



Şekil 4.5. M01G ölçüm grafiği



Şekil 4.6. M01G kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

Güneşli gün ölçümü ise, yine aynı hacimde koridor kapı ve pencereleri kapalı, elektrik armatürleri açık, basınç ölçüm aygıtı ve fan içeri konumda iken 20.04.2021 tarihinde 08:26-08:43 saatleri arasında dış sıcaklık ortalaması 8,86°C, dış basınç ortalaması 1005.23 Pa, rüzgâr yönü GGD-GGB, rüzgâr hızı 1.03 iken basınçsızlaştırma testleri yapılmıştır. Ölçüm yapılan hacmin belirtilen saatlerde sıcaklık ortalaması 26.85°C tir (Çizelge 4.1; Şekil 4.5).

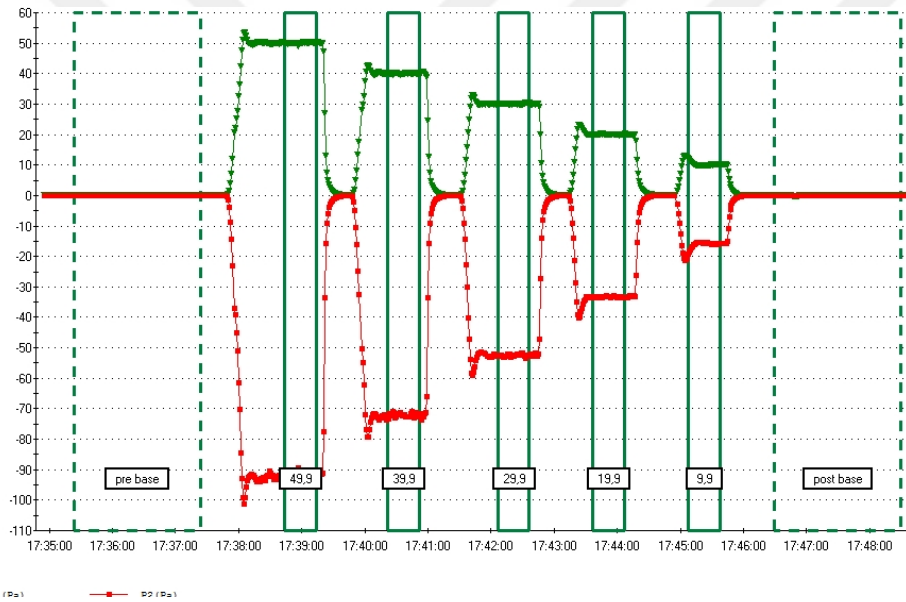
TECLOG 4.0'dan elde edilen sıfır fan akışında ölçülen ön referans değer (*pre-baseline*) -0.1Pa olarak ölçülmüştür. Bu değer basınçsızlaştırma testinde indüklenen tüm basınç farklarına eklenmiştir (ör., -50Pa+/-0,1Pa). Ölçümlere C halkası ile başlanılmış ancak 20Pa'ya inilemediği için D halkası 10Pa'ya inilemediği için E halkası kullanılmıştır. Düzeltilmemiş hava akışı @50Pa 242 m³/h (Çizelge 4.2) düzeltilmiş hava akışı 234 m³/h (Çizelge 4.3) olarak tespit edilmiştir. Hata payı %±38,60, akış üs değeri (n) 1,117 (± 0.440) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,95603 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.2; Çizelge 4.3; Şekil 4.6). Bu değerler ASTM E779 (2003) tarafından tanımlanan $n < 0.5$ ya da $n > 1.00$, ve $r^2 < 0.99$ geçersiz test koşullarına işaret etmektedir. M01G ölçümünde D ve E halkası ile indüklenen 20Pa ve 10Pa basınç farklarının ihmal edildiği durumda $n = 0,617 (\pm 0.061)$ ve $r^2 = 0,99994$ değerleri sağlanmaktadır (Şekil 4.6 – kesikli çizgi).

4.1.1.2. Basınçlandırma Testi: M02Y ve M02G Kodlu Ölçümler

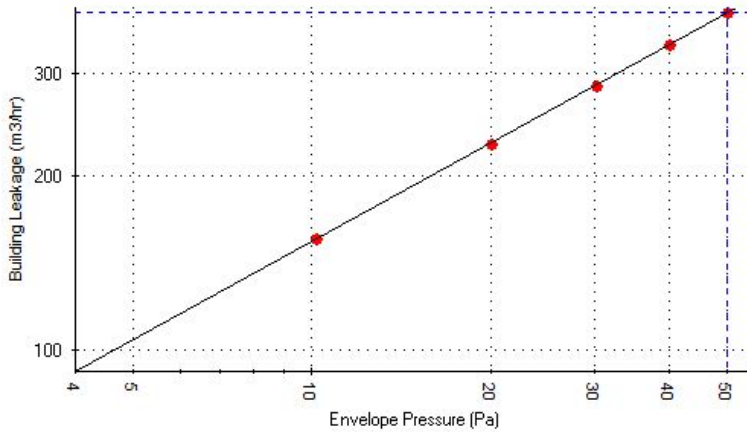
Belirlenen ön ölçüm protokollerine uygun olarak 203 nolu hacimde bina/koridor kapı ve pencereleri kapalı, elektrik armatürleri açık, basınç ölçüm aygıtı ve fan dışarı konumda iken

19.04.2021 tarihinde 17:35-17:49 saatleri arasında dış sıcaklık ortalaması 12.86°C, dış basınç ortalaması 1003.50 Pa, rüzgâr yönü GGB-GD, rüzgâr hızı 1.5 m/s koşullarında basınçlandırma testi gerçekleştirilmiştir. Ölçüm yapılan hacmin belirtilen saatlerde sıcaklık ortalaması 27.05°C tir (Çizelge 4.1).

Sıfır fan akışında ölçülen ön referans değer (*pre-baseline*) -0.1Pa olarak saptanmıştır (Şekil 4.7). Basınç farkları C halkası ile indüklenmiştir. Düzetilmemiş hava akışı @50Pa 370 m³/h (Çizelge 4.2), düzeltilmiş hava akışı 383 m³/h olarak tespit edilmiştir. Hata payı %±0,70, akış üs değeri (n) 0,565 (± 0.008) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,99994 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.2; Çizelge 4.3; Şekil 4.8). Bu değerler ASTM E779 (2003) tarafından tanımlanan $n < 0.5$ ya da $n > 1.00$, ve $r^2 < 0.99$ test koşullarına göre geçerlidir.

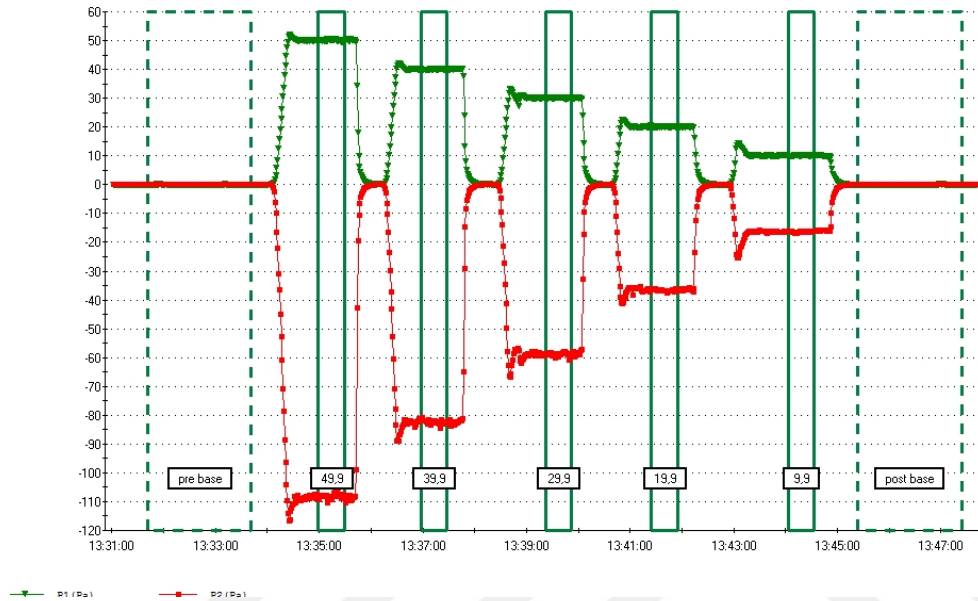


Şekil 4.7. M02Y ölçüm grafiği

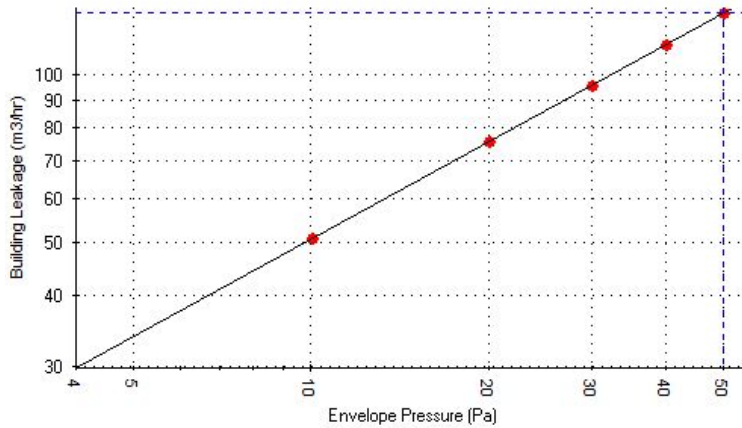


Şekil 4.8. M02Y kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

Aynı hacimde 20.04.2021 tarihinde 13:31-13:47 saatleri arasında yürütülen güneşli gün basınçlandırma testi (M02G) koşulları şu şekildedir: bina/koridor kapı ve pencereleri kapalı, elektrik armatürleri açık, basınç ölçüm aygıtı ve fan dışarı konumda, dış sıcaklık ortalaması 13,63°C, dış basınç ortalaması 1005,36 Pa, rüzgâr yönü GB-GGD-GGB, rüzgâr hızı 0,4 m/s. Ölçüm yapılan hacmin belirtilen saatlerde sıcaklık ortalaması 28.81°C tir (Çizelge 4.1).



Şekil 4.9. M02G ölçüm sonuçları



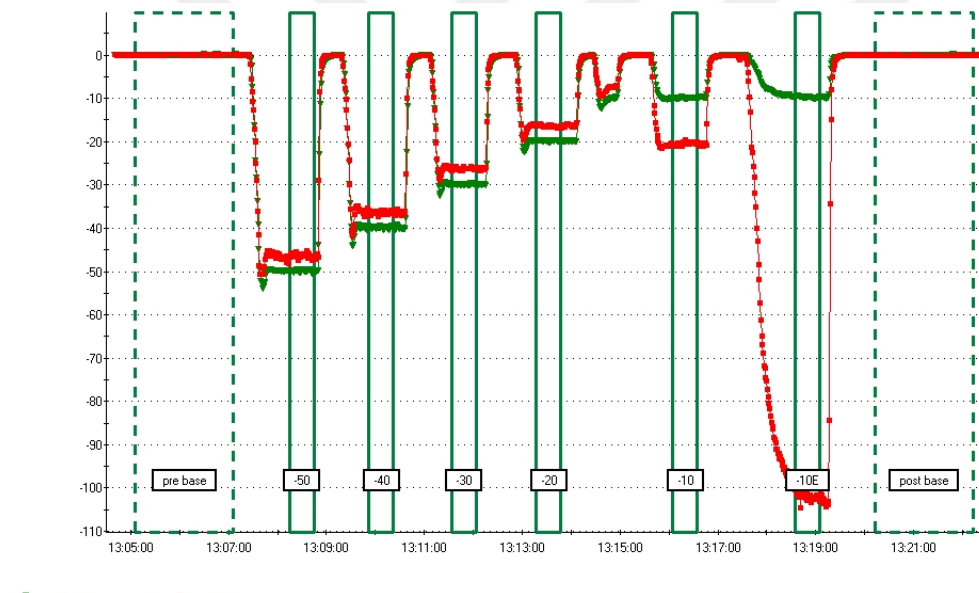
Şekil 4.10. M02G kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

Sıfır fan akışında ölçülen ön referans değer (*pre-baseline*) -0.1Pa olarak saptanmıştır (Şekil 4.9). Çoklu nokta testi için indüklenen basınç farkları için D halkası kullanılmıştır. Sonuçlara göre düzeltilmemiş hava akışı @50Pa 174 m³/h (Çizelge 4.2), düzeltilmiş hava akışı 129 m³/h olarak tespit edilmiştir. Hata payı $\pm 0,40$, akış üs değeri (n) 0,581 ($\pm 0,004$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,99998 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.2; Çizelge 4.3; Şekil 4.9).

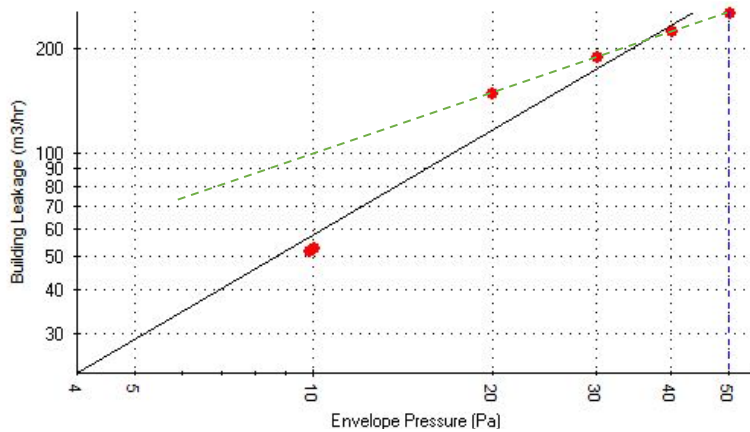
M02G kodlu basınçlandırma testinin sonuçlarının ASTM E779 (2003) tarafından tanımlanan $n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$ koşullarına göre geçerli olduğu saptanmıştır.

4.1.1.3. Basıncısızlaştırma Testi: M03Y ve M03G Kodlu Ölçümler

Belirlenen ön ölçüm protokollerine uygun olarak, 203 nolu hacimde bina/koridor kapı ve pencereleri kapalı, elektrik armatürleri kapalı, basınç ölçüm aygıtı ve fan içeri konumda iken 19.04.2021 tarihinde 13:05-13:23 saatleri arasında dış sıcaklık ortalaması $11,16^{\circ}\text{C}$, dış basınç ortalaması $1007,00\text{ Pa}$, rüzgâr yönü KD, rüzgâr hızı $1,93\text{ m/s}$ koşullarında basınçsızlaştırma testi yapılmıştır. Ölçüm yapılan hacmin belirtilen saatlerde sıcaklık ortalaması $27,15^{\circ}\text{C}$ tir (Çizelge 4.1).



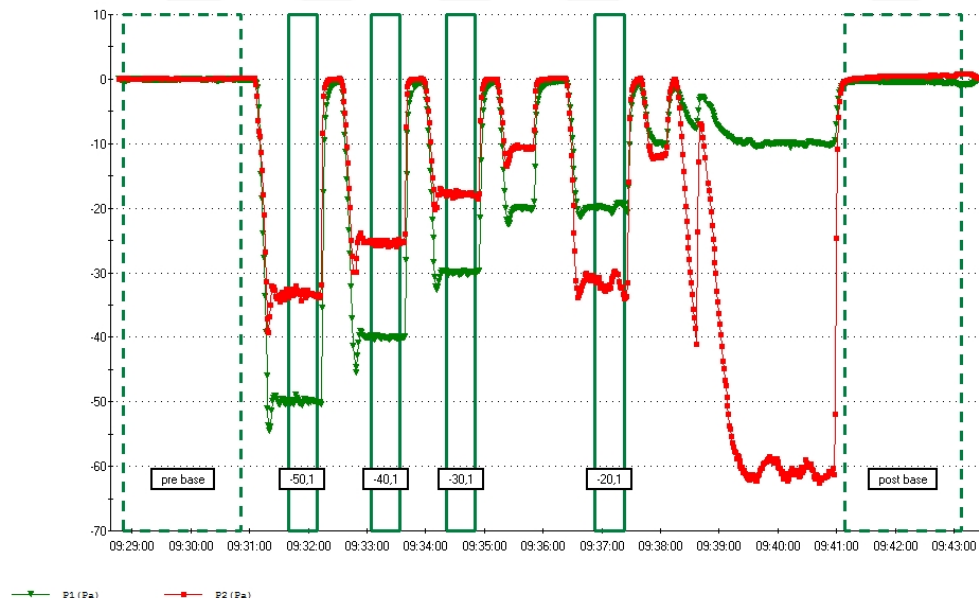
Şekil 4.11. M03Y ölçüm grafiği



Şekil 4.12. M03Y kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

Sıfır fan akışında ölçülen ön referans değer (*pre-baseline*) 0Pa olarak saptanmış, dolayısıyla indüklenen basınçlara yansıtılmamıştır (Şekil 4.11). Çoklu nokta testi için indüklenen basınç farklarının ölçülmesine C halkası ile başlanmış ancak 10Pa basınç farkı elde edilemediği için D ve E halkaları test edilmiştir (Şekil 4.11; -10Pa ve -10E). Düzeltilmemiş test sonuçlarına göre hava akışı @50Pa 298 m³/h (Çizelge 4.2), düzeltilmiş hava akışı 293 m³/h olarak tespit edilmiştir. Hata payı %±30,30, akış üs değeri (n) 1,008 (±0,293) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,95876 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.2; Çizelge 4.3; Şekil 4.11). M03Y kodlu basınçlandırma testinin sonuçları ASTM E779 (2003) tarafından tanımlanan $n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$ koşullarına göre geçerli değildir. M03Y kodlu ölçümde D ve E halkası ile indüklenen 10Pa basınç farkları ihmal edildiğinde $n = 0,581$ (±0.025) ve $r^2 = 0,99980$ değerleri sağlanmaktadır (Şekil 4.12 – kesikli çizgi).

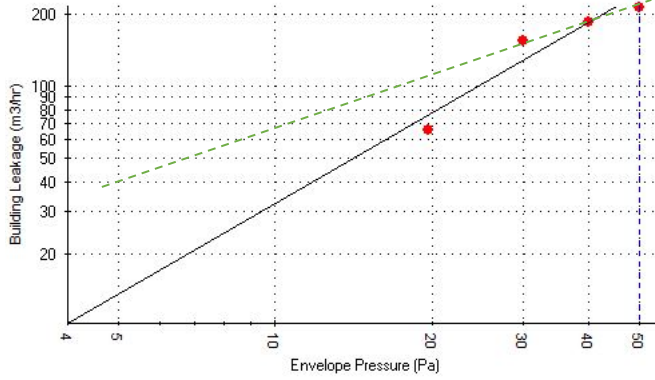
Aynı hacimde M03G kodlu güneşli gün basınçsızlaştırma testleri 20.04.2021 tarihinde 09:29-09:41 saatleri arasında yapılmıştır. Bu ölçüm için koşullar şu şekildedir: bina/koridor kapı ve pencereleri kapalı, elektrik armatürleri kapalı, basınç ölçüm aygıtı ve fan içeri konumda, dış sıcaklık ortalaması 10,9°C, dış basınç ortalaması 1005.3 Pa, rüzgâr yönü G-GGD, rüzgâr hızı 1,8 m/s, iç sıcaklık ortalaması 27,33°C (Çizelge 4.1).



Şekil 4.13. M03G ölçüm grafiği

TECLOG 4.0'dan elde edilen sıfır fan akışında ölçülen ön referans değer (*pre-baseline*) -0.1Pa olarak ölçülmüştür. Bu değer basınçsızlaştırma testinde indüklenen tüm basınç farklarına eklenmiştir. M03Y'ye benzer şekilde 20Pa basınç farkı indüklenemediği için, C

halkası ile başlanan ölçüme 20Pa için D halkası, 10Pa için E halkası ile devam edilmiştir. Düzeltilmemiş hava akışı @50Pa 248 m³/h, düzeltilmiş değer ise 245 m³/h olarak tespit edilmiştir (Çizelge 4.2; Çizelge 4.3; Şekil 4.13).

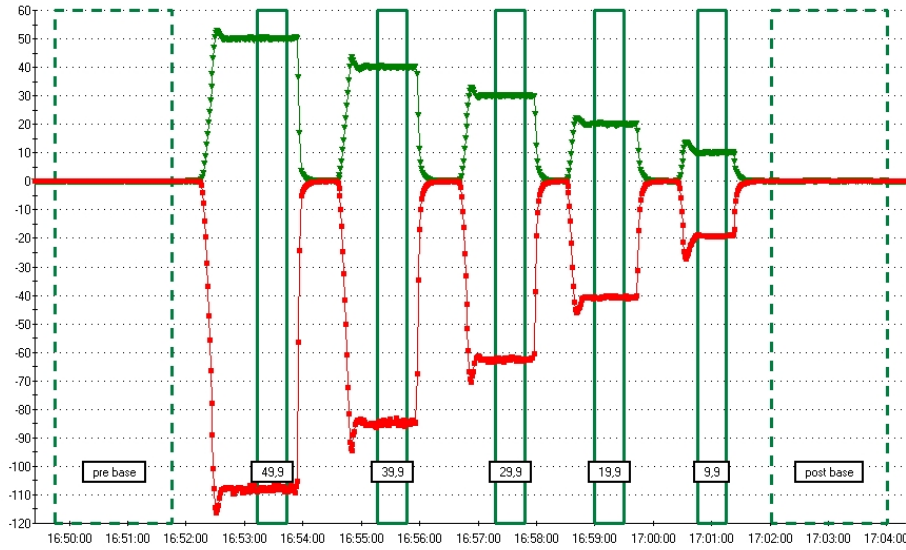


Şekil 4.14. M03G kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

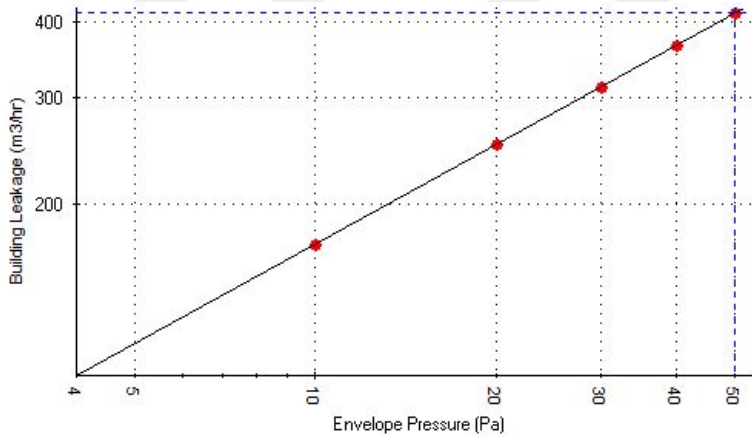
M03G kodlu ölçümde hiçbir akış halkası ile 10Pa basınç farkı indüklenemediği için ön ölçüm protokolüne ait bu testte sadece 4 nokta kullanılmıştır (Şekil 4.13). Bu 4 basınç farkına göre, hata payı $\pm 64,60$, akış üs değeri (n) 1,256 ($\pm 0,293$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,91294 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.2; Çizelge 4.3; Şekil 4.14). M03G kodlu basınçsızlaştırma testinin sonuçları ASTM E779 (2003) tarafından tanımlanan $n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$ koşullarına göre geçerli değildir. D halkası ile indüklenen 20Pa basınç farkı ihmal edildiğinde $n = 0,623$ ($\pm 0,008$) ve $r^2 = 1,00000$ değerleri sağlanmaktadır (Şekil 4.14 – kesikli çizgi). Ancak, 3 basınç farkı ile elde edilen veri çoklu-nokta testi için yeterli değildir ve bu ölçüm tüm değerlendirmelerde devre dışı bırakılmaktadır.

4.1.1.4. Basınçlandırma Testi: M04Y ve M04G Kodlu Ölçümler

Ön ölçüm protokolü için seçilmiş olan 203 no'lu hacimde bina/koridor kapı ve pencereleri kapalı, elektrik armatürleri kapalı, basınç ölçüm aygıtı ve fan dışarı konumda iken 19.04.2021 tarihinde 16:49-17:05 saatleri arasında basınçlandırma testi uygulanmıştır. Test süresince dış sıcaklık ortalaması 12,66°C, dış basınç ortalaması 1004,66 Pa, rüzgâr yönü G-GB, rüzgâr hızı 1,33 m/s'dir. Ölçüm yapılan hacmin belirtilen saatlerde sıcaklık ortalaması 27,12°C olarak ölçülmüştür (Çizelge 4.1).



Şekil 4.15. M04Y ölçüm grafiği

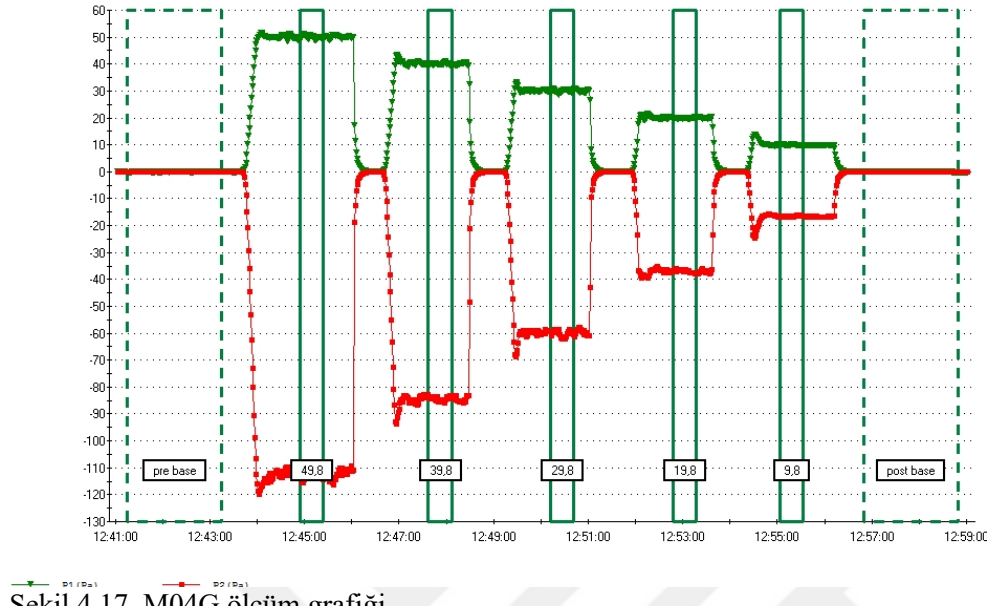


Şekil 4.16. M04Y kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

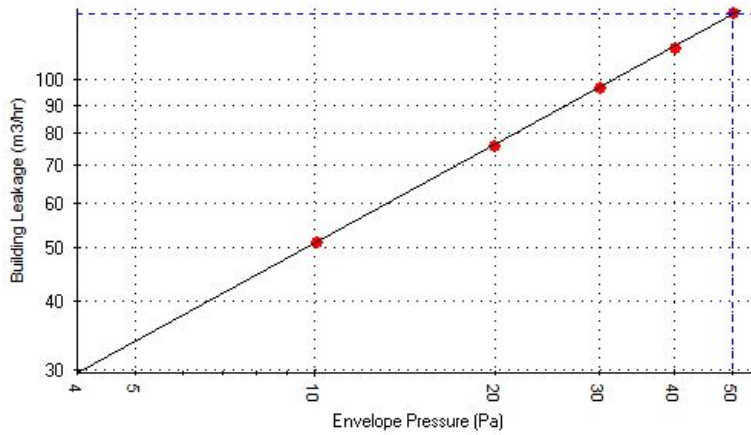
Sıfır fan akışında ölçülen ön referans değer (*pre-baseline*) -0.1Pa olarak saptanmıştır (Şekil 4.15). Çoklu nokta testi için indüklenen basınç farkları için C halkası kullanılmıştır. Sonuçlara göre düzeltilmemiş hava akışı @50Pa 401 m³/h (Çizelge 4.2), düzeltilmiş hava akışı 414 m³/h olarak tespit edilmiştir. Hata payı $\pm 0,40$, akış üs değeri (n) 0,549 ($\pm 0,005$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,99998 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.2; Çizelge 4.3; Şekil 4.16). M04Y kodlu basınçlandırma testinin sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarına ($n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$) göre geçerlidir.

Aynı hacimde 20.04.2021 tarihinde ve 12:40-12:59 saatleri arasında, bina/koridor kapı ve pencereleri kapalı, elektrik armatürleri kapalı, basınç ölçüm aygıtı ve fan dışarı konumda 13,0°C dış sıcaklık ortalaması, 28,87°C iç sıcaklık ortalaması 1005,76 Pa dış basınç ortalaması,

GGD-GGB-G yönünde ve 2,066 m/s hızında rüzgâr koşullarında basınçlandırma testi yapılmıştır (Çizelge 4.1).



Şekil 4.17. M04G ölçüm grafiği

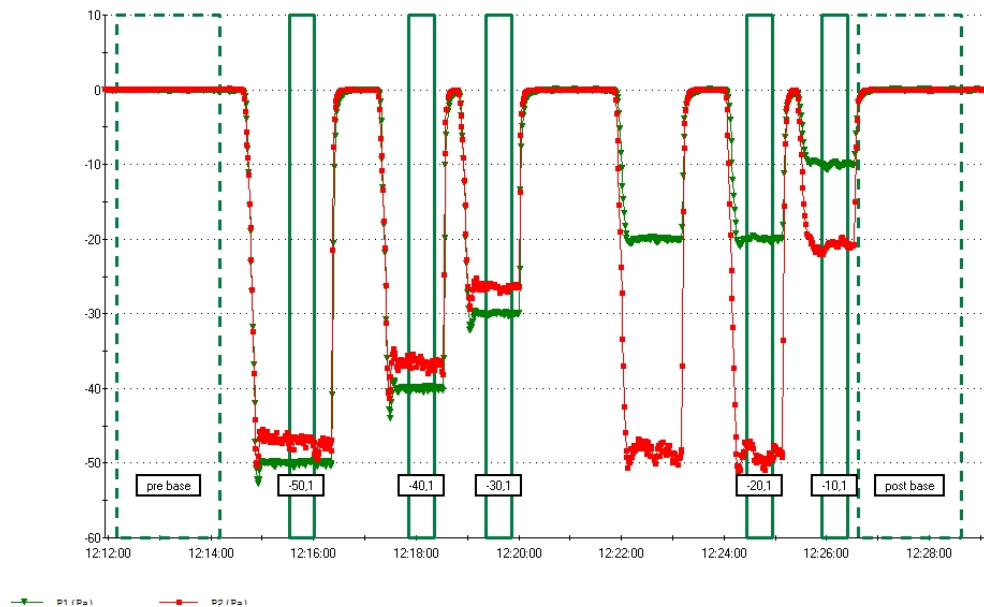


Şekil 4.18. M04G kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

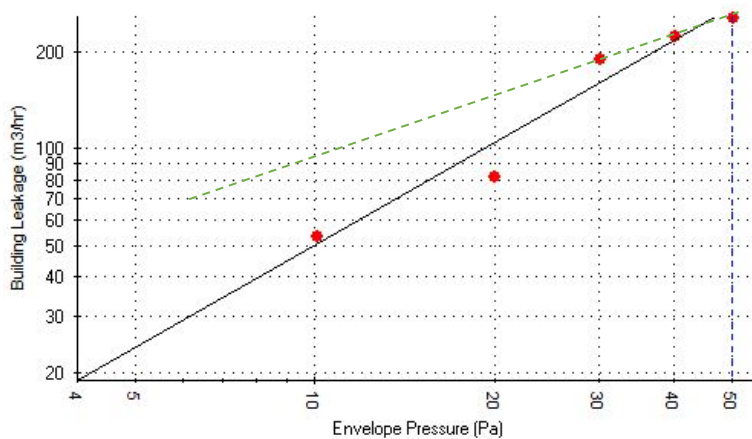
Sıfır fan akışında ölçülen ön referans değeri (*pre-baseline*) -0,2Pa'dır (Şekil 4.17). İndüklenen basınç farkları için D halkası kullanılmıştır. Sonuçlara göre düzeltilmemiş hava akışı @50Pa 126 m³/h (Çizelge 4.2), düzeltilmiş hava akışı 131 m³/h olarak tespit edilmiştir. Hata payı %±1,00, akış üs değeri (n) 0,588 ($\pm 0,012$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,99988 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.2; Çizelge 4.3; Şekil 4.18). M04G kodlu basınçlandırma testinin sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarına ($n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$) göre geçerlidir.

4.1.1.5. Basıncısızlaştırma Testi: M05Y ve M05G Kodlu Ölçümler

Belirlenen ön ölçüm protokollerine uygun olarak, 203 no'lu hacimde bina/koridor kapı ve pencereleri açık, elektrik armatürleri açık, basınç ölçüm aygıtı ve fan içeri konumda iken 19.04.2021 tarihinde 12:12-12:29 saatleri arasında dış sıcaklık ortalaması 10,93°C, dış basınç ortalaması 1008,10 Pa, rüzgâr yönü GB, rüzgâr hızı 1,93 m/s iken basıncısızlaştırma testi yapılmıştır. Ölçüm yapılan hacmin belirtilen saatlerde sıcaklık ortalaması 26,92°C'dir (Çizelge 4.1).



Şekil 4.19. M05Y ölçüm grafiği

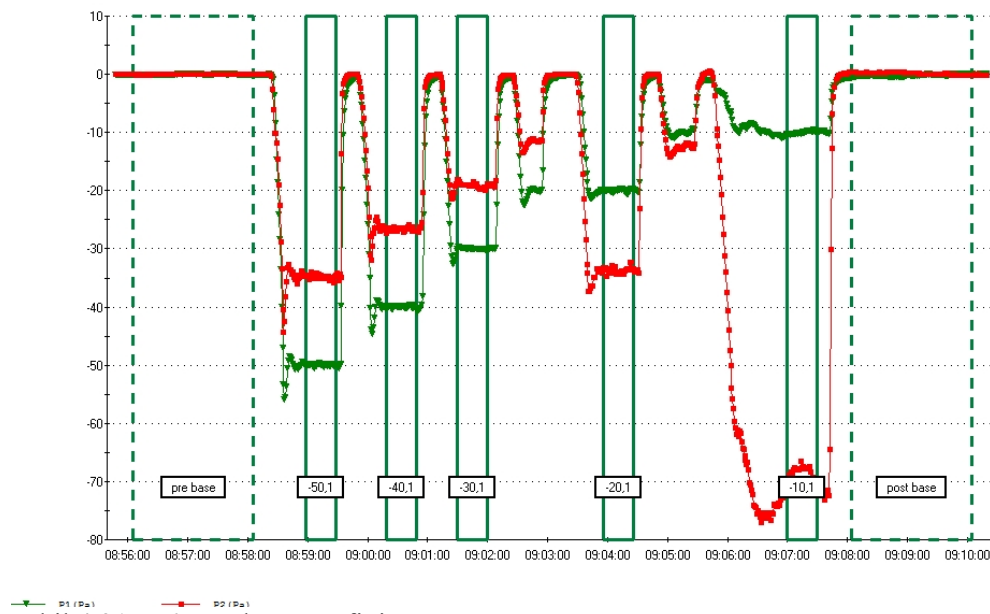


Şekil 4.20. M05Y kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

Sıfır fan akışında ön referans değer (*pre-baseline*) -0,1 Pa olarak saptanmış ve indüklenen basınçlara yansıtılmıştır (Şekil 4.19). Çoklu nokta testi için indüklenen basınç

farklarının ölçülmesine C halkası ile başlanmış ancak 20 ve 10Pa basınç farkı elde edilemediği için bu basınç farklarının uygulanmasında D halkası kullanılmıştır (Şekil 4.19; -20,1Pa ve -10,1Pa). Düzeltilmemiş test sonuçlarına göre hava akışı @50Pa 280 m³/h (Çizelge 4.2), düzeltilmiş hava akışı 275 m³/h olarak tespit edilmiştir. Hata payı %±39,00, akış üs değeri (n) 1,059 (±0,452) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,94876 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.2; Çizelge 4.3; Şekil 4.20). M03Y kodlu basınçlandırma testinin sonuçları ASTM E779 (2003) tarafından tanımlanan $n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$ koşullarına göre geçerli değildir. M05Y kodlu ölçümde D halkası ile indüklenen 20 ve 10Pa basınç farkları ihmal edildiğinde $n = 0,579$ (±0.002) ve $r^2 = 1,00000$ değerleri sağlanmaktadır (Şekil 4.20 – kesikli çizgi). Ancak, 3 basınç farkı ile elde edilen veri çoklu-nokta testi için yeterli değildir ve bu ölçüm tüm değerlendirmelerde devre dışı bırakılmaktadır.

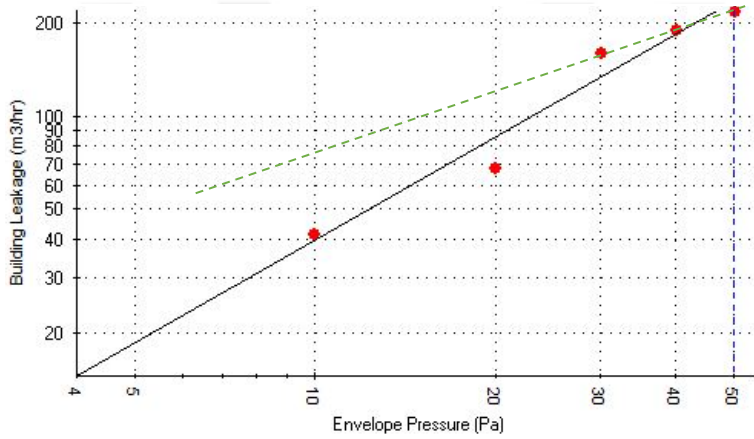
Aynı hacimde güneşli gün basınçsızlaştırma testi (M05G) 20.04.2021 tarihinde 08:56-09:10 saatleri arasında tamamlanmıştır. Ölçüm esnasındaki şartlar şu şekildedir: bina/koridor kapı ve pencereleri açık, elektrik armatürleri açık, basınç ölçüm aygıtı ve fan içeri konumda, dış sıcaklık ortalaması 9,86°C, dış basınç ortalaması 1005,30 Pa, rüzgâr yönü GD-GGD, rüzgâr hızı 1,63 m/s ve iç sıcaklık ortalaması 27°02°C'dir (Çizelge 4.1).



Şekil 4.21. M05G ölçüm grafiği

Sıfır fan akışında ön referans değeri (*pre-baseline*) -0,1 Pa'dır (Şekil 4.21). Çoklu nokta testi için indüklenen basınç farklarının ölçülmesine C halkası ile başlanmış ancak 20 ve 10Pa basınç farkı elde edilemediği için bu basınç farklarının uygulanmasında sırasıyla D ve E

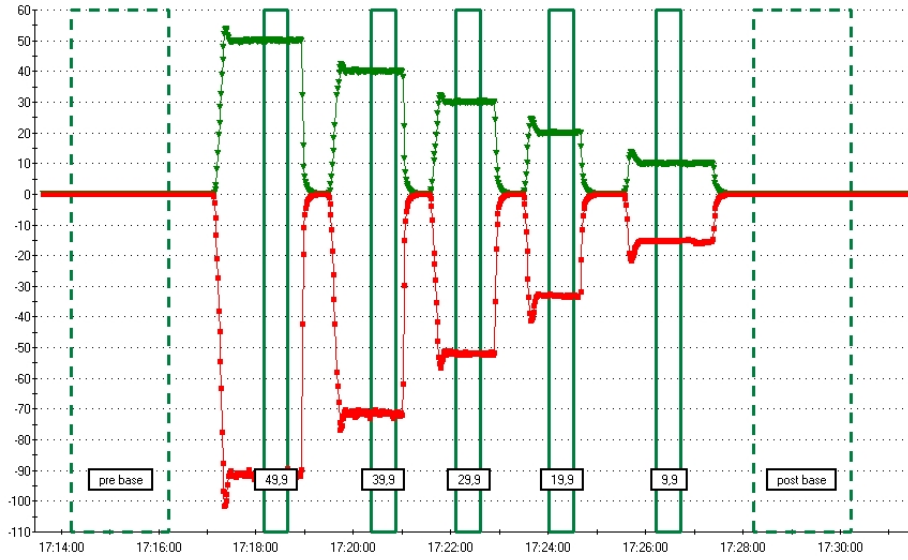
halkaları kullanılmıştır (Şekil 4.21; -20,1Pa ve -10,1Pa). Düzeltilmemiş test sonuçlarına göre hava akışı @50Pa 241 m³/h (Çizelge 4.2), düzeltilmiş hava akışı 237 m³/h olarak tespit edilmiştir. Hata payı %±39,10, akış üs değeri (n) 1,103 ($\pm 0,450$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0, 95312 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.2; Çizelge 4.3; Şekil 4.21). M03Y kodlu basınçlandırma testinin sonuçları ASTM E779 (2003) tarafından tanımlanan $n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$ koşullarına göre geçerli değildir. M05G kodlu ölçümde D ve E halkaları ile indüklenen 20 ve 10Pa basınç farkları ihmal edildiğinde $n = 0,596$ ($\pm 0,123$) ve $r^2 = 0,99974$ değerlerini sağlanmaktadır (Şekil 4.22 – kesikli çizgi). Ancak, 3 noktadan elde edilen veriler çoklu-nokta testinin sonucuna ulaşmak için kullanılan ağırlıklandırılmamış regresyon yöntemi bakımından yeterli değildir ve bu ölçüm tüm değerlendirmelerde devre dışı bırakılmaktadır.



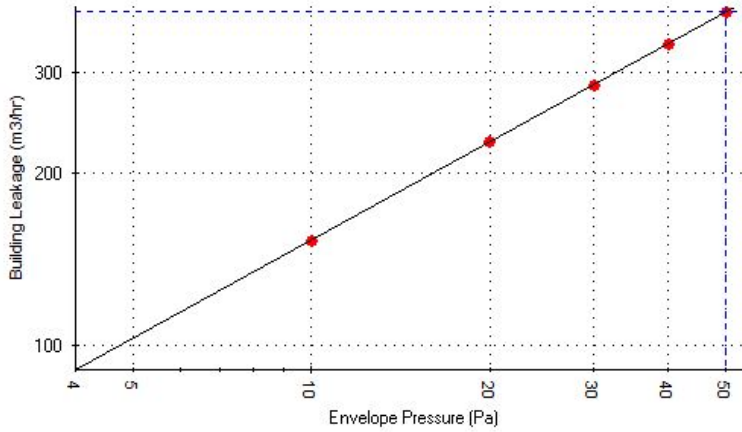
Şekil 4.22. M05G kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

4.1.1.6. Basınçlandırma Testi: M06Y ve M06G Kodlu Ölçümler

M06Y kodlu (yağmurlu gün) basınçlandırma testi 203 no'lu hacimde 19.04.2021 tarihinde 17:14-17:30 saatleri arasında yürütülmüştür. Bu teste ait koşullar şu şekildedir: bina/koridor kapı ve pencereleri açık, elektrik armatürleri açık, basınç ölçüm aygıtı ve fan dışarı konumda iken dış sıcaklık ortalaması 12,6°C, dış basınç ortalaması 1004,033 Pa, rüzgâr yönü G-GGB-GB, rüzgâr hızı 1,2 m/s ve iç sıcaklık ortalaması 27,19°C'dir (Çizelge 4.1).



Şekil 4.23. M06Y ölçüm grafiği



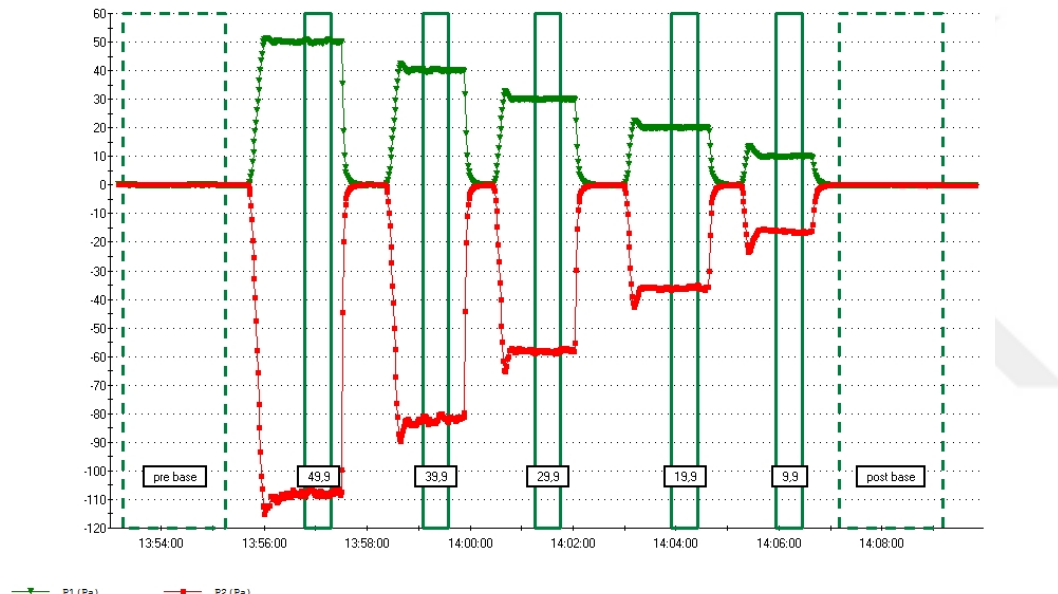
Şekil 4.24. M06Y kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

Sıfır fan akışında ölçülen ön referans değer (*pre-baseline*) -0,1Pa'dır (Şekil 4.23). İndüklenen basınç farkları için C halkası kullanılmıştır. Sonuçlara göre düzeltilmemiş hava akışı @50Pa 369 m³/h (Çizelge 4.2), düzeltilmiş hava akışı 382 m³/h olarak tespit edilmiştir. Hata payı $\pm 0,30$, akış üs değeri (n) 0,571 ($\pm 0,004$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,99999 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.2; Çizelge 4.3; Şekil 4.24). M06Y kodlu basınçlandırma testinin sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarına ($n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$) göre geçerlidir.

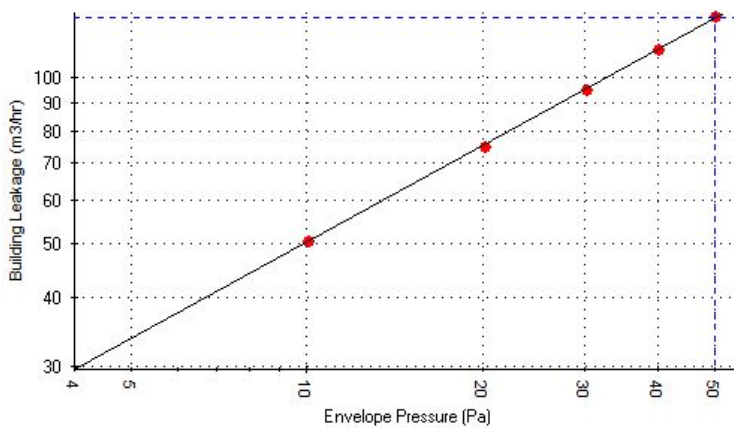
Aynı hacimde M06G kodlu (güneşli gün) basınçlandırma testi, bina/koridor kapı ve pencereleri açık, elektrik armatürleri açık, basınç ölçüm aygıtı ve fan dışarı konumda iken 20.04.2021 tarihinde 13:53-14:09 saatleri arasında, dış sıcaklık ortalaması 13,7°C, dış basınç

ortalaması 1005,46 Pa, rüzgâr yönü GGB-GGD-GB, rüzgâr hızı 1,0 m/s koşullarında yapılmıştır. Ölçüm yapılan hacmin belirtilen saatlerde sıcaklık ortalaması 28,86°C'dir (Çizelge 4.1).

Ön referans değeri (*pre-baseline*) -0,1Pa olarak ölçülmüştür (Şekil 4.25). Basınç farkları için D halkası kullanılmıştır. Düzeltilmemiş hava akışı @50Pa 123 m³/h (Çizelge 4.2), düzeltilmiş hava akışı 128 m³/h olarak tespit edilmiştir. Hata payı %±1,40, akış üs değeri (*n*) 0,580 (±0,016) ve korelasyon katsayısı (*r*²), 0,99977 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.2; Çizelge 4.3; Şekil 4.24) ve bu test sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarına (*n*<0,5 ya da *n*>1,00, ve *r*²<0,99) göre geçerlidir.



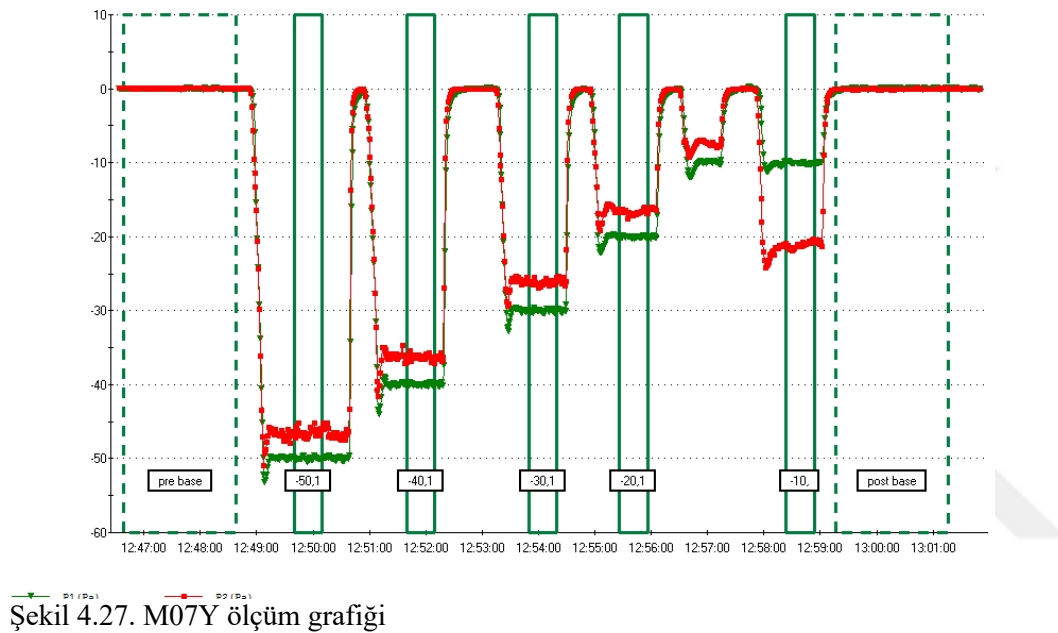
Şekil 4.25. M06G ölçüm grafiği



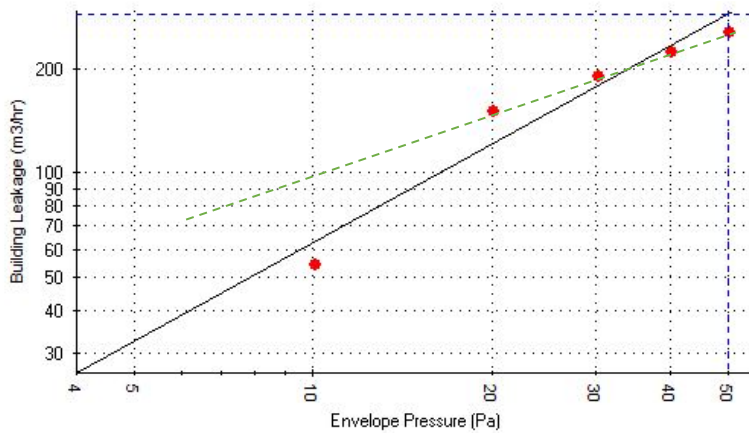
Şekil 4.26. M06G kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

4.1.1.7. Basıncsızlaştırma Testi: M07Y ve M07G Kodlu Ölçümler

Ön ölçüm protokolünün uygulandığı 203 no'lu hacimde, 19.04.2021 tarihinde 12:47-13:02 saatleri arasında M07Y kodlu basıncsızlaştırma testi yapılmıştır. Test esnasında bina/koridor kapı ve pencereleri açık, elektrik armatürleri kapalı, basınç ölçüm aygıtı ve fan içeri konumdadır ve dış sıcaklık ortalaması 11,1°C, dış basınç ortalaması 1007,20 Pa, rüzgâr yönü KD, rüzgâr hızı 1,8 m/s ve iç sıcaklık ortalaması 27,19°C'dir (Çizelge 4.1).



Şekil 4.27. M07Y ölçüm grafiği

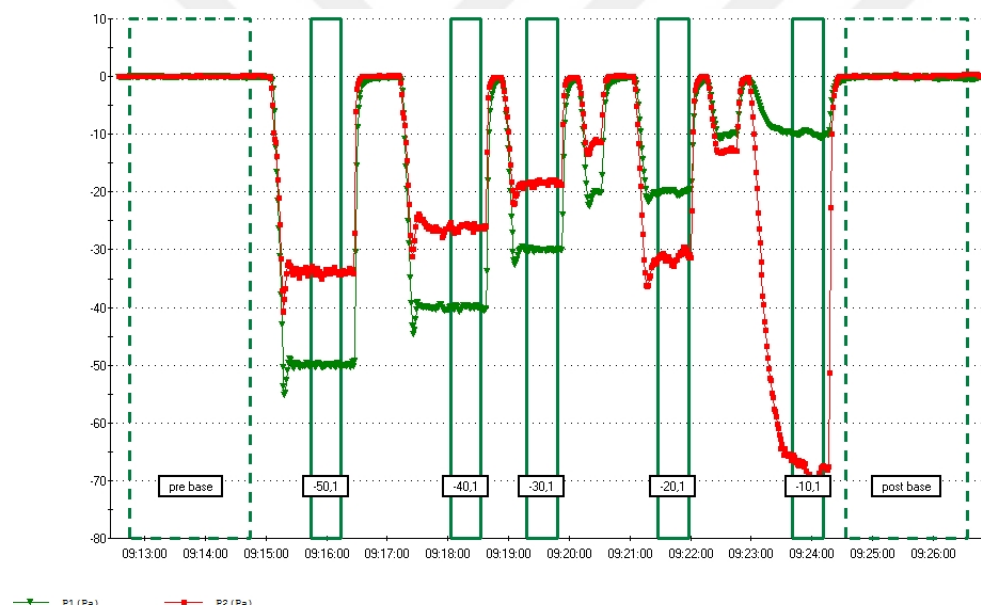


Şekil 4.28. M07Y kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

Ön referans değeri (*pre-baseline*) -0,1Pa olarak ölçülmüştür (Şekil 4.27). Ölçüme C halkası ile başlanmış ancak 10 Pa basınç farkı elde edilemediği için bu aşamada D halkası takılarak ölçüm sonlandırılmıştır. Düzeltilmemiş hava akış oranı @50Pa 293 m³/h olarak

saptanmış, düzeltilmiş oran ise $287 \text{ m}^3/\text{h}$ olarak tespit edilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre hata payı $\pm 37,80$, akış üs değeri (n) $0,947 (\pm 0,016)$ ve korelasyon katsayısı (r^2), $0,94971$ olarak saptanmıştır (Çizelge 4.2; Çizelge 4.3; Şekil 4.27) ve bu test sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarına ($n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$) göre geçerli değildir. M07Y kodlu ölçümde D halkası ile indüklenen 10 Pa basınç farkı ihmal edildiğinde $n = 0,574 (\pm 0,006)$ ve $r^2 = 0,99999$ değerlerini sağlanmaktadır (Şekil 4.28 – kesikli çizgi).

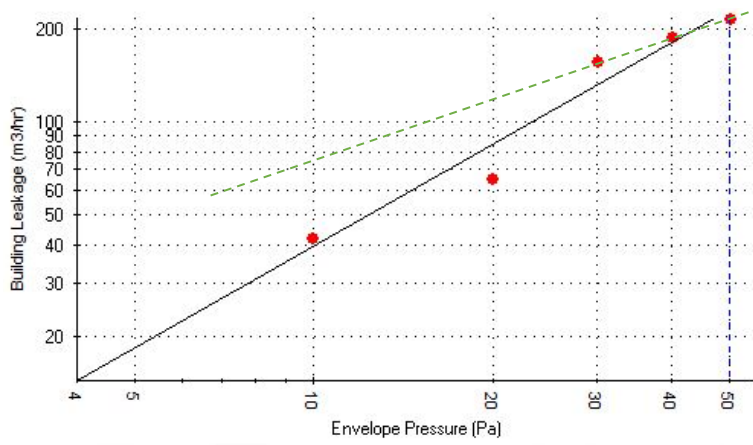
M07G kodlu güneşli günde gerçekleştirilen basınçsızlaştırma testi bina/koridor kapı ve pencereleri açık, elektrik armatürleri kapalı, basınç ölçüm aygıtı ve fan içeri konumda iken 20.04.2021 tarihinde 09:12-09:24 saatleri arasında, 10,66°C dış sıcaklık ortalaması, 1005,30 Pa dış basınç ortalaması, G-GGD rüzgâr yönü, 1,8 m/s rüzgâr hızı ve 27,10°C iç sıcaklık ortalamasında gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.1).



Şekil 4.29. M07G ölçüm grafiği

Sıfır basınç farkında ön referans değeri (*pre-baseline*) -0,1Pa olarak ölçülmüştür (Şekil 4.29). Ölçüme C halkası ile başlanmış ancak 20 Pa ve 10 Pa basınç farkları elde edilemediği için bu aşamada sırasıyla D ve E halkaları takılarak ölçüm tamamlanmıştır. Düzeltilmemiş hava akış oranı @50Pa 236 m³/h, düzeltilmiş oran ise 233 m³/h olarak tespit edilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre hata payı %±41,10, akış üs değeri (*n*) 1,101 (±0,473) ve korelasyon katsayısı (*r*²), 0,94814 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.2; Çizelge 4.3; Şekil 4.30). M07G kodlu ölçümün sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarına (*n*<0,5 ya da *n*>1,00, ve *r*²<0,99) göre geçerli

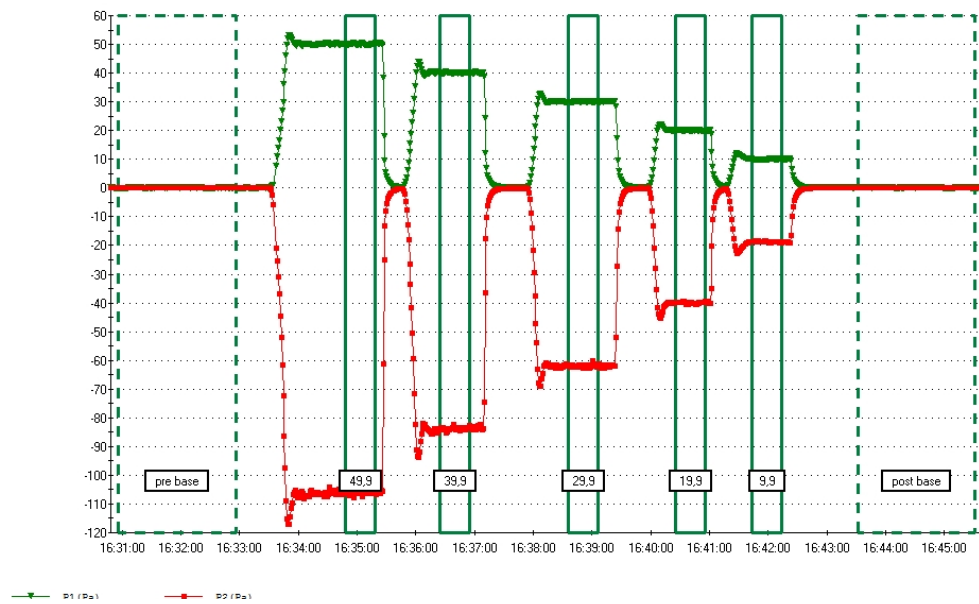
değildir. D ve E halkaları ile indüklenen 20 ve 10Pa basınç farkları ihmal edildiğinde $n=0,616$ (± 0.125) ve $r^2=0,99975$ değerlerini sağlamaktadır (Şekil 4.30 – kesikli çizgi).



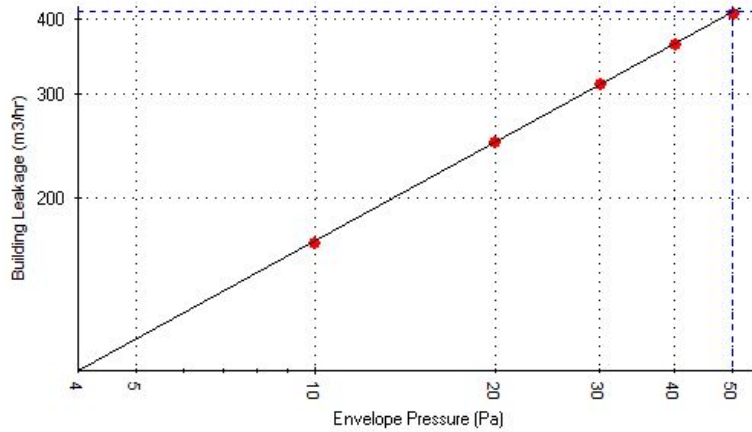
Şekil 4.30. M07G kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

4.1.1.8. Basınçlandırma Testi: M08Y ve M08G Kodlu Ölçümler

M08Y basınçlandırma testi 19.04.2021 tarihinde (yağmurlu gün) 16:31-16:45 saatleri arasında tamamlanmıştır ve bu test esnasında bina/koridor kapı ve pencereleri açık, elektrik armatürleri kapalı, basınç ölçüm aygıtı ve fan dışarı konumdadır. Test esnasında dış sıcaklık ortalaması 12,9°C, dış basınç ortalaması 1004,50 Pa, rüzgâr yönü GD-G, rüzgâr hızı 0,9 m/s ve iç sıcaklık ortalaması 27,31°C'dir (Çizelge 4.1).



Şekil 4.31. M08Y ölçüm sonuçları

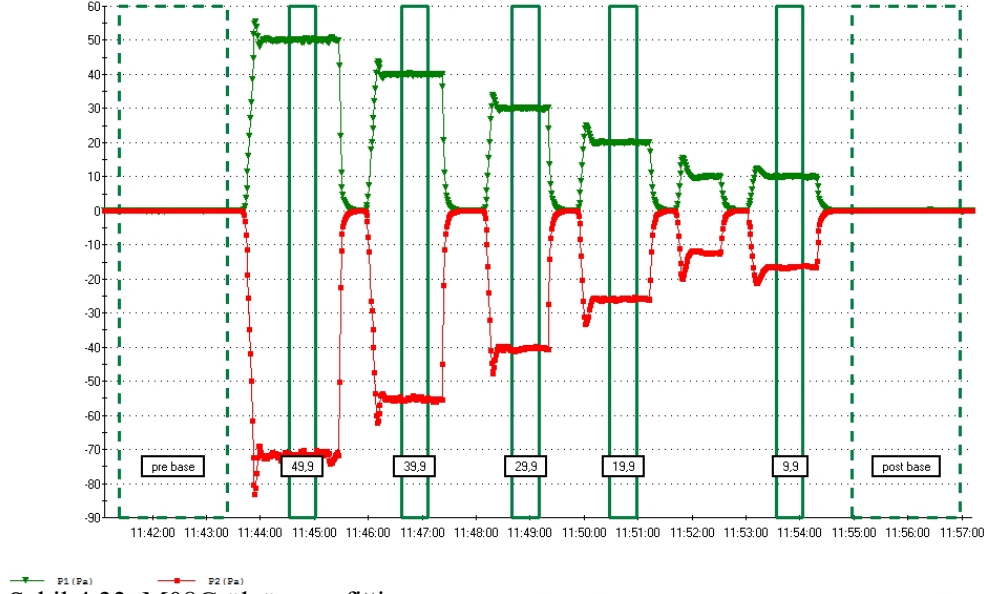


Şekil 4.32. M08Y kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

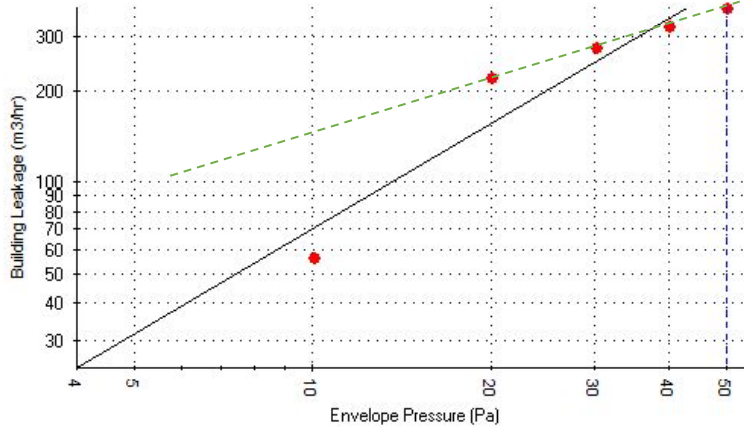
Ölçüm öncesi referans basınç -0,1 Pa olarak ölçülmüş, indüklenen basınç farkları için C halkası kullanılmıştır (Şekil 4.31). Düzeltilmemiş hava akışı @50Pa 399 m³/h düzeltilmiş hava akışı 412 m³/h olarak saptanmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre hata payı $\pm 0,70$, akış üs değeri (n) 0,550 ($\pm 0,008$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,99993 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.2; Çizelge 4.3; Şekil 4.32). Ölçümün sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarına ($n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$) göre geçerlidir.

Aynı hacimde güneşli gün ölçümü olan M08G kodlu basınçlandırma testi, bina/koridor kapı ve pencereleri açık, elektrik armatürleri kapalı, basınç ölçüm aygıtı ve fan dışarı konumda iken 20.04.2021 tarihinde 11:41-11:57 saatleri arasında dış sıcaklık ortalaması 14,4°C, dış basınç ortalaması 1005,70 Pa, rüzgâr yönü G-GB-GGD, rüzgâr hızı 1.6 m/s koşullarında yapılmıştır. Ölçüm yapılan hacmin belirtilen saatlerde sıcaklık ortalaması 28,69°C'dir (Çizelge 4.1)

Ön referans basınç değeri -0,1 Pa olarak ölçülmüş, ölçüme C halkası ile başlanmış ancak 10Pa basınç farkı indüklenemediği için E halkası ile ölçüm sonlandırılmıştır (Şekil 4.33). Düzeltilmemiş hava akışı @50Pa 389 m³/h düzeltilmiş hava akışı 447 m³/h olarak saptanmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre hata payı $\pm 59,10$, akış üs değeri (n) 1,149 ($\pm 0,008$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,90488 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.2; Çizelge 4.3; Şekil 4.34). Ölçümün sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarına ($n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$) göre geçerli değildir. E halkası ile indüklenen 9,9Pa basınç farkı ihmal edildiğinde $n = 0,568$ ($\pm 0,025$) ve $r^2 = 0,99979$ değerlerini sağlamaktadır (Şekil 4.34 – kesikli çizgi).



Şekil 4.33. M08G ölçüm grafiği

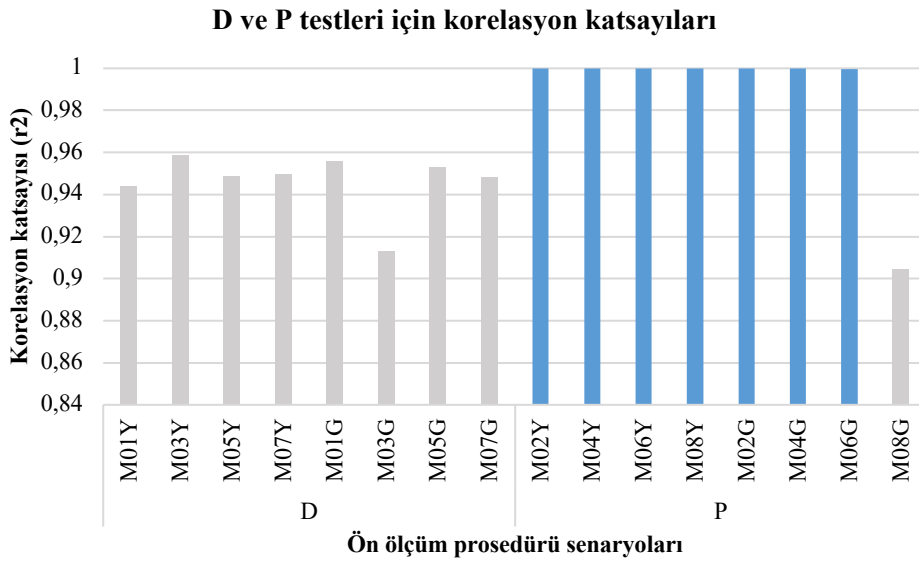


Şekil 4.34. M08G kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

4.1.2. Ön Ölçüm Protokolü – Karşılaştırmalı Bulgular

Veriler senaryoları kuran ana yaklaşımlar ve ölçüm sonuçları üzerinden sistematik olarak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalardan ilki senaryoların kurucu ögesi olan ve ölçümlerin etkinliğini belirlemek için kullanılan bir parametre olan fan/ölçüm cihazı konumudur. Fan/ölçüm cihazının ölçüm yapılan mekana göre konumu aynı zamanda test yönteminin de belirleyicisidir. Fan ve ölçüm cihazının mekan içerisinde konumlanması basınçsızlaştırma (*depressurization – D*) testlerini, dışarıda konumlanması ise basınçlandırma (*pressurization -P*) testlerini gerektirmektedir. Çizelge 4.2 ve 4.3'te ve Bölüm 4.1.1'de görüldüğü gibi her senaryo bu temel ölçüm farklılığı üzerinden tartışılmalıdır. Bu bağlamda

tüm ölçümler (düzeltilmemiş sonuçlar üzerinden) *D* ve *P* testleri olarak sınıflandırılarak karşılaştırıldığında (Şekil 4.35) M02 ve M06 arası uygulanmış tüm basınçlandırma testlerinin ASTM E779 (2003) tarafından geçerli kabul edilen $r^2 < 0,99$ koşulunu sağladığı görülmektedir. M08G testinin istisnası, ön ölçüm prosedürünün nispeten küçük bir mekânda (9,30 m² taban alanı ve 28,83 m³ hacim) uygulanmasına bağlı olarak düşük basınçların indüklenememesi sonucu halka değiştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum gerçekte basınçsızlaştırma testleri için de geçerlidir ancak basınçsızlaştırma testlerinde 20Pa basınç farkının da indüklenemediği testler gerçekleşmiş ve bu testlerin tümü geçersiz kabul edilmiştir (M03G, M05Y ve M05G). Bu bağlamda **kesinleşmiş ölçüm protokolünde basınçlandırma (pressurization -P) testlerinin uygulanması ve ileriki bölümlerin değerlendirilmesinde temel kabul edilmesine** karar verilmiştir. Standartlar tarafından açıkça belirtilmiş olan basınçlandırma ve basınçsızlaştırma testlerinin mümkün olduğunca bir arada kullanılması prensibine bağlı kalınarak kesinleşmiş ölçümlerde uygun tüm durumlarda basınçsızlaştırma testleri de yapılmıştır.



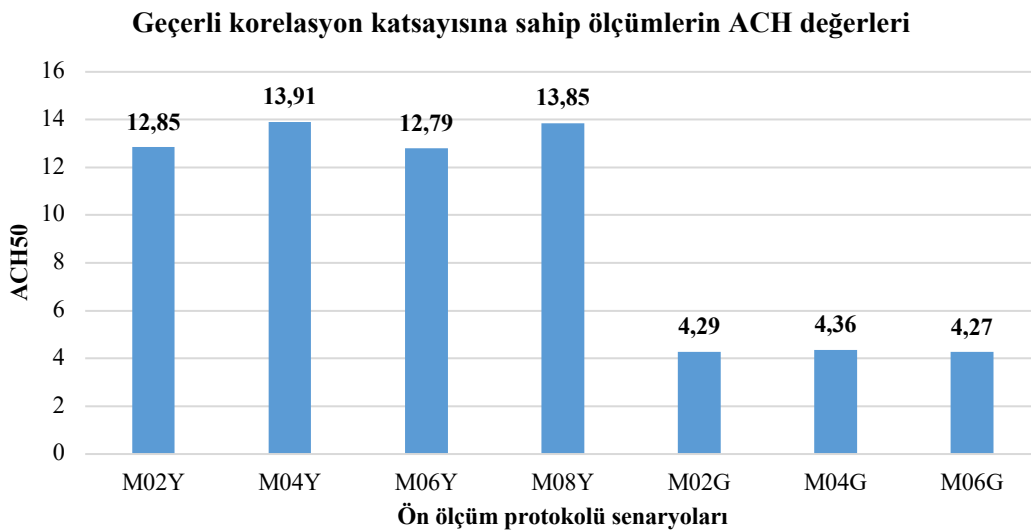
Şekil 4.35. Uygulanan ön ölçüm senaryosuna ait basınçsızlaştırma (D) ve basınçlandırma testlerine ait korelasyon katsayıları (r^2)

Elektrik armatürlerinin sızdırmazlığının sağlanması ya da olduğu gibi bırakılmasının test koşullarına etkisini değerlendirmek amacıyla her test için ACH50 değeri hesaplanmıştır. ACH50 değerinin hesaplanmasında düzeltilmemiş ölçüm sonuçlarından (Çizelge 4.1) CFM50 değeri temel alınmıştır. Bölüm 2’de de ifade edildiği gibi CFM50 Denklem 4.1’de kullanılarak hesaplanabilmektedir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken nokta hacim bilgisinin doğru

girilmesidir. Çünkü, CFM50, 50Pa basınç farkı yaratılan ölçüm süreci boyunca, üfleyici fandan akan havanın dakikada kübik feet (ft³/min) cinsinden ölçülen miktarına karşılık gelmektedir (TEC, 2017).

$$ACH50 = \frac{CFM50 \times 60}{V} \quad \text{Denklem (4.1)}$$

Denklem 4.1 kullanılarak, ölçülen fan hava akış oranları CFM50 ve ft³ cinsinden hacim bilgisi aracılığıyla geçerli korelasyon katsayısına sahip ön ölçüm protokolü senaryoları için ACH50 değeri hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 4.36’te sunulmaktadır. Bu sonuçlara göre, M02X ve M06X kodlu elektrik armatürlerinin sızdırmazlığının sağlandığı ölçümler ile M04X ve M08X kodlu elektrik armatürlerinin sızdırmazlığının sağlanmadığı ölçümler arasında yağmurlu gün ölçümleri için daha belirgin bir farklılık saptanırken güneşli gün ölçümleri için anlamlı bir farklılık saptanmamıştır. M02Y ve M04Y ölçümleri arasında tek farklılık elektrik armatürlerinin sızdırmazlığı olup hata payı 0,082 olarak saptanmıştır. M06Y ve M08Y arasında da tek fark elektrik armatürlerinin sızdırmazlığıdır ve hata payı yine 0,082’dir (Şekil 4.36). M02G ve M04G ölçümleri arasında da diğer tüm koşullar aynı iken elektrik armatürlerinin sızdırmazlık koşulu farklıdır ve bu iki ölçüm arasında da ACH50 için hata payı 0,016 olarak saptanmıştır (Şekil 4.36). Bu bağlamda, **kesinleşmiş ölçüm protokolünde elektrik armatürlerinin sızdırmazlığı sağlanmaksızın ölçümlerin yapılmasına ve ileriki bölümlerde güneşli gün hata payının gerektiği durumlarda değerlendirmeye alınmasına karar verilmiştir.**



Şekil 4.36. Geçerli korelasyon katsayısına sahip ön ölçüm protokolü senaryolarının ACH değerleri

Şekil 4.36 aynı zamanda bir başka veriyi de ortaya koymaktadır. Yağmurlu günde yapılan ölçümler ve güneşli günde yapılan ölçümler arasında ACH50'nin tespiti bakımından belirgin bir farklılık görülmektedir. Yağmurlu günde ölçülen ACH50 değerleri güneşli günlerde tespit edilen düzeyin yaklaşık 3 katıdır. Bu durum Çizelge 4,1'de sunulan ön ölçüm prosedürü süresince gerçekleşen dış ortam ortalama basınç değerlerindeki dalgalanmanın bir sonucu olabileceği yorumlanmaktadır. Yağmurlu gün ölçümleri süresince dış ortam basınç değerleri 1003,50 Pa ile 1008,60 Pa arasında dalgalanma gösterirken güneşli gün ölçümleri esnasında 1005.23 Pa ile 1005,76 Pa aralığında, neredeyse sabit kabul edilebilecek düzeydedir. Kesinleşmiş ölçüm prosedüründe, dış hava koşullarının ölçümleri etkileyebileceği bilinmektedir (ASTM E779, 2003). Bu nedenle, **kesinleşmiş ölçüm protokolünde ölçümlerin güneşli/yağışsız günlerde yürütülmesine karar verilmiştir.**

Diğer yandan, Şekil 4.36 bina/koridor pencerelerinin açık ya da kapalı olmasına ilişkin verileri de içermektedir. M02X ve M04X kodlu ölçümler bina/koridor pencere ve kapıları kapalı, M06X ve M08X kodlu ölçümler bina/koridor pencere ve kapıları açık olarak yürütülmüştür. Bu bağlamda, diğer tüm koşulları aynı olan M02X ve M06X kodlu ölçümlere ait ACH50 verileri arasında hata payı, hem yağmurlu ve güneşli günde yapılan ölçüm setlerinde, 0,0046 olarak saptanmıştır. Bu ihmal edilebilir bir değerdir. Bu nedenle, **kesinleşmiş ölçüm protokolünde ölçümlerin bina/koridor pencere ve kapıları açık olarak yürütülmesine karar verilmiştir.** Bu kararın sebebi kısmi de olsa ortak koridor mekanına açılan hacimler için dış mekân koşullarına yaklaşabilmektir.

Özetle, kesinleşmiş ölçüm protokolü güneşli/yağışsız günlerde,

- Elektrik armatürlerinin sızdırmazlığı sağlanmaksızın
- Bina/koridor pencere ve kapıları açık olarak
- Basınçlandırma (pressurization – P) ve basınçsızlandırma (depressurization – D) testlerinin bir arada uygulanması üzerinden gerçekleştirilmiştir.

4.2. Kesinleşmiş Ölçüm Protokolü Bulguları

Ön ölçümler sonucu elde edilen ve 4.1.2 bölümünde aktarılan karar verme mekanizması sonucunda kesinleşmiş ölçüm protokolüne geçilmiştir. Bu noktada alınan önemli bir diğer

karar da ölçüm sırasında akış halkası değişikliği yapmanın doğruluk oranını etkilemesi nedeniyle halka değişikliği yapılmamasıdır. Bu nedenle halka değişikliği yapılmayan ölçümlerde düşük basınç farklarının test edilememesi riskine karşı, daha fazla çoklu-nokta ölçümü alabilmek için basınç farkı uygulama aralıkları değiştirilmiştir. Aynı akış halkası kullanılarak indüklenebilen en yüksek ve en düşük basınç farkları her uygulamadan önce test edilmiş ve ölçüm doğruluğunu artırmak için ölçüm yapılan nokta sayısı artırılmış ve 5Pa aralıklarla basınç farkı indüklenmiştir. Ayrıca ön ölçüm sonuçlarında en doğru ölçümlerin bina/koridor kapı ve pencereleri açık durumda gerçekleştiği, elektrik armatürlerinin ölçüm sonuçlarında belirgin farklılıklar yaratmadığı gözlemlenmiştir (Bölüm 4.1.2). Bu sebeple kesin ölçüm protollerinin tümünde koridor kapı ve pencereleri açık, elektrik armatürleri açık konumda ölçümler yapılmıştır. Her ortam için basınçlandırma ve basınçsızlaştırma testleri gerçekleştirilmiştir. Aynı ortamın testlerinin aynı günde tamamlanmasına dikkat edilmiştir. Yine yapılan ön ölçümlerde yeşil tüp ucunun fan akış alanında kalması halinde ölçüm sonuçlarının doğruluğunu etkilediği anlaşılmış, bu nedenle kesinleşmiş ölçüm protokolünde yeşil tüpün fan hizasına denk getirilmemesine dikkat edilmiştir. Genel olarak fan hizasına hiçbir ölçüm alt ekipmanı (tüpler) yerleştirilmemiştir.

Kesinleşmiş ölçüm protokolü kapsamında yürütülen testlere, ön ölçüm protokolünde uygulanan test koşulları ile ortak prosedüre sahiptir. Kesinleşmiş ölçüm protokolünde de;

- Ölçüm yapılan hacim, komşu hacimler ve koridora her mekan için 3 adet olmak üzere ısı ve nem kaydedici Testo 174 cihaz yerleştirilmiştir. Ortam iç sıcaklıkları bu cihazla 10 dakikalık aralıklarla kaydedilen verilerin ölçüm saatlerindeki ortalaması alınarak elde edilmiştir.
- Dış hava koşullarına ilişkin mikroklimatik veriler (rüzgar hızı - m/s, dış sıcaklık - °C, dış hava basıncı - Pa) ölçüm yapılan binanın karşısında bulunan bir başka binanın çatısında konumlandırılmış DavisPro Vantage hava istasyonu aracılığıyla 10 dakikalık aralıklarla kaydedilmiştir. Bu veriler, 10 dakikalık aralıklarla kaydedilen ölçüm saatlerindeki ortalama alınarak kesinleştirilmiştir.
- Ölçüm yapılan hacimlerin komşu hacimlerine ait iç mekan basınç ölçümleri Testo 480 kullanılarak manuel olarak kaydedilmiş ve ortalaması alınmıştır.
- Ön ölçüm protokolünde uygulanacak tüm testlerden önce alt sınır (min 10Pa) ve üst sınır (max 60Pa) olmak üzere alt ve üst indüklenmiş basınç değerleri test edilmiştir.

- Tüm basınçlandırma ve basınçsızlaştırma testlerinde ölçüme başlamadan önce sıfır fan akışında ön referans değer (*pre-baseline*) ve ölçüm sonunda koşulların değişmediğini kontrol edebilmek ve ölçümü kabul edebilmek amacıyla sıfır fan akışında son referans değer (*post-baseline*) ölçümleri 120 sn süreyle TECLOG 4.0 yazılımı ile yapılmıştır. TECLOG 4.0 ön ve son referans değerlerin ortalamasını vermektedir.
- TECLOG 4.0 tarafından 120 saniyelik ortalama olarak verilen ön referans değer (*pre-baseline*) ölçüm için indüklenecek basınç farkı değerlerine her seferinde eklenmiş ve 30 sn'lik indüklenmiş basınç ölçümleri alınmıştır. İndüklenmiş basınç farkları 5Pa basınç farkı aralığında uygulanmıştır.
- Ölçümler son referans değerinin (*post-baseline*) 120 sn süreyle kaydedilmesi ve TECLOG 4.0 yazılımının aldığı ortalamanın kontrol edilmesi ile tamamlanmıştır.

Kesinleşmiş ölçüm protokolü, Şekil 3.14'te sunulduğu gibi, birinci katta toplam 3 mekânda (101: derslik, 102: derslik, 108: ofis), ikinci katta da toplam 5 mekanda (201: derslik, 202: derslik, 203: ofis, 206: ofis, 208: ofis) yürütülmüş, toplamda 8 mekanda 16 ölçüm ile tamamlanmıştır (basınçlandırma – *P* ve basınçsızlaştırma – *D*). 203'e ait ön ölçümlerden M07Y 203D olarak, M04G'de 203P olarak kabul edilmiştir.

4.2.1. Mekân Bazında Kesinleşmiş Ölçüm Protokolü Sonuçları

Kesinleşmiş ölçüm protokolüne ait bulgular öncelikle her mekân için ayrı ayrı aktarılacaktır. Bölüm 4.2.2'de karşılaştırmalı sonuçlar irdelenecektir. Kesinleşmiş ölçüm protokolü için test yapılan tüm hacimler güney yönlenmelidir. Tüm ölçümler sıcaklık ve rakım bilgisi düzeltilmesi yapılmadan gerçekleştirilmiş (nominal CFM50) ve ölçüm sonrasında düzeltilmiş ACH50 rakım, dış ve iç sıcaklık ortalamaları ve test çeper alanı verilerinin TECLOG4 yazılımına entegre edilmesi ile saptanmıştır. Kesinleşmiş ölçüm protokolü kapsamında uygulanan basınçsızlaştırma ve basınçlandırma testlerine ait ait iç ve dış ortam verileri Çizelge 4.4'te sunulmaktadır. Alt bölümlerde irdelenen ölçüm senaryolarına ait bulgular bu tabloya referansla tartışılmaktadır. Çizelge 4.5'te kesinleşmiş ölçüm protokolü kapsamında yapılmış ölçümlere ait düzeltilmemiş veriler, 4.6'da ise rakım, dış ve iç sıcaklık ortalamaları ve test çeper alanı ile düzeltilmiş veriler sunulmaktadır. Bu veriler ilgili alt bölümlerdeki tartışmalarda kullanılacaktır.

Çizelge 4.4. Kesinleşmiş Ölçüm Prosedüründe basınçlandırma (*P*) ve basınçsızlaştırma (*D*) testlerine ait iç ve dış ortam verileri

Ölçüm	Tarih	Ölçüm Başlangıç	Ölçüm Bitiş	İç Ortam Sıcaklık Ortalamaları (°C)				İç Ortam Basınç Ortalamaları (Pa)			Dış Sıcaklık Ortalama (°C)	Dış Ortam Basınç Ortalama (Pa)	Rüzgâr Yönü	Rüzgâr Hızı (m/s)
				A	B	C	O	A	B	C				
101P	26.04.2021	16:47	17:14	--	26,10	19,30	24,30	918,24	918,21	918,23	9,13	1010,23	GB-BGB-GGB	1,90
101D	26.04.2021	17:58	18:20	--	25,68	16,24	24,00	918,33	918,32	918,30	9,43	1010,53	GB-GGB	2,35
102P	22.04.2021	16:34	16:59	26,94	25,15	21,03	25,69	923,37	923,34	923,32	18,73	1014,58	GB-GGB	0,65
102D	22.04.2021	17:19	17:44	26,98	25,19	20,46	26,08	923,20	923,24	923,20	18,56	1014,50	GB	0,56
108P	27.04.2021	19:01	19:20	24,99	STF	24,34	26,07	915,67	915,65	915,68	17,56	1005,80	KD	0,73
108D	27.04.2021	19:28	19:49	24,21	STF	23,72	26,34	915,75	915,79	915,75	16,93	1005,90	KD	1,03
201P	21.04.2021	12:05	12:31	23,01	25,8	21,53	25,62	919,71	919,77	919,73	14,13	1011,60	BGB-KKD-D-DGD	0,65
201D	21.04.2021	15:20	15:40	23,43	20,33	19,79	25,80	918,99	918,97	918,95	16,93	1010,60	GGD-GB	0,73
202P	20.04.2021	15:52	16:18	28,12	26,13	21,53	23,56	914,05	914,06	914,05	14,83	1004,83	GGB-GGD-GB	1,68
202D	20.04.2021	17:17	17:45	27,45	25,49	19,79	23,50	914,57	914,58	914,58	13,48	1005,33	GB-GGB	1,45
206P	22.04.2021	14:20	14:42	24,00	25,37	21,12	23,01	923,36	923,34	923,37	17,46	1015,13	G-GB-GGB	0,90
206D	22.04.2021	15:35	15:59	24,06	25,33	20,40	23,21	923,14	923,19	923,15	19,03	1014,78	GB	1,00
208P	22.04.2021	13:19	13:43	26,63	23,94	21,23	23,59	923,55	923,57	923,53	15,53	1015,38	GGD-GGB	1,10
208D	22.04.2021	11:33	11:58	26,08	23,69	21,41	23,32	924,03	924,01	924,00	13,76	1015,90	GGD-GB	0,73

Çizelge 4.5. Kesinleşmiş Ölçüm Prosedüründe yürütülmüş testlere ait hata payı ve korelasyon katsayıları (düzeltilmemiş)

Ölçüm	CFM @50Pa /sqft	Hava Akışı @50Pa (m ³ /h)	Hava Akışı Hata Payı (±%)	Akış Üs Değeri (n)	Akış Üs Değeri (n) Hata Payı (±)	EqLA (10Pa) (cm ²)	EqLA (10Pa) Hata Payı (±%)	ELA (4Pa) (cm ²)	ELA (4Pa) Hata Payı (±%)	C (Coef) (m ³ /h/Pa ⁿ)	C (Coef) Hata Payı (±%)	Korelasyon Katsayısı (r ²)
101P	567,00	964,00	1,00	0,503	0,021	458,30	2,90	272,40	4,80	121,30	7,60	0,99804
101D	361,00	613,00	1,20	0,505	0,051	303,30	8,80	184,40	13,50	84,90	20,50	0,98999
102P	241,00	409,00	1,70	0,499	0,022	204,20	2,40	124,90	4,30	58,00	7,20	0,99764
102D	218,00	370,00	2,30	0,617	0,040	152,90	5,20	84,00	8,70	33,10	14,10	0,99386
108P	346,00	588,00	0,60	0,656	0,008	228,40	0,80	121,00	1,50	45,20	2,50	0,99983
108D	243,00	413,00	0,50	0,583	0,006	180,30	0,70	102,10	1,20	42,20	2,10	0,99985
201P	430,00	730,00	3,70	0,494	0,035	367,90	3,70	226,10	6,50	105,80	11,00	0,99270
201D	260,00	442,00	2,60	0,651	0,040	172,70	4,70	91,90	8,30	34,60	13,80	0,99620
202P	284,00	482,00	1,70	0,590	0,022	208,10	2,50	117,00	4,40	47,90	7,30	0,99829
202D	237,00	403,00	2,00	0,634	0,030	162,00	3,50	87,50	6,10	33,70	10,30	0,99775
206P	81,04	138,00	1,60	0,601	0,020	58,40	2,20	32,50	3,90	13,10	6,60	0,99865
206D	59,11	100,00	0,80	0,673	0,017	37,90	2,30	19,80	3,90	7,20	6,20	0,99920
208P	42,59	72,37	1,20	0,668	0,015	27,60	1,70	14,40	2,90	5,30	5,00	0,99937
208D	42,69	72,54	1,20	0,708	0,015	25,90	1,70	13,10	3,00	4,60	5,10	0,99941
203P	74,00	126,00	1,00	0,588	0,012	54,40	1,30	30,70	2,30	12,60	3,90	0,99988
203D	153,00	260,00	0,30	0,574	0,006	115,30	0,80	65,80	1,30	27,60	2,10	0,99999

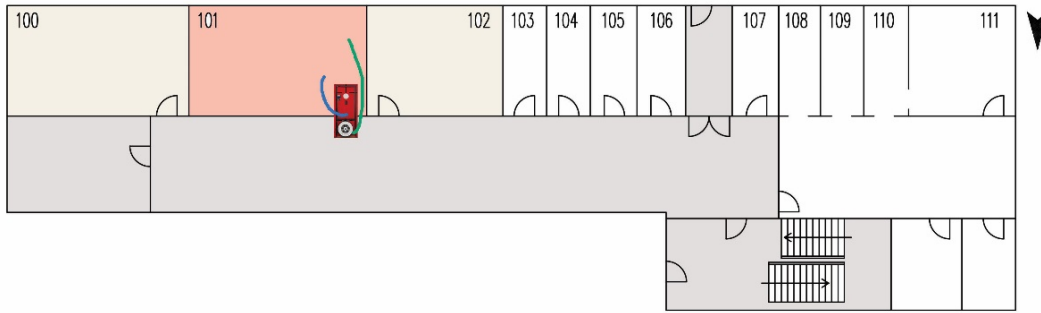
Çizelge 4.6. Kesinleşmiş Ölçüm Prosedüründe yürütülmüş testlere ait hata payı ve korelasyon katsayıları (düzeltilmiş)

Ölçüm	CFM @50Pa /sqft	Hava Akışı @50Pa (m ³ /h)	Hava Akışı Hata Payı (±%)	Akış Üs Değeri (n)	Akış Üs Değeri (n) Hata Payı (±)	EqLA (10Pa) (cm ²)	EqLA (10Pa) Hata Payı (±%)	ELA (4Pa) (cm ²)	ELA (4Pa) Hata Payı (±%)	C (Coef) (m ³ /h/Pa ⁿ)	C (Coef) Hata Payı (±%)	Korelasyon Katsayısı (r ²)
101P	584,00	993,00	1,00	0,503	0,021	472,20	2,90	280,70	4,80	125,00	7,60	0,99804
101D	352,00	597,00	1,20	0,505	0,051	295,60	8,80	197,70	13,50	82,80	20,50	0,98999
102P	243,00	413,00	1,70	0,499	0,022	206,60	2,40	126,40	4,30	58,70	7,20	0,99764
102D	217,00	369,00	2,30	0,617	0,040	152,80	5,20	83,90	8,70	33,10	14,10	0,99386
108P	359,00	611,00	0,60	0,656	0,008	237,10	0,80	125,60	1,50	46,90	2,50	0,99983
108D	241,00	409,00	0,50	0,583	0,006	178,60	0,70	101,20	1,20	41,80	2,10	0,99985
201P	438,00	744,00	3,70	0,494	0,035	375,10	3,70	230,50	6,50	107,90	11,00	0,99270
201D	259,00	440,00	2,60	0,651	0,040	172,00	4,70	91,50	8,30	34,40	13,80	0,99620
202P	292,00	496,00	1,70	0,590	0,022	213,90	2,50	120,30	4,40	49,20	7,30	0,99829
202D	235,00	398,00	2,00	0,634	0,030	160,30	3,50	86,60	6,10	33,40	10,30	0,99775
206P	82,78	141,00	1,60	0,601	0,020	59,70	2,20	33,20	3,90	13,40	6,60	0,99865
206D	59,65	101,00	0,80	0,673	0,017	38,30	2,30	19,90	3,90	7,30	6,20	0,99920
208P	44,03	74,81	1,20	0,668	0,015	28,50	1,70	14,90	2,90	5,50	5,00	0,99937
208D	42,46	72,13	1,20	0,708	0,015	25,80	1,70	13,00	3,00	4,50	5,10	0,99941
203P	76,13	129,00	1,00	0,588	0,012	56,00	1,30	31,50	2,30	12,90	3,90	0,99988
203D	149,00	254,00	0,30	0,574	0,006	112,30	0,80	64,10	1,30	26,80	2,10	0,99999

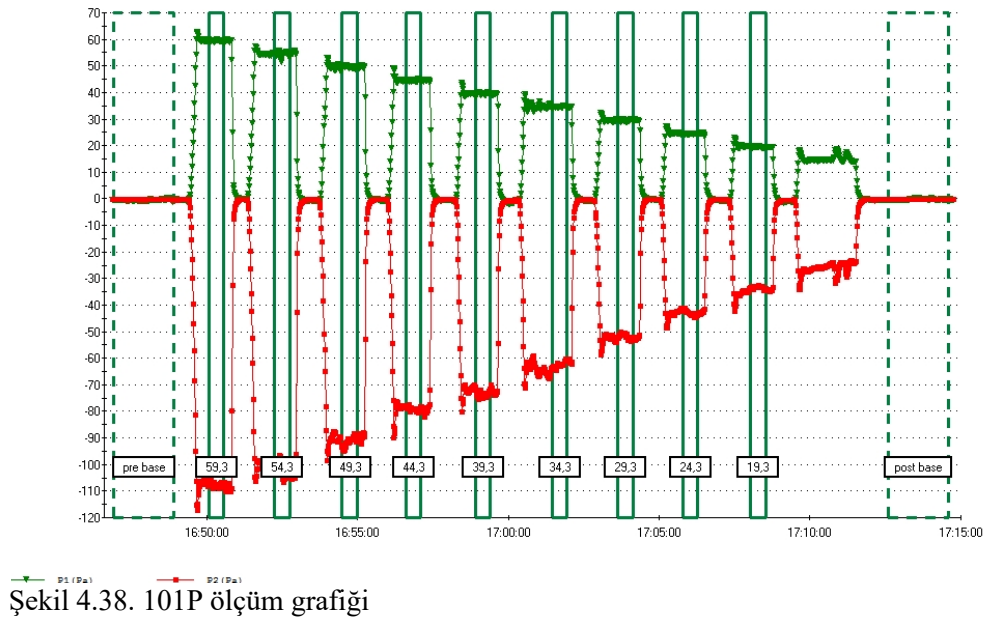
4.2.1.1. 101P ve 101D Kodlu Ölçümler

Birinci katta 101 no'lu hacimde gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarından önce genel bilgilerin verilmesi önem taşımaktadır. 101 no'lu hacim 41,6 m² net taban alanı, 3,1 m kat yüksekliği, 26,35 m² etkin cephe alanı ve 128,96 m³ hacme sahiptir. Toplam pencere alanı 11,88 m², pencere çevresi 27,6 m, açılan kanat pencere çevresi 14,00 m'dir (Şekil 4.37).

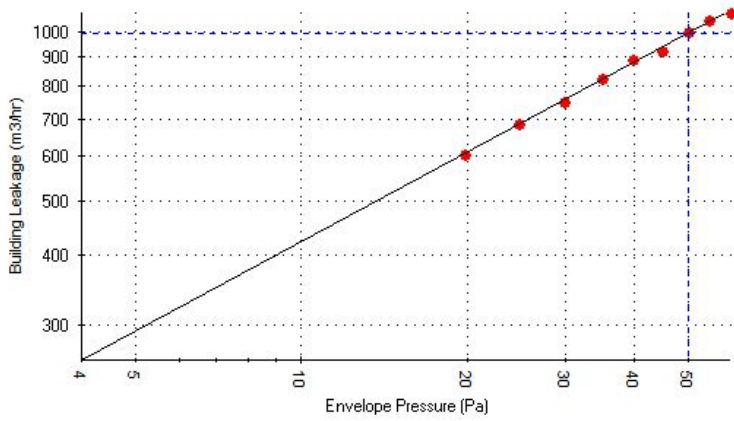
101P kodlu basınçlandırma testi basınç ölçüm aygıtı ve fan dışarı konumda iken 26.04.2021 tarihinde 16:47-17:14 saatleri arasında, 9,13°C dış sıcaklık ortalaması, dış basınç ortalaması 1010,23 Pa, rüzgâr yönü GB-BGB-GGB, rüzgâr hızı 1,9 m/s iken yapılmıştır. Ölçüm yapılan hacmin belirtilen saatlerde sıcaklık ortalaması 24,3°C'dir (Çizelge 4.4).



Şekil 4.37. 101P ölçüm şeması



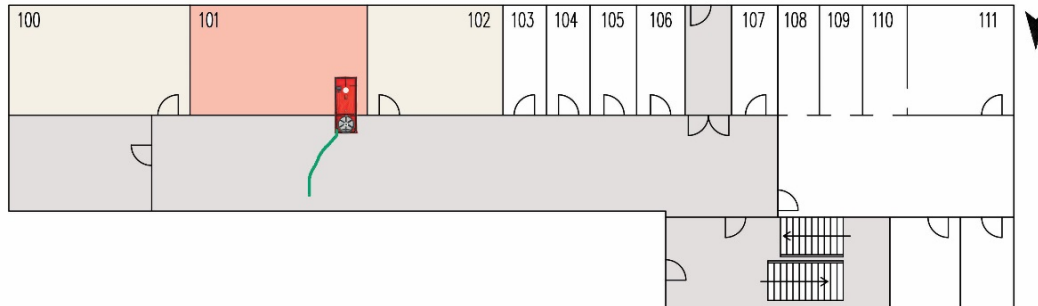
Şekil 4.38. 101P ölçüm grafiği



Şekil 4.39. 101P kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

Sıfır basınç farkında ön referans değeri (*pre-baseline*) -0,7Pa'dır (Şekil 4.38). Ölçüm B halkası ile yapılmıştır. Düzeltilmemiş hava akış oranı @50Pa 964 m³/h, düzeltilmiş oran ise 993 m³/h olarak tespit edilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre hata payı %±1,00, akış üs değeri (n) 0,503 ($\pm 0,021$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,99804 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.5; Çizelge 4.6; Şekil 4.39). 101P kodlu ölçümün sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarına ($n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$) göre geçerlidir.

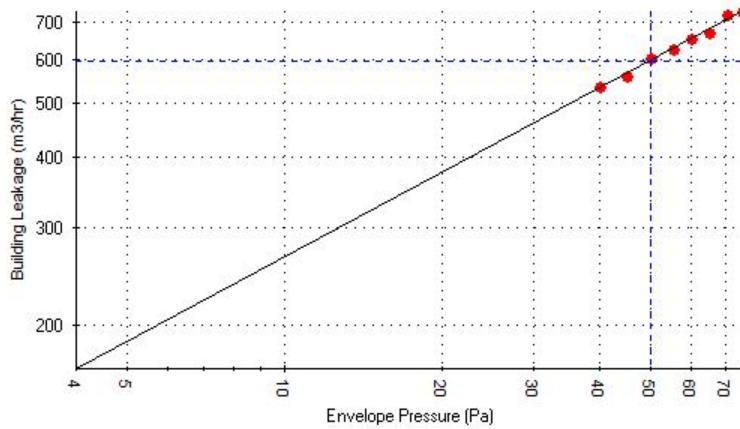
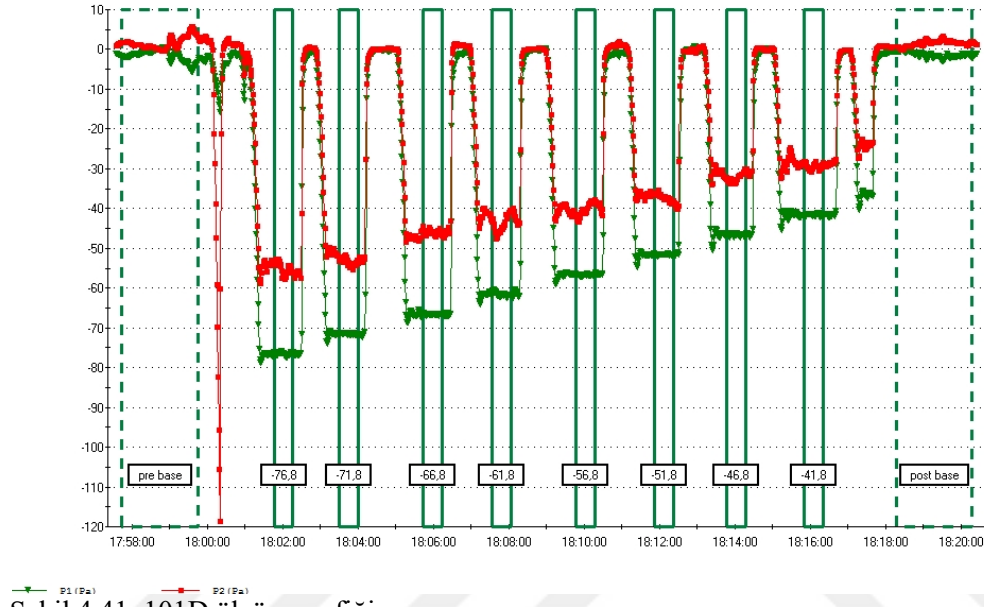
101D kodlu basınçsızlaştırma testi 26.04.2021 tarihinde 17:58-18:20 saatleri arasında dış sıcaklık ortalaması 9,43°C, dış basınç ortalaması 1010,53 Pa, rüzgâr yönü GB-GGB, rüzgâr hızı 2,35 m/s iken basınçsızlaştırma testleri yapılmıştır. Ölçüm yapılan hacmin belirtilen saatlerde sıcaklık ortalaması 24,0°C'dir (Çizelge 4.4). Ölçüm şeması Şekil 4.40'te sunulmaktadır.



Şekil 4.40. 101D ölçüm şeması

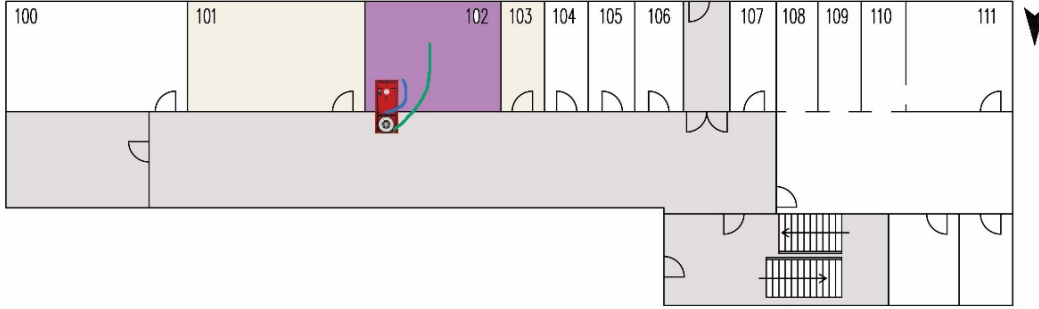
Ön referans değeri (*pre-baseline*) -1,8Pa olarak ölçülmüştür (Şekil 4.41). Ölçüm B halkası ile yapılmıştır. Düzeltilmemiş hava akış oranı @50Pa 613 m³/h, düzeltilmiş oran

ise 597 m³/h olarak tespit edilmiştir. 101D kodlu ölçüm sonuçlarına göre hata payı %±1,20, akış üs değeri (n) 0,505 ($\pm 0,051$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,98999 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.5; Çizelge 4.6; Şekil 4.40). 101P kodlu ölçümün sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarından $n < 0,5$ ya da $n > 1,00$ şartını sağlamakta ancak $r^2 < 0,99$ şartını sağlamamaktadır. Bu veri değerlendirmede göz önüne alınacaktır.



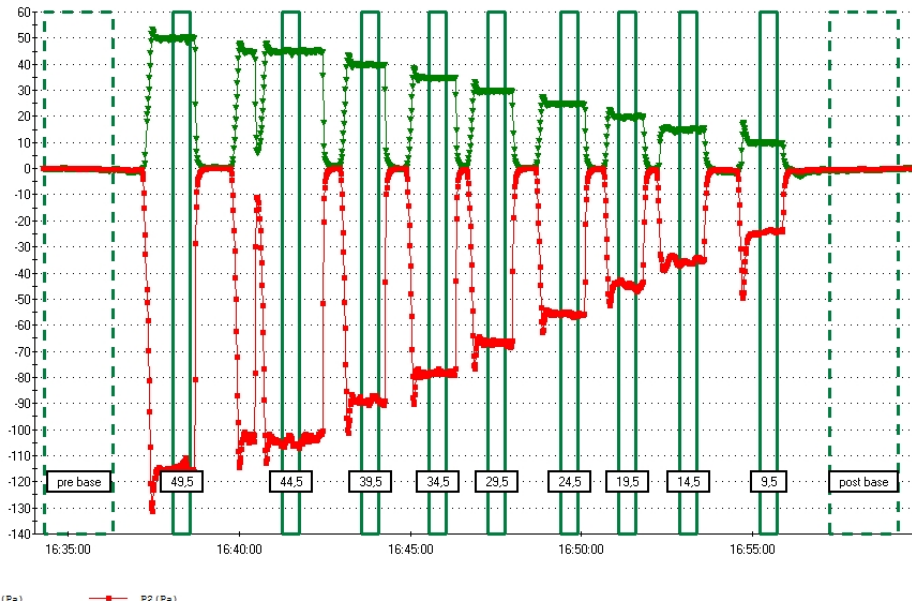
4.2.1.2. 102P ve 102D Kodlu Ölçümler

Birinci katta 102 no'lu mekân 31,1 m² net taban alanı, 3,1 m kat yüksekliği, 16,68 m² etkin cephe alanı ve 96,41 m³ hacme sahiptir. Toplam pencere alanı 8,91 m², pencere çevresi 20,7 m ve açılan kanat pencere çevresi 10,50 m'dir (Şekil 4.43).



Şekil 4.43. 102P ölçüm şeması

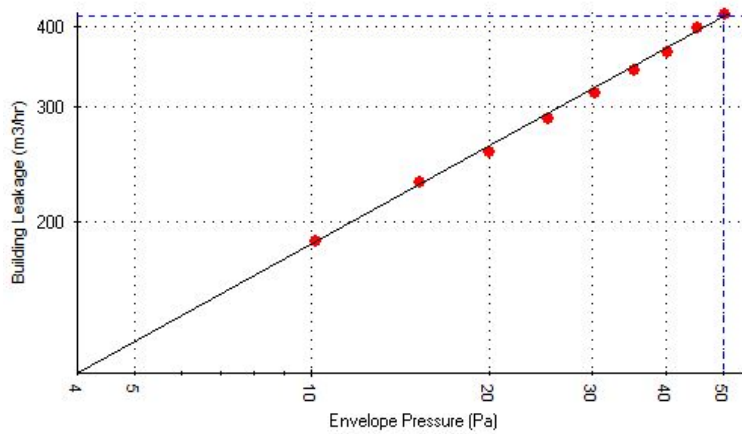
102P kodlu basınçlandırma testi 22.04.2021 tarihinde 16:34-16:59 saatleri arasında dış sıcaklık ortalaması 18,73°C, dış basınç ortalaması 1014,58 Pa, rüzgâr yönü GB-GGB, rüzgâr hızı 0,65 m/s iken yapılmıştır. Ölçüm yapılan hacmin belirtilen saatlerde sıcaklık ortalaması 25.69°C tir (Çizelge 4.4).



Şekil 4.44. 102P ölçüm grafiği

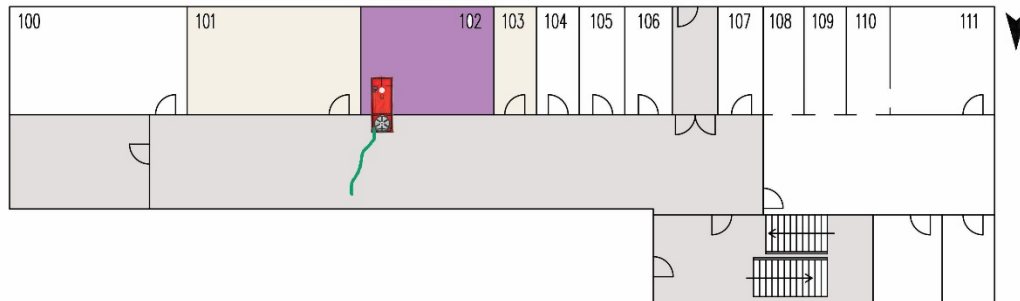
Sıfır basınç farkında ön referans değer (*pre-baseline*) -0,5Pa olarak ölçülmüştür (Şekil 4.44). Ölçüm C halkası ile yapılmıştır. Düzeltilmemiş hava akış oranının @50Pa 409

m^3/h , düzeltilmiş oranın ise $413 \text{ m}^3/\text{h}$ olduğu saptanmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre hata payı $\pm 1,70$, akış üs değeri (n) $0,499 (\pm 0,021)$ ve korelasyon katsayısı (r^2), $0,99764$ olarak saptanmıştır (Çizelge 4.5; Çizelge 4.6; Şekil 4.45). 102P kodlu ölçümün sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarına ($n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$) göre geçerlidir. Akış üs değeri kısmen sınır altında kalmış olsa da hata payı ile birlikte rahatlıkla $n < 0,5$ ya da $n > 1,00$ koşulunu sağlayabilmektedir [$(n) 0,499 (\pm 0,021)$].



Şekil 4.45. 102P kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

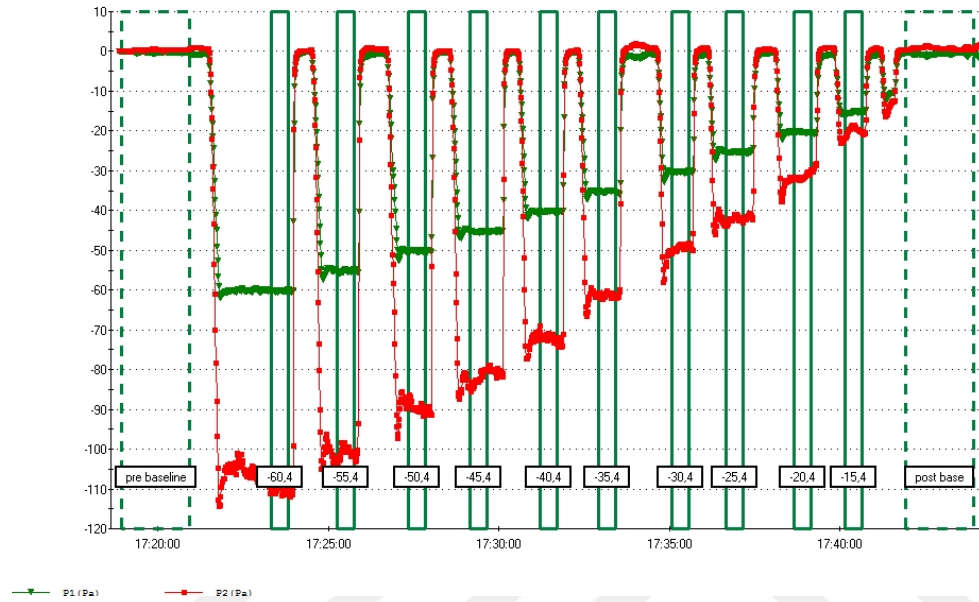
102D kodlu basınçsızlaştırma testi 22.04.2021 tarihinde 17:19-17:44 saatleri arasında dış sıcaklık ortalaması $18,56^\circ\text{C}$, dış basınç ortalaması $1014,50 \text{ Pa}$, rüzgâr yönü GB, rüzgâr hızı $0,56 \text{ m/s}$ iken basınçsızlaştırma testleri yapılmıştır. Ölçüm yapılan hacmin belirtilen saatlerde sıcaklık ortalaması $26,08^\circ\text{C}$ 'dir (Çizelge 4.4). Ölçüm şeması Şekil 4.46'te sunulmaktadır.



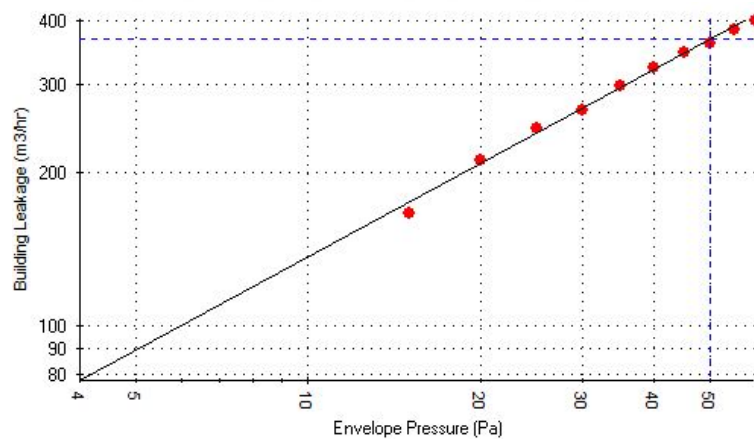
Şekil 4.46. 102D ölçüm şeması

Ön referans değeri (*pre-baseline*) $-0,4 \text{ Pa}$ olarak ölçülmüştür (Şekil 4.47). Ölçüm C halkası ile yapılmıştır. Düzeltilmemiş hava akış oranı @ 50 Pa $370 \text{ m}^3/\text{h}$, düzeltilmiş oran

ise 369 m³/h olarak tespit edilmiştir. 101D kodlu ölçüm sonuçlarına göre hata payı %±2,30, akış üs değeri (n) 0,617 (±0,040) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0, 99386 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.5; Çizelge 4.6; Şekil 4.48). 102D kodlu ölçümün sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarından $n<0,5$ ya da $n>1,00$ ve $r^2<0,99$ şartlarını sağlamaktadır.



Şekil 4.47. 102D ölçüm grafiği

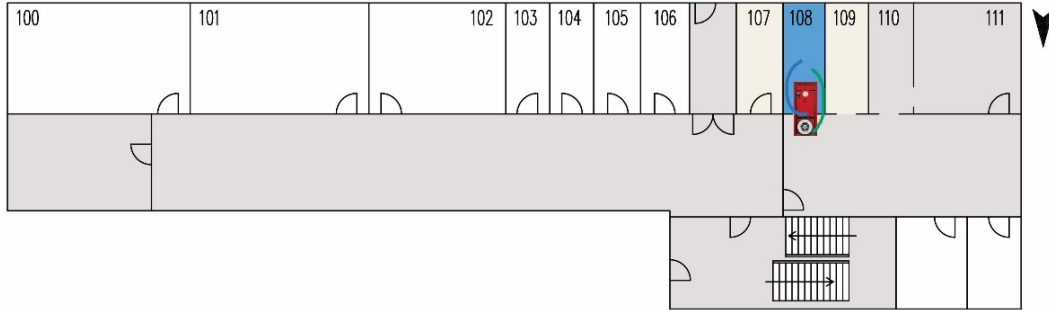


Şekil 4.48. 102D kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

4.2.1.3. 108P ve 108D Kodlu Ölçümler

108 no'lu mekanın net taban alanı $9,8 \text{ m}^2$, kat yüksekliği $3,1 \text{ m}$, etkin cephe alanı $6,2 \text{ m}^2$, hacmi $30,38 \text{ m}^3$ 'tür. Toplam pencere alanı $2,97 \text{ m}^2$, pencere çevresi $6,9 \text{ m}$, açılan kanat

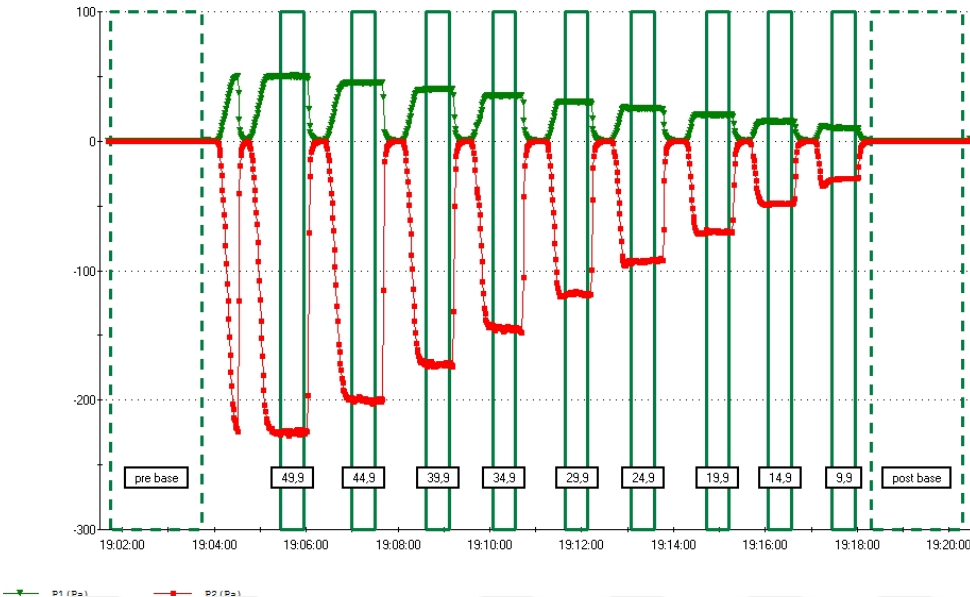
pencere çevresi 3,5 m'dir. Diğer hacimlerden farklı olarak ortak koridor alanına kapısı bulunmayan bu mekânda aradaki kapı açılarak ölçüm yapılmıştır (Şekil 4.49).



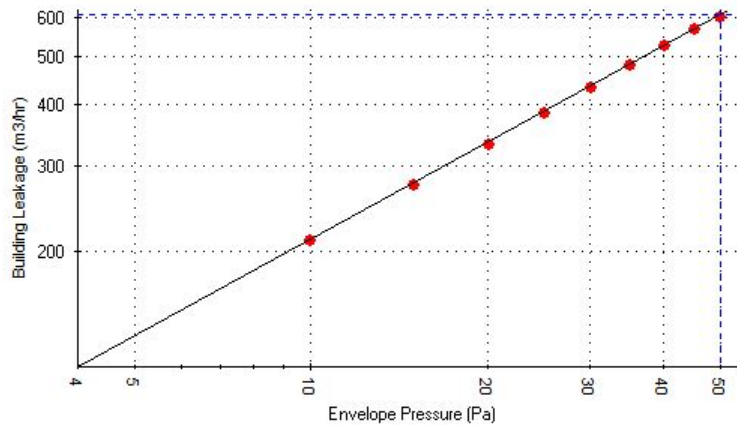
Şekil 4.49. 108P ölçüm şeması

108P kodlu basınçlandırma testi 27.04.2021 tarihinde 19:01-19:20 saatleri arasında dış sıcaklık ortalaması 17,56°C, dış basınç ortalaması 1005,80 Pa, rüzgâr yönü KD, rüzgâr hızı 0,73 m/s iken yapılmıştır. Ölçüm yapılan hacmin belirtilen saatlerde sıcaklık ortalaması 26,07°C'dir (Çizelge 4.4).

Sıfır basınç farkında ön referans değer (*pre-baseline*) -0,1Pa olarak ölçülmüştür (Şekil 4.50). Ölçüm C halkası ile yapılmıştır. Düzeltilmemiş hava akış oranının @50Pa 588 m³/h, düzeltilmiş oranın ise 611 m³/h olduğu saptanmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre hata payı %±0,60, akış üs değeri (*n*) 0,656 (±0,008) ve korelasyon katsayısı (*r*²), 0,99983 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.5; Çizelge 4.6; Şekil 4.51). 108P kodlu ölçümden elde edilen sonuçlar ASTM E779 (2003) sınır koşullarına (*n*<0,5 ya da *n*>1,00, ve *r*²<0,99) göre geçerlidir.

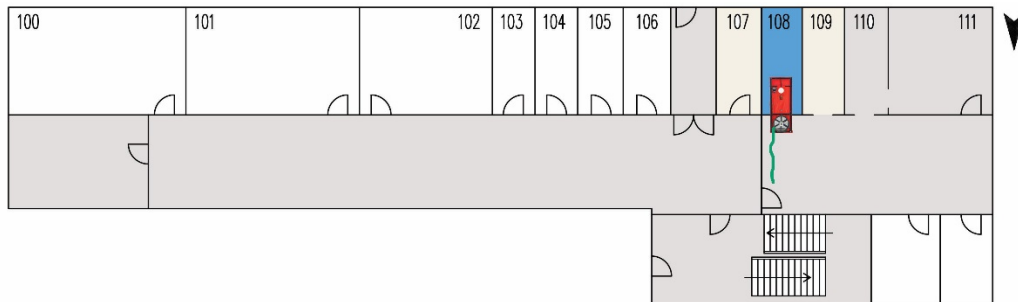


Şekil 4.50. 108P ölçüm grafiği



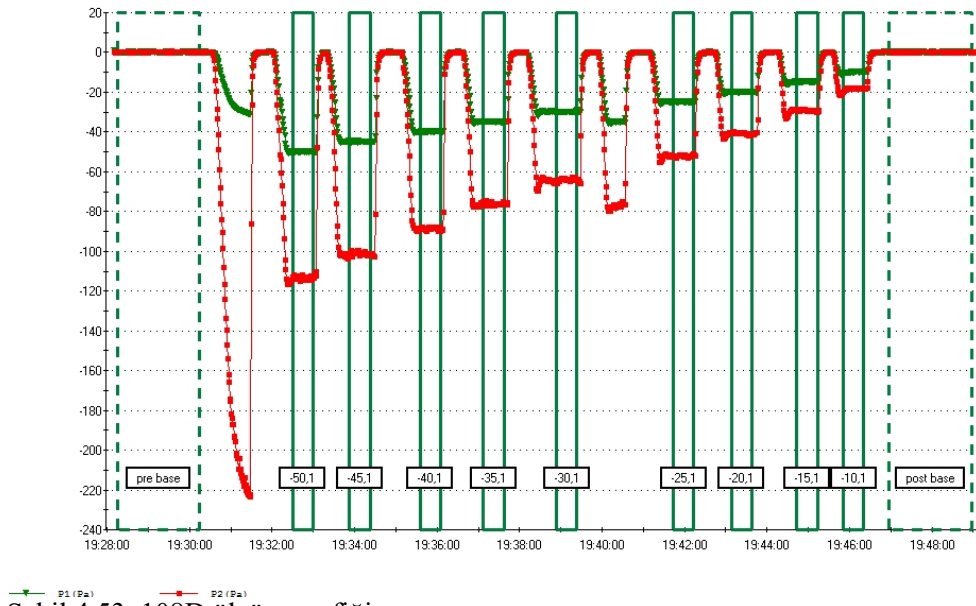
Şekil 4.51. 108P kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

108D kodlu basınçsızlaştırma testi 27.04.2021 tarihinde 19:28-19:49 saatleri arasında dış sıcaklık ortalaması 16,93°C, dış basınç ortalaması 1005,90 Pa, rüzgâr yönü KD, rüzgâr hızı 1,03 m/s, iç sıcaklık ortalaması 26,34°C iken yapılmıştır (Çizelge 4.4). 108D kodlu ölçüme ait grafik Şekil 4.52’de sunulmaktadır.

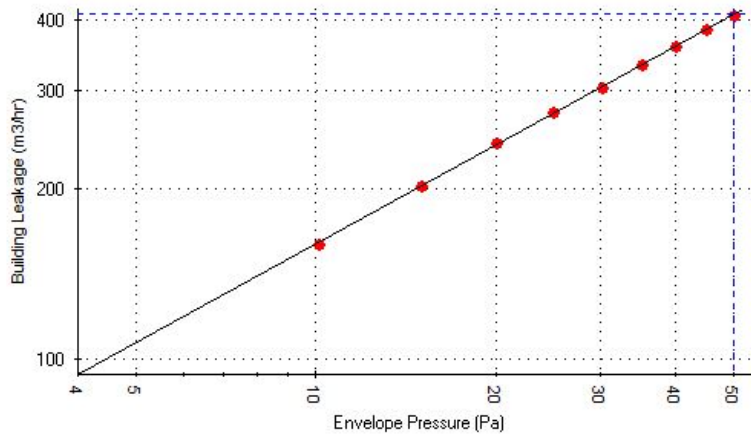


Şekil 4.52. 108D ölçüm şeması

Ön referans değer (*pre-baseline*) -0,1Pa olarak ölçülmüştür (Şekil 4.53). Ölçüm C halkası ile yapılmıştır. Düzeltilmemiş hava akış oranı @50Pa 413 m³/h, düzeltilmiş oran ise 409 m³/h olarak tespit edilmiştir. 108D kodlu ölçüm sonuçlarına göre hata payı %±0,50, akış üs değeri (n) 0,583 ($\pm 0,006$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,99985 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.5; Çizelge 4.6; Şekil 4.54). Ölçüm sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarından $n < 0,5$ ya da $n > 1,00$ ve $r^2 < 0,99$ şartlarını sağlamaktadır.



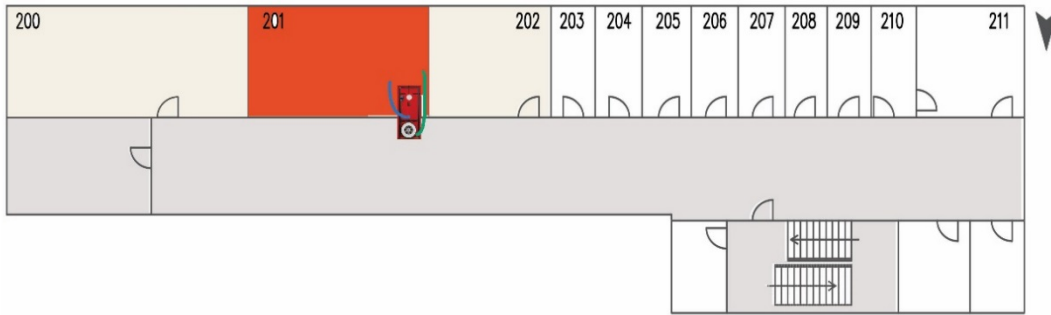
Şekil 4.53. 108D ölçüm grafiği



Şekil 4.54. 108D kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

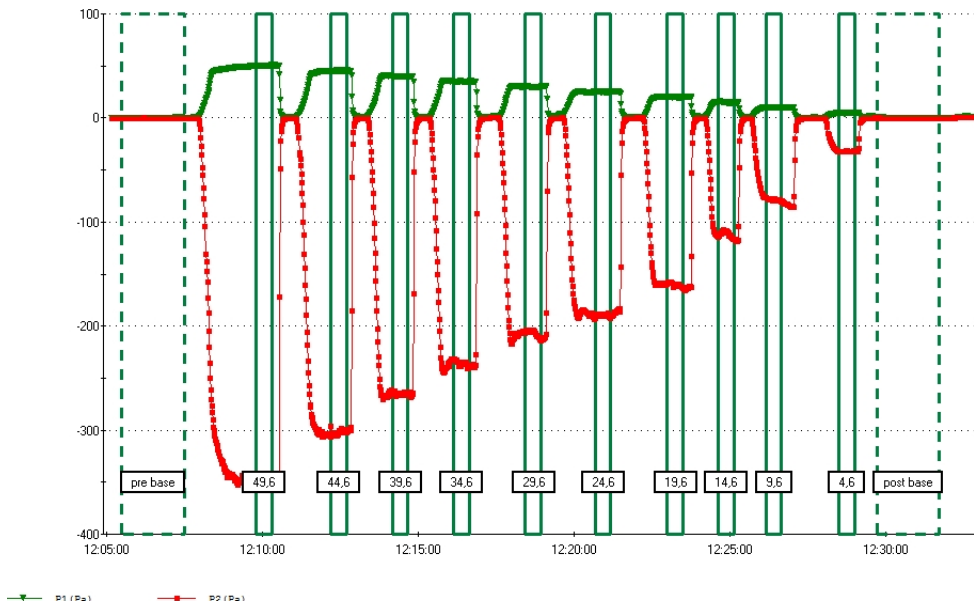
4.2.1.4. 201P ve 201D Kodlu Ölçümler

201 no'lu mekanın net taban alanı 41,6 m², kat yüksekliği 3,1 m, etkin cephe alanı 26,35 m², hacmi 128,96 m³'tür. Toplam pencere alanı 11,88 m², pencere çevresi 27,6 m, açılan kanat pencere çevresi 14,00 m dir. 201P kodlu ölçüme ait şematik anlatım Şekil 4.55'te sunulmaktadır.

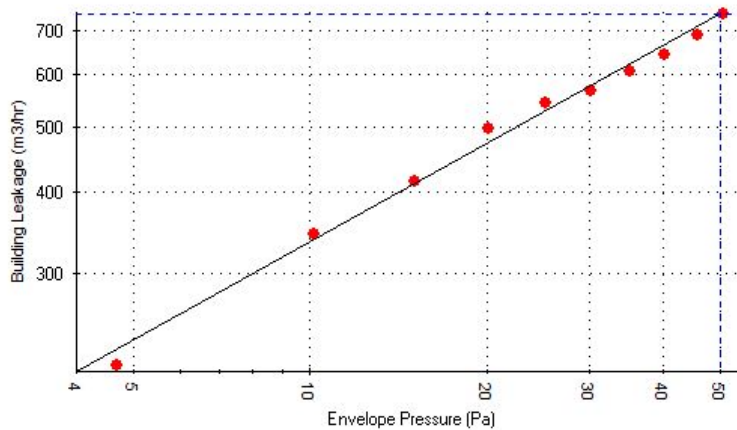


Şekil 4.55. 201P ölçüm şeması

201P kodlu basınçlandırma testi 21.04.2021 tarihinde 12:05-12:31 saatleri arasında dış sıcaklık ortalaması 14,13°C, dış basınç ortalaması 1011,60 Pa, rüzgâr yönü BGB-KKD-D-DGD, rüzgâr hızı 0,65 m/s iken yapılmıştır. Ölçüm yapılan hacmin belirtilen saatlerde sıcaklık ortalaması 25,62°C'dir (Çizelge 4.4)



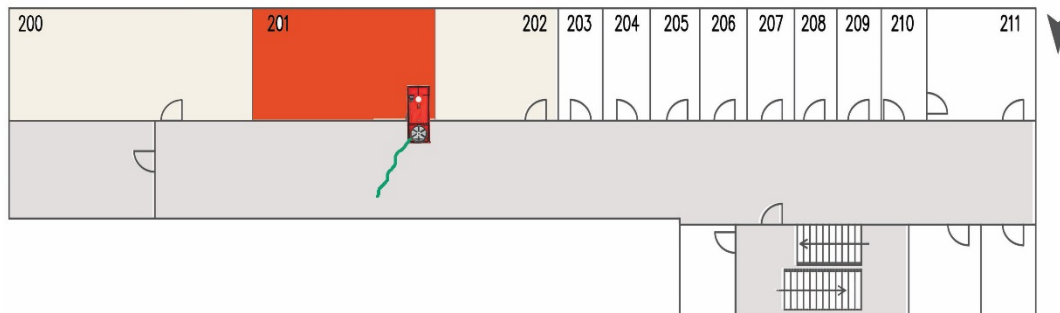
Şekil 4.56. 201P ölçüm grafiği



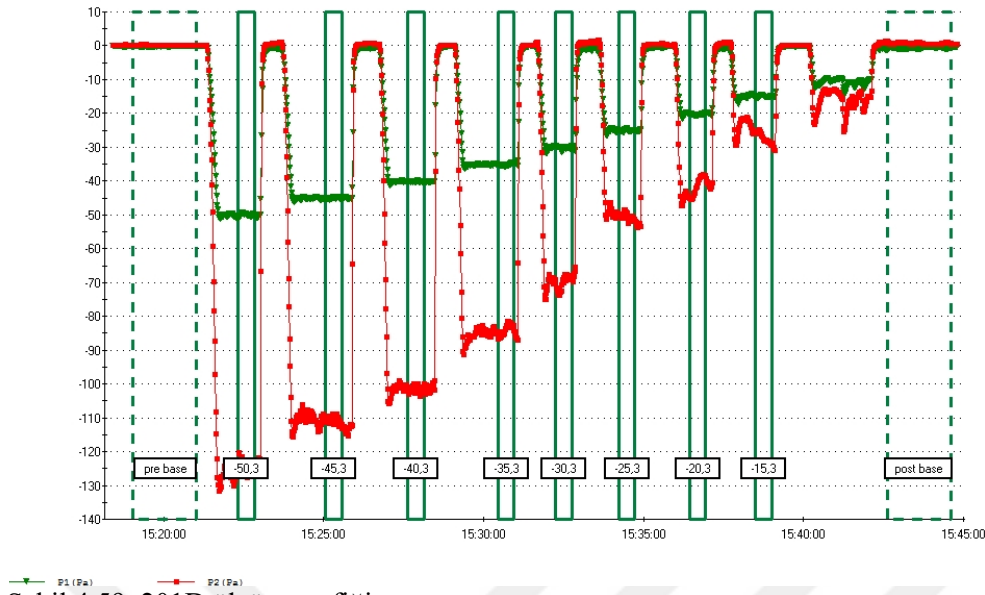
Şekil 4.57. 201P kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

Sıfır basınç farkında ön referans değeri (*pre-baseline*) -0,4Pa olarak ölçülmüştür (Şekil 4.54). Ölçüm C halkası ile yapılmıştır. Düzeltilmemiş hava akış oranının @50Pa 730 m³/h, düzeltilmiş oranın ise 744 m³/h olduğu saptanmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre hata payı %±3,70, akış üs değeri (*n*) 0,494 (±0,008) ve korelasyon katsayısı (*r*²), 0, 99270 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.5; Çizelge 4.6; Şekil 4.57). 201P kodlu ölçümün sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarına (*n*<0,5 ya da *n*>1,00, ve *r*²<0,99) göre geçerlidir. Akış üs değeri kısmen sınır altında kalmış olsa da hata payı ile birlikte *n*<0,5 ya da *n*>1,00 koşulunu sağlayabilmektedir [(*n*) 0,494 (±0,008)].

Aynı hacimde gerçekleştirilen 201D kodlu basınçsızlaştırma testi 21.04.2021 tarihinde 15:20-15:40 saatleri arasında dış sıcaklık ortalaması 16,93°C, dış basınç ortalaması 1010,60 Pa, rüzgâr yönü GGD-GB, rüzgâr hızı 0,73 m/s ve iç sıcaklık ortalaması 25,80°C koşullarında tamamlanmıştır (Çizelge 4.4). Şematik sunum Şekil 4.58’de görülmektedir.

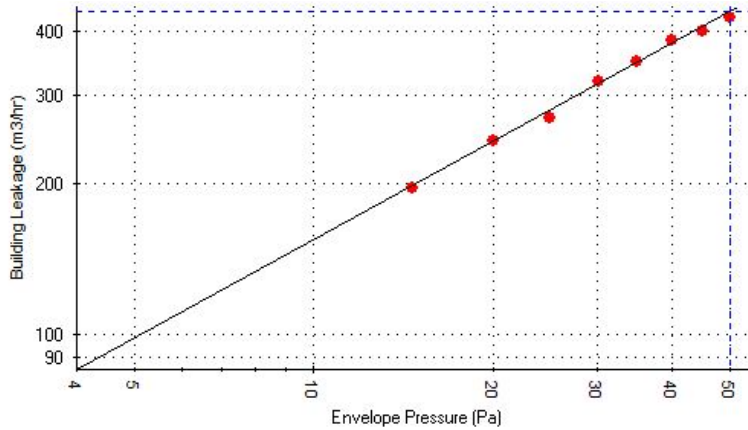


Şekil 4.58. 201D ölçüm şeması



Şekil 4.59. 201D ölçüm grafiği

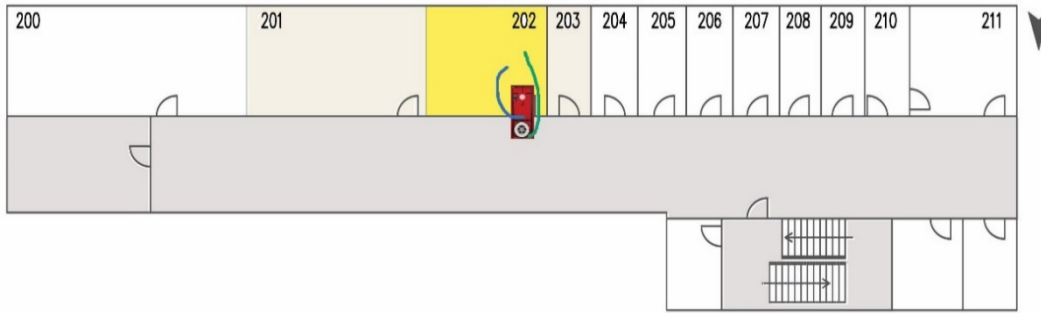
Ön referans değeri (*pre-baseline*) -0,3Pa olarak ölçülmüştür (Şekil 4.57). Ölçüm C halkası ile yapılmıştır. Düzeltilmemiş hava akış oranı @50Pa 442 m³/h, düzeltilmiş oran ise 440 m³/h olarak tespit edilmiştir. 201D kodlu ölçüm sonuçlarına göre hata payı %±2,60, akış üs değeri (n) 0,651 ($\pm 0,040$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,99620'dir (Çizelge 4.5; Çizelge 4.6; Şekil 4.58). Ölçüm sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarından $n < 0,5$ ya da $n > 1,00$ ve $r^2 < 0,99$ şartlarını sağlamaktadır.



Şekil 4.60. 201D kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

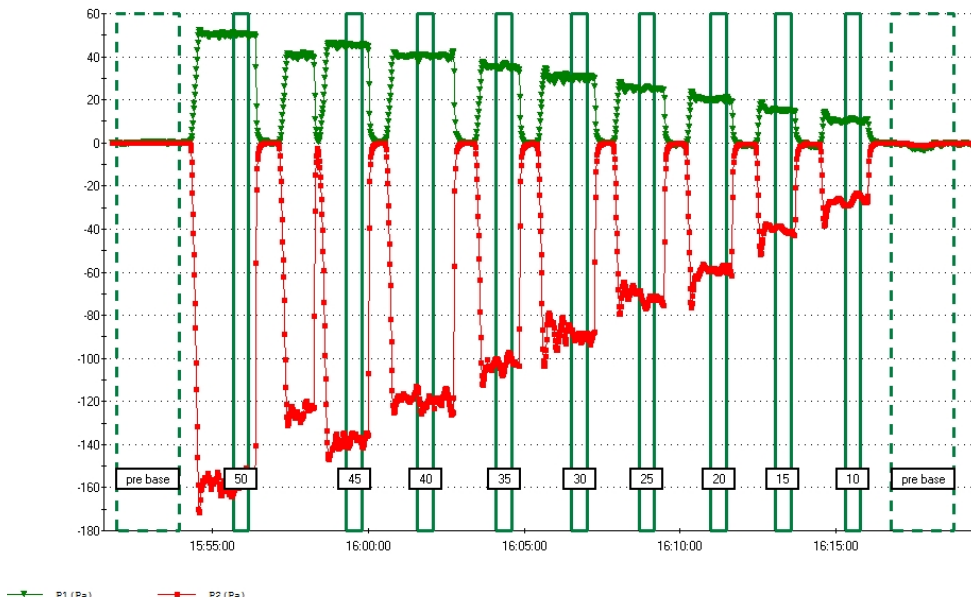
4.2.1.5. 202P ve 202D Kodlu Ölçümler

Kesinleşmiş protokol kapsamında seçilmiş olan 202 no'lu mekanın net taban alanı 42,10 m², kat yüksekliği 3,10 m, etkin cephe alanı 26,66 m² ve hacmi 130,51 m³'tür. Bu mekandaki toplam pencere alanı 11,88 m² olup pencere çevresi 27,60 m uzunluğunda, açılan kanat pencere çevresi 14,00 m uzunluğundadır.

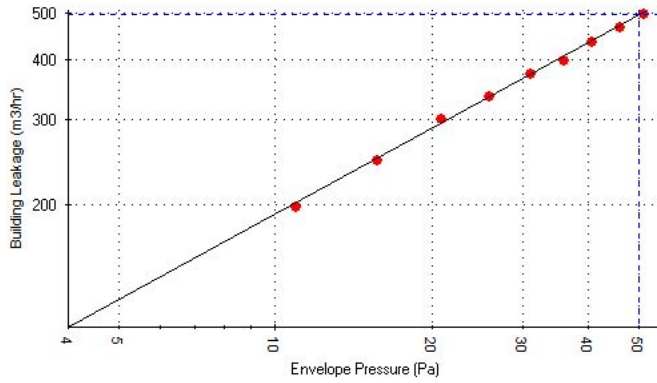


Şekil 4.61. 202P ölçüm şeması

Şekil 4.59'da 202P kodlu ölçüm şeması görülmektedir. 202P no'lu basınçlandırma testi 20.04.2021 tarihinde 15:52-16:18 saatleri arasında, 14,83°C dış sıcaklık ortalaması, 1004.83Pa dış basınç ortalaması, GGB-GGD-GB rüzgâr yönü, 1,68 m/s rüzgâr hızı koşullarında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sırasında 202 no'lu mekanda iç sıcaklık ortalaması 23,56°C'dir (Çizelge 4.4).

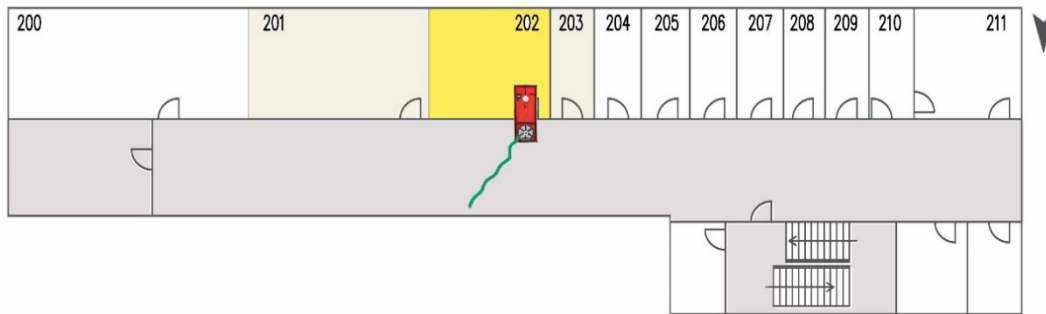


Şekil 4.62. 202P ölçüm grafiği



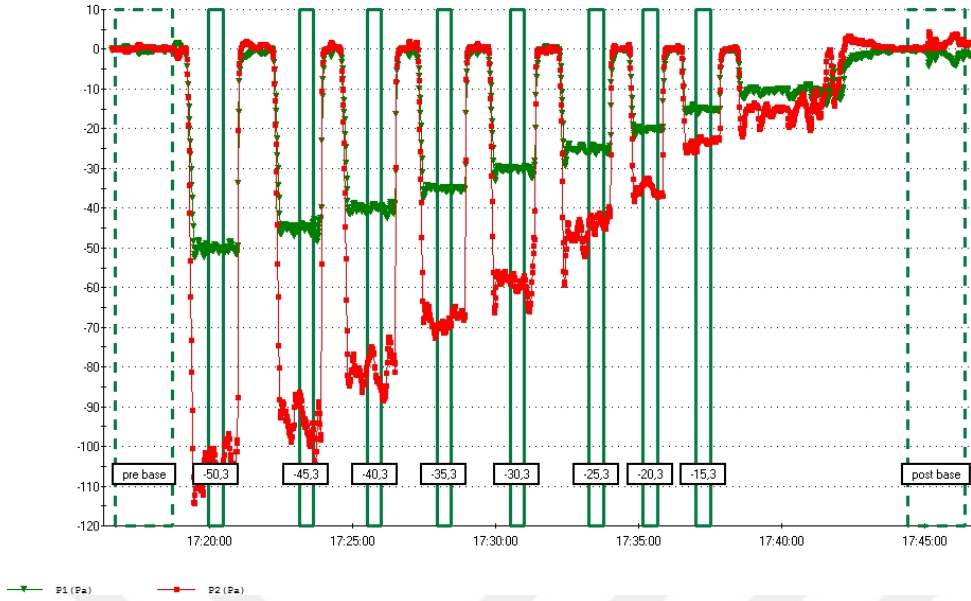
Şekil 4.63. 202P kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

Sıfır basınç farkında ön referans değeri (*pre-baseline*) 0,0Pa olarak ölçülmüş dolayısıyla bu baz değeri indüklenen basınç farklarına yansımamıştır (Şekil 4.63). Ölçüm C halkası ile yapılmıştır. Düzeltilmemiş hava akış oranının @50Pa 482 m³/h, düzeltilmiş oran ise 496 m³/h olduğu saptanmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre hata payı %±1,70, akış üs değeri (n) 0,590 ($\pm 0,022$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,99829 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.5; Çizelge 4.6; Şekil 4.63). 202P kodlu ölçümün sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarına ($n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$) göre geçerlidir.



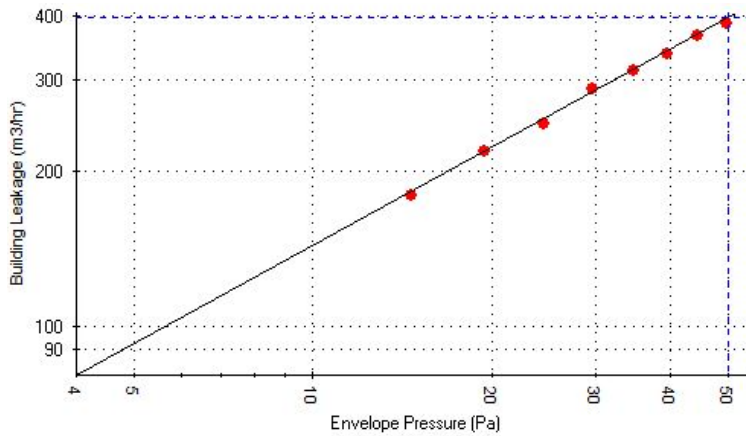
Şekil 4.64. 202D ölçüm şeması

202D kodlu basınçsızlaştırma testine ait ölçüm şeması Şekil 4.62’de görülmektedir. Bu test 20.04.2021 tarihinde 17:17-17:45 saatleri arasında dış sıcaklık ortalaması 13,48°C, dış basınç ortalaması 1005.33 Pa, rüzgâr yönü GB-GGB, rüzgâr hızı 1.45 iken basınçsızlaştırma testleri yapılmıştır. Ölçüm yapılan hacmin belirtilen saatlerde sıcaklık ortalaması 23,50°C’dir (Çizelge 4.4).



Şekil 4.65. 202D ölçüm grafiği

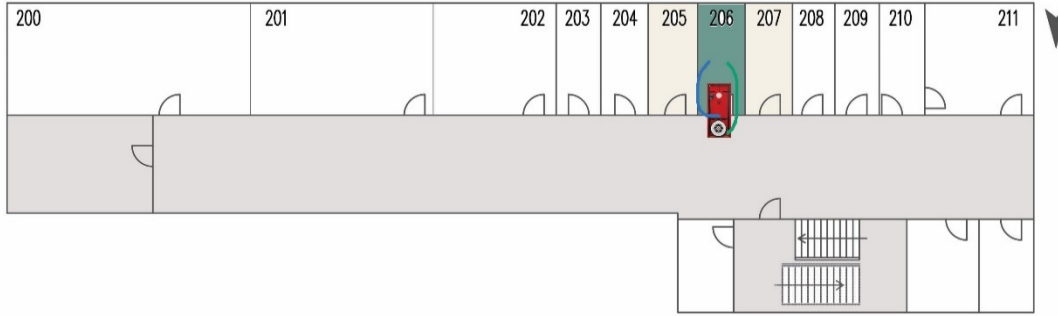
Ön referans değeri (*pre-baseline*) -0,3Pa olarak ölçülmüş (Şekil 4.65) ve ölçümde C halkası kullanılmıştır. Düzeltilmemiş hava akış oranı @50Pa 403 m³/h, düzeltilmiş oran ise 398 m³/h olarak tespit edilmiştir. 201D kodlu ölçüm sonuçlarına göre hata payı $\pm 2,00$, akış üs değeri (n) 0,643 ($\pm 0,030$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,99775'tir (Çizelge 4.5; Çizelge 4.6; Şekil 4.66). Ölçüm sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarından $n < 0,5$ ya da $n > 1,00$ ve $r^2 < 0,99$ şartlarını sağlamaktadır.



Şekil 4.66. 202D kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

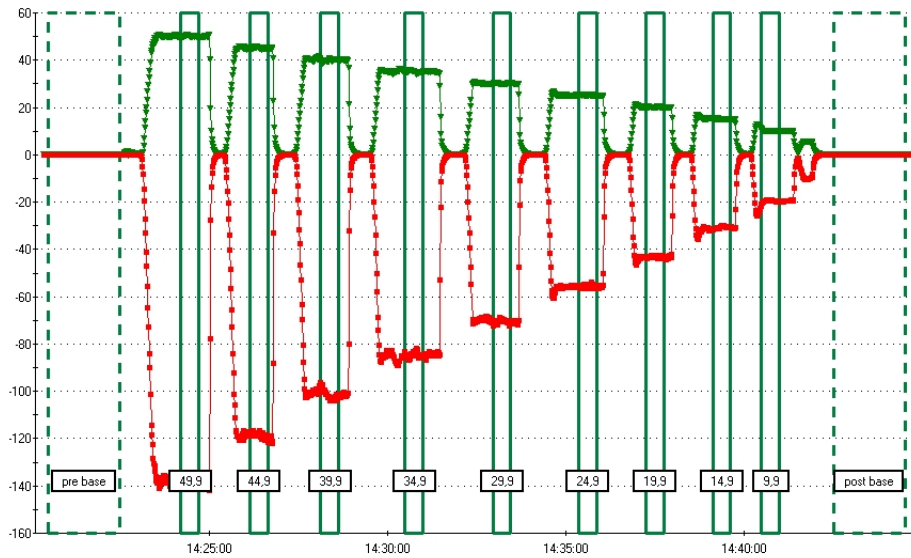
4.2.1.6. 206P ve 206D Kodlu Ölçümler

206 no'lu mekan 9,90m² net taban alanı, 3,10 m kat yüksekliği, 6,30 m² etkin cephe alanı ve 30,69 m³ hacme sahiptir. Toplam pencere alanı 2,97 m², pencere çevresi 6,9 m, açılan kanat pencere çevresi 3,5 m dir (Şekil 4.67).

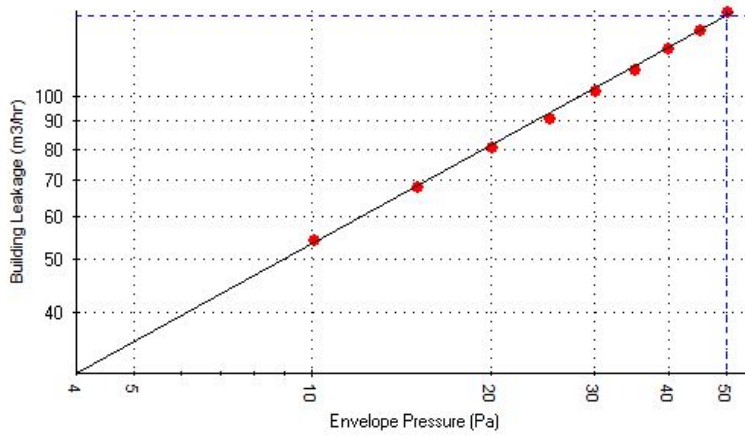


Şekil 4.67. 206P ölçüm şeması

206P kodlu basınçlandırma testi 22.04.2021 tarihinde 14:20-14:42 saatleri arasında dış sıcaklık ortalaması 17,46°C, dış basınç ortalaması 1015,13 Pa, rüzgâr yönü G-GB-GGB, rüzgâr hızı 0.9 ve iç sıcaklık ortalaması 23,01°C koşullarında yapılmıştır (Çizelge 4.4).



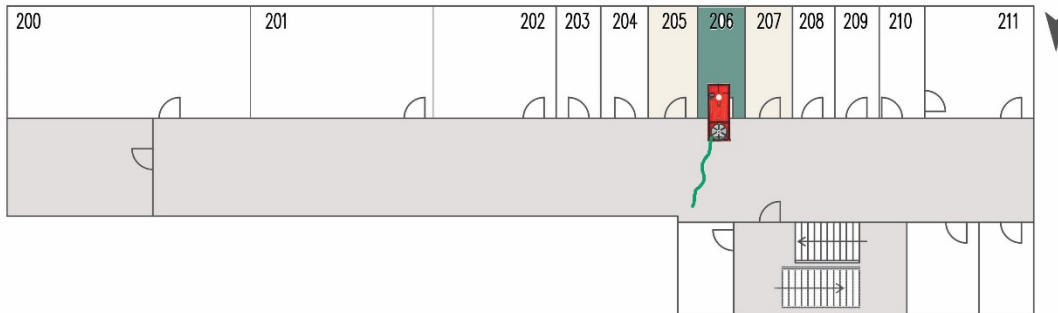
Şekil 4.68. 206P ölçüm grafiği



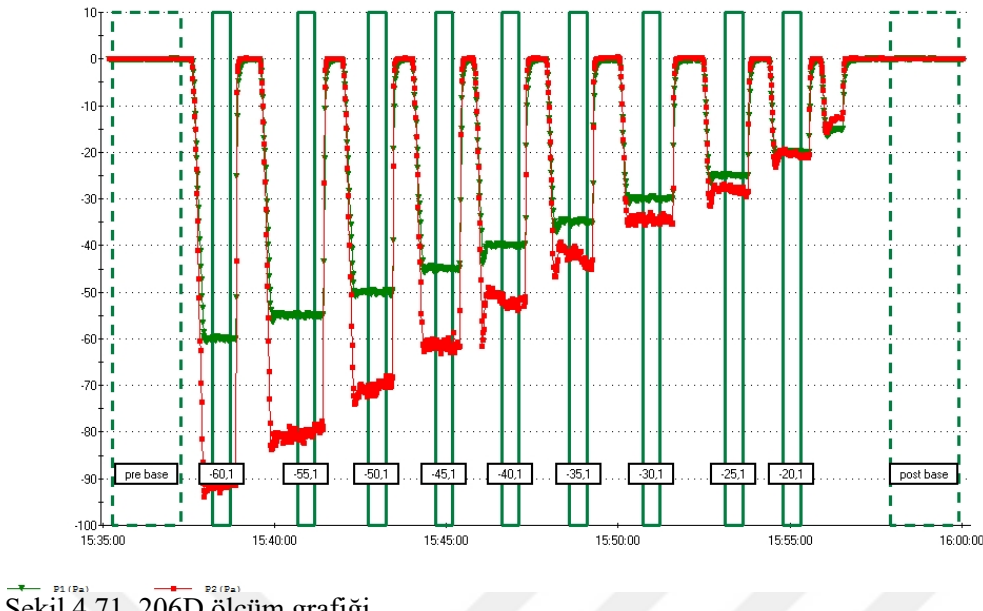
Şekil 4.69. 206P kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

Sıfır basınç farkında ön referans değer (*pre-baseline*) -0,1Pa olarak ölçülmüş ve bu değer indüklenen basınç farklarına yansıtılmıştır (Şekil 4.68). Ölçüm D halkası ile yapılmıştır. Düzeltilmemiş hava akış oranı @50Pa 138 m³/h, düzeltilmiş oranı ise 141 m³/h olarak ölçülmüştür. Sonuçlara göre hata payı $\pm 1,60$, akış üs değeri (n) 0,601 ($\pm 0,020$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,99865 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.5; Çizelge 4.6; Şekil 4.69). 206P kodlu ölçümün sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarına ($n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$) göre geçerlidir.

206D kodlu (Şekil 4.70) basınçsızlaştırma testi 22.04.2021 tarihinde 15:35-15:59 saatleri arasında dış sıcaklık ortalaması 19,03°C, dış basınç ortalaması 1014,78 Pa, rüzgâr yönü GB, rüzgâr hızı 1,0 m/s iken yapılmıştır. Ölçüm yapılan hacmin belirtilen saatlerde sıcaklık ortalaması 23,21°C'dir (Çizelge 4.4).

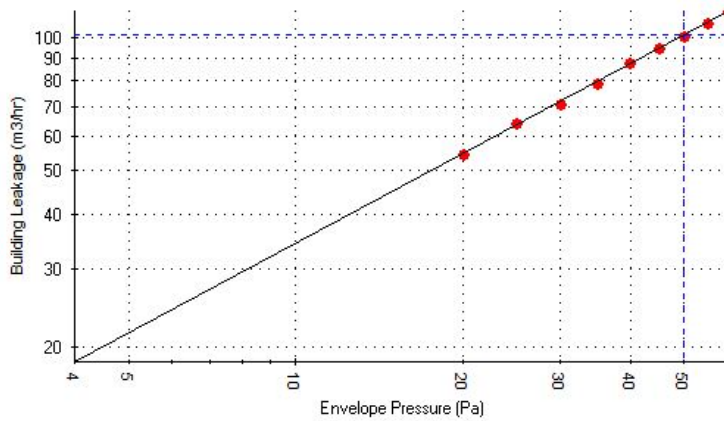


Şekil 4.70. 206D ölçüm şeması



Şekil 4.71. 206D ölçüm grafiği

Sıfır basınç farkında ön referans değeri (*pre-baseline*) -0,1Pa olarak ölçülmüş ve indüklenen basınç farklarına yansıtılmıştır (Şekil 4.71). Ölçüm D halkası ile yapılmıştır. Düzeltilmemiş hava akış oranının @50Pa 100 m³/h, düzeltilmiş oran ise 101 m³/h olduğu saptanmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre hata payı $\pm 0,80$, akış üs değeri (n) 0,673 ($\pm 0,017$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,99920 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.5; Çizelge 4.6; Şekil 4.72). 206D kodlu ölçümün sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarına ($n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$) göre geçerlidir.



Şekil 4.72. 206D kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

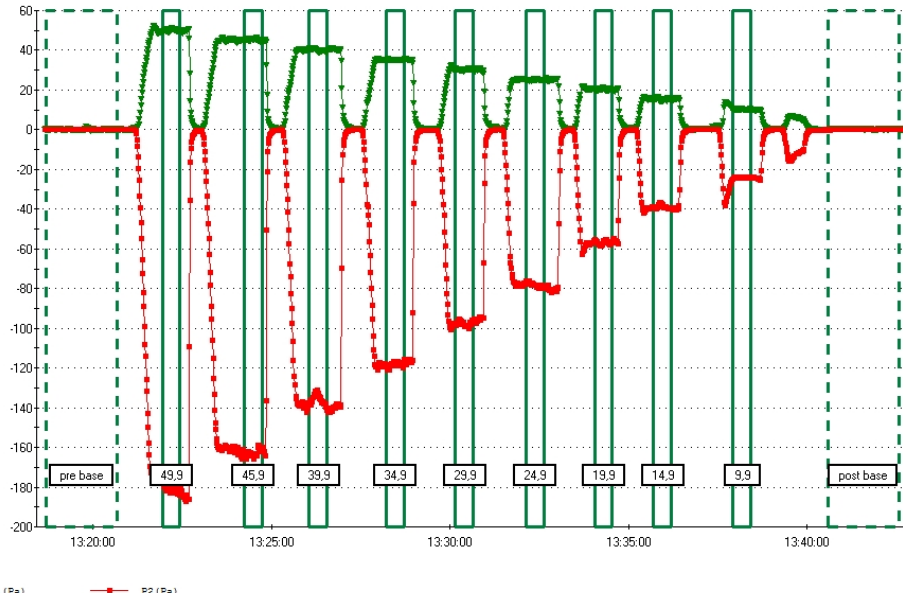
4.2.1.7. 208P ve 208D Kodlu Ölçümler

208 no'lu mekanın net taban alanı 9,00 m², kat yüksekliği 3,10 m, etkin cephe alanı 5,73 m², hacmi 27,9 m³'tür. Bu mekandaki toplam pencere alanı 2,97 m², pencere çevresi 6,90 m, açılan kanat pencere çevresi 3,50 m dir (Şekil 4.73).



Şekil 4.73. 208P ölçüm şeması

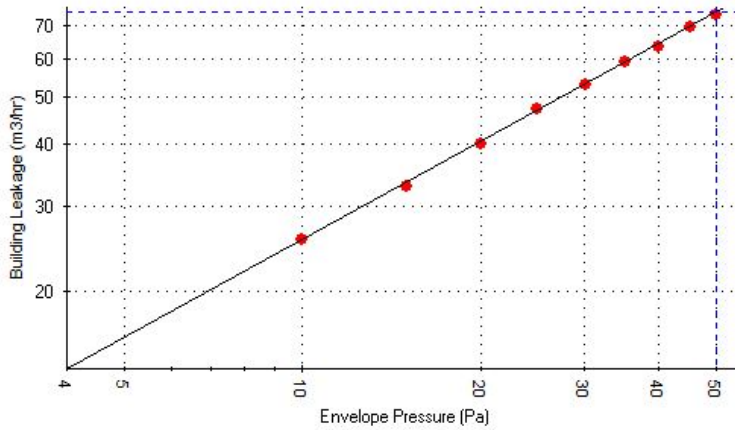
208P kodlu basınçlandırma testi 22.04.2021 tarihinde 13:19-13:43 saatleri arasında dış sıcaklık ortalaması 15,525 °C, dış basınç ortalaması 1015,375 Pa, rüzgâr yönü GGD-GGB, rüzgâr hızı 1,10 m/s ve iç sıcaklık ortalaması 23,59°C koşullarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.74. 208P ölçüm grafiği

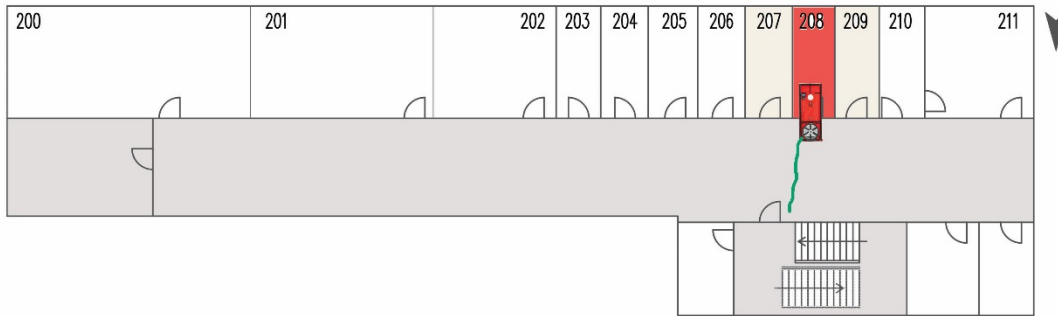
Ön referans değeri (*pre-baseline*) -0,1Pa olarak ölçülmüştür (Şekil 4.74). Ölçüm E halkası ile yapılmıştır. Düzeltilmemiş hava akış oranı @50Pa 72,37 m³/h, düzeltilmiş oran ise 74,81 m³/h olarak tespit edilmiştir. 208P kodlu ölçüm sonuçlarına göre hata payı %±1,20,

akış üs değeri (n) 0,668 ($\pm 0,015$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,99937 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.5; Çizelge 4.6; Şekil 4.75). Ölçüm sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarından $n < 0,5$ ya da $n > 1,00$ ve $r^2 < 0,99$ şartlarını sağlamaktadır.



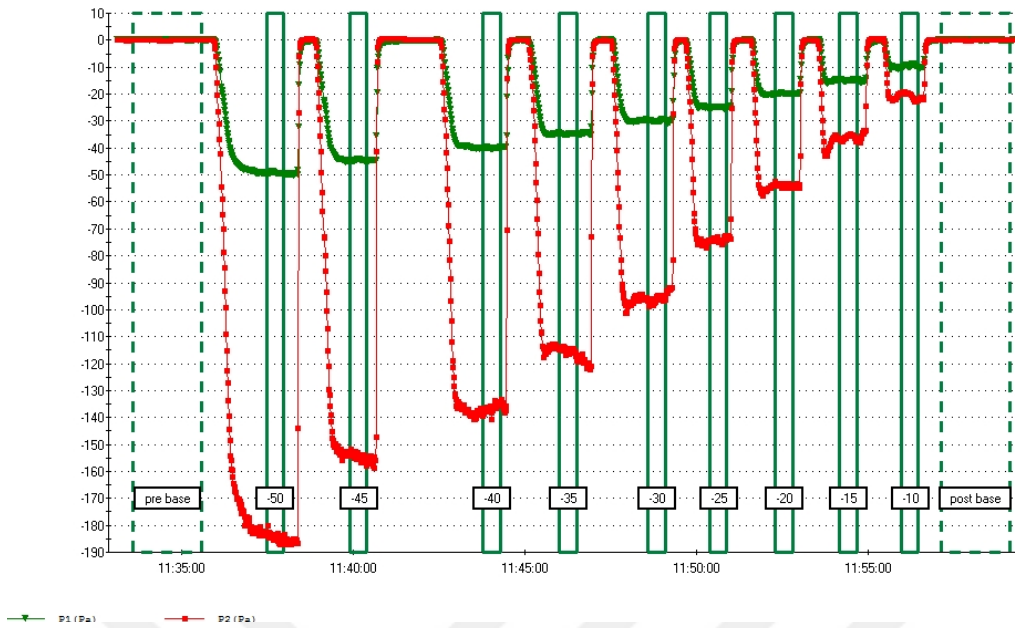
Şekil 4.75. 208P kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

Aynı hacimde yürütülen basınçsızlaştırma testi ise 22.04.2021 tarihinde 11:33-11:58 saatleri arasında dış sıcaklık ortalaması 13,76 °C, dış basınç ortalaması 1015,90 Pa, rüzgâr yönü GGD-GB, rüzgâr hızı 0,73 iken basınçsızlaştırma testleri yapılmıştır. Ölçüm yapılan hacmin belirtilen saatlerde sıcaklık ortalaması 23.32°C'dir (Şekil 4.76).

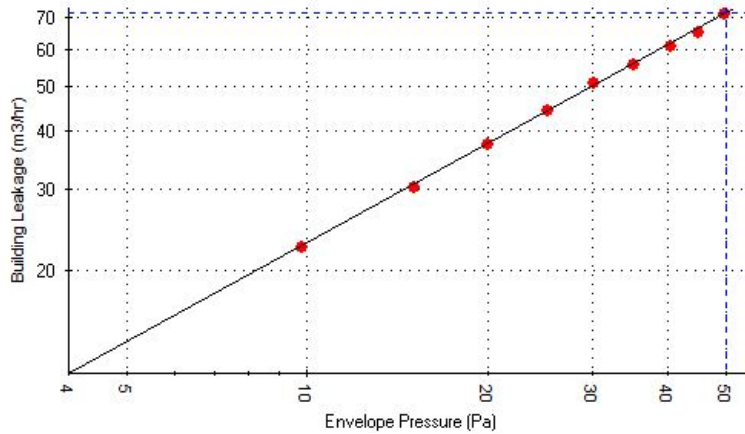


Şekil 4.76. 208D ölçüm şeması

Sıfır basınç farkında ön referans değeri (*pre-baseline*) 0,0Pa olarak ölçülmüş, dolayısıyla indüklenen basınç farklarına yansıtılmamıştır (Şekil 4.77). Ölçüm E halkası ile yapılmıştır. Düzeltilmemiş hava akış oranının @50Pa 72,54 m³/h, düzeltilmiş oranın ise 72,13 m³/h olduğu saptanmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre hata payı $\pm 1,20$, akış üs değeri (n) 0,708 ($\pm 0,015$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,99941 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.5; Çizelge 4.6; Şekil 4.78). 208D kodlu ölçümün sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarına ($n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$) göre geçerlidir.



Şekil 4.77. 208D ölçüm grafiği

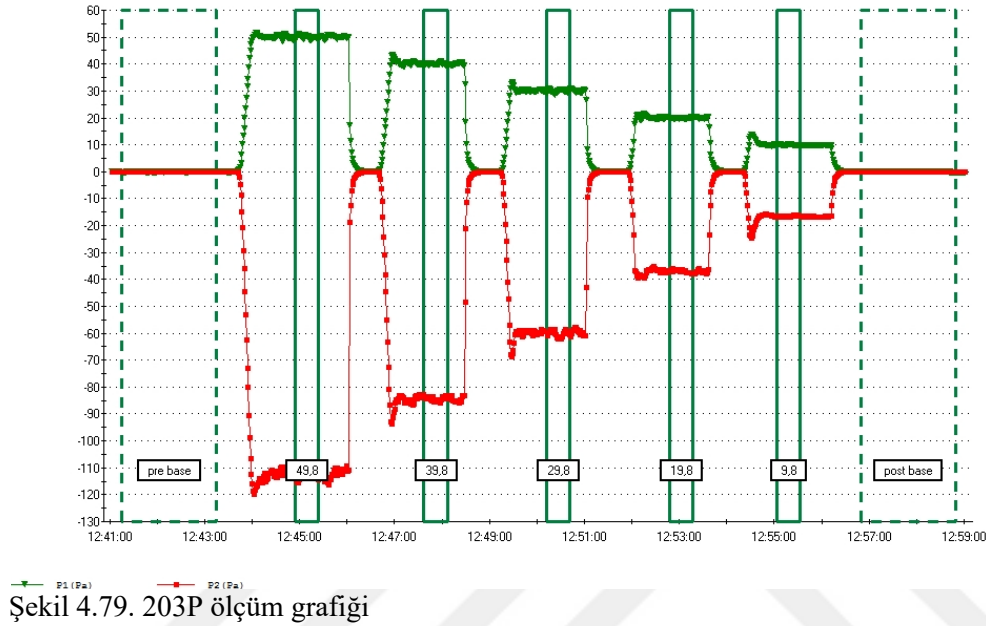


Şekil 4.78. 208D kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

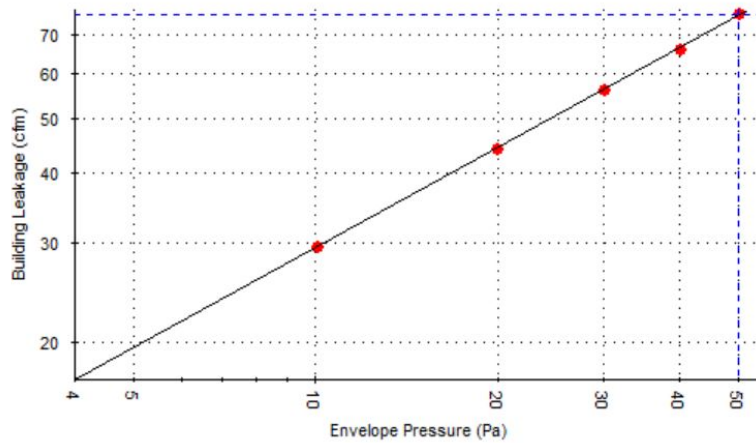
4.2.1.8. 203P ve 203D Kodlu Ölçümler

203 no'lu mekana ait fiziksel veriler Bölüm 4.1'de (Şekil 4.1 ve 4.2, s.93-94) aktarılmıştır. Kesinleşmiş ölçüm protokolünün sekizinci ve son veri seti bu mekandan toplanan ön ölçüm verilerinin düzeltilmesi sonucu elde edilmiştir. 203'e ait ön ölçümlerden M07Y 203D olarak, M04G'de 203P olarak yeniden düzenlenmiştir. Bu düzenleme yapılırken, M07G ölçümünde halka değişikliğine bağlı olan 10 Pa ölçümü devre dışı bırakılmıştır.

203 no'lu hacimde 20.04.2021 tarihinde ve 12:40-12:59 saatleri arasında, 13,0°C dış sıcaklık ortalaması, 28,87°C iç sıcaklık ortalaması 1005,76 Pa dış basınç ortalaması, GGD-GGB-G yönünde ve 2,066 m/s hızında rüzgâr koşullarında basınçlandırma testi yapılmıştır (Çizelge 4.1).



Şekil 4.79. 203P ölçüm grafiği

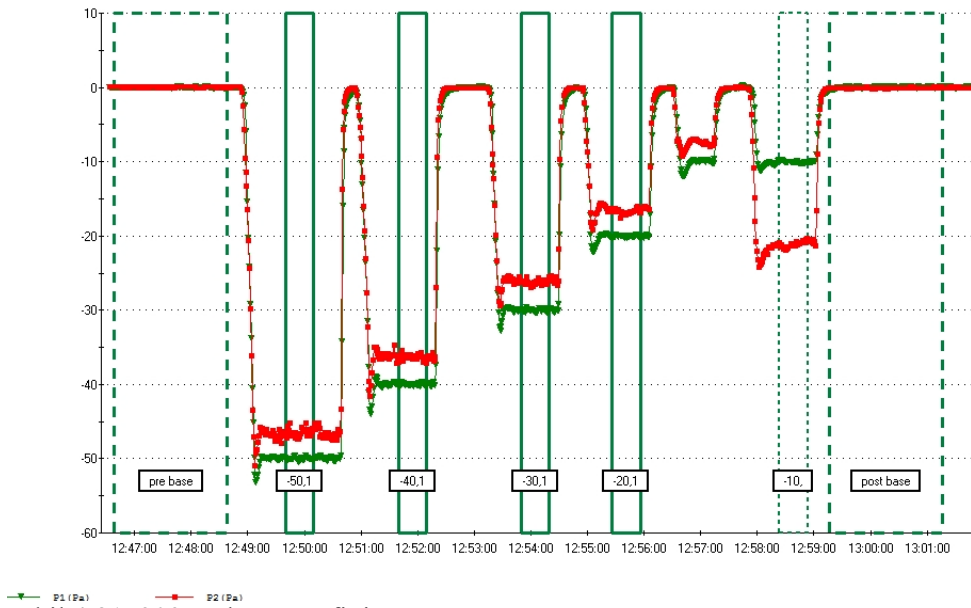


Şekil 4.80. 203P kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

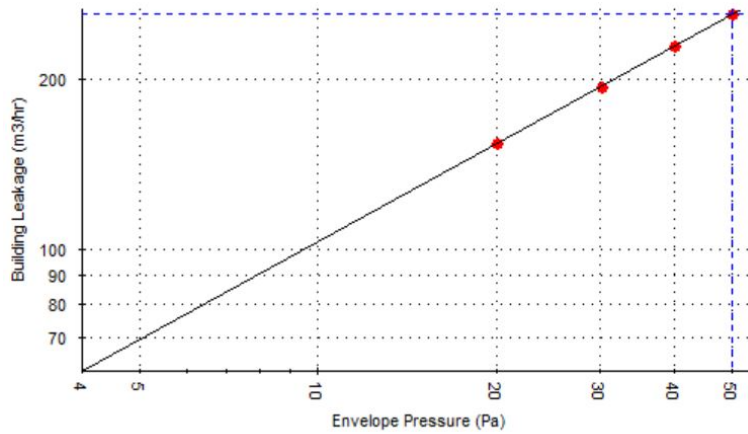
203P kodlu ölçüm için sıfır fan akışında ölçülen ön referans değeri (*pre-baseline*) - 0,2Pa'dır (Şekil 4.79). İndüklenen basınç farkları için D halkası kullanılmıştır. Sonuçlara göre düzeltilmemiş hava akışı @50Pa 126 m³/h (Çizelge 4.2), düzeltilmiş hava akışı 129 m³/h olarak tespit edilmiştir. Hata payı %±1,00, akış üs değeri (*n*) 0,588 (±0,012) ve korelasyon katsayısı (*r*²), 0,99988 olarak saptanmıştır (Çizelge 4.2; Çizelge 4.3; Şekil 4.78).

M04G kodlu basınçlandırma testinin sonuçları ASTM E779 (2003) sınır koşullarına ($n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$) göre geçerlidir.

Ön ölçüm protokolünde 203 no'lu hacimde gerçekleştirilen ve yeniden 203D olarak kodlanan basınçsızlaştırma testi, 19.04.2021 tarihinde 12:47-13:02 saatleri arasında yapılmıştır. Test esnasında dış sıcaklık ortalaması 11,1°C, dış basınç ortalaması 1007,20 Pa, rüzgâr yönü KD, rüzgâr hızı 1,8 m/s ve iç sıcaklık ortalaması 27,19°C'dir (Çizelge 4.1).



Şekil 4.81. 203D ölçüm grafiği



Şekil 4.82. 203D kodlu ölçüm için sızdırmazlık test sonuçları (%95 CI, ağırlıklandırılmamış regresyon)

Bu testte ön referans değeri (*pre-baseline*) -0,1Pa olarak ölçülmüştür (Şekil 4.81). Ölçüme C halkası ile başlanmış ancak 10 Pa basınç farkı elde edilemediği için bu aşamada D halkası takılarak ölçüm sonlandırılmıştır. D halkasına ait veri ağırlandırılmış regresyonda

ihmal edildiğinde (Şekil 4.81, indüklenmiş -10Pa basınç farkı sızdırmazlık testinden çıkarılmıştır) düzeltilmemiş hava akış oranı @50Pa 260 m³/h olarak saptanmış, düzeltilmiş oran ise 254 m³/h olarak tespit edilmiştir. Hata payı %±37,80'den %±0,30'a gerilerken, akış üs değeri (n) 0,574 ($\pm 0,006$) ve korelasyon katsayısı (r^2), 0,99999 olarak değişmiştir (Çizelge 4.2; Çizelge 4.3; Şekil 4.81) ve bu sonuçlar ASTM E779 (2003) sınır koşullarına ($n < 0,5$ ya da $n > 1,00$, ve $r^2 < 0,99$) göre geçerlidir.

4.2.2. Kesinleşmiş Ölçüm Protokolü – Karşılaştırmalı Bulgular

Bu tez çalışması kapsamında kurulan ana çerçeve, sıklıkla tekil konut yapılarında yürütülen sızdırmazlık testlerinin konut dışı yapılara kopartıman ölçümleri ile yorumlanma potansiyelini araştırmak ve çok mekandan oluşan daha büyük ölçekli yapılarda sızdırmazlık düzeyini kestirebilmeye odaklanmaktadır. Bu nedenle bir ön ölçüm protokolüne bağlı olarak geliştirilmiş olan kesinleşmiş ölçüm protokolüne ait veriler ölçüm sonuçları üzerinden sistematik olarak karşılaştırılmıştır.

Bu karşılaştırma öncesi, özellikle farklı akış halkaları kullanılarak tamamlanan ölçümlere ait verilere ait CFM50 değerlerinin eşitlenebilmesi için TEC, 2017b ve TEC, 2020a kaynaklarında belirtilen çevirme katsayı ve formülleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çevirme işleminin temel amacı tüm ölçümlerde aynı halka kullanılmışçasına CFM50 değerlerini eşitleyebilmek böylece mekan bazında ACH50 değerlerinin birbiriyle doğru bir şekilde ilişkilendirebilmesini sağlamaktır. TEC (2020a) tarafından 230V Minneapolis Blower Door için verilen akış halkaları arasındaki kalibrasyonun hesaplamasına ilişkin prosedürü Çizelge 4.7'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.7. Model 3 (230V) Minneapolis Blower Door için Kalibrasyon Parametreleri (TEC, 2020a)

Fan Konfigürasyonu	Kalibrasyon Parametresi
Açık Fan	Akış (CFM) = 498.9 x (Pa cinsinden fan basıncı) ⁴⁹¹⁸
Akış Halkası A	Akış (CFM) = 190.1 x (Pa cinsinden fan basıncı) ⁴⁸⁸⁹
Akış Halkası B	Akış (CFM) = 60.35 x (Pa cinsinden fan basıncı) ⁴⁹⁵⁸
Akış Halkası C	Akış (CFM) = 20.47 x (Pa cinsinden fan basıncı) ⁵¹⁷⁸
Akış Halkası D	Akış (CFM) = 6.870 x (Pa cinsinden fan basıncı) ⁵⁰²²
Akış Halkası E	Akış (CFM) = 2.817 x (Pa cinsinden fan basıncı) ⁵¹³⁹

Çizelge 4.7’de sunulmuş olan halkaları arasındaki kalibrasyonun hesaplaması sonucunda Çizelge 4.8’de görülen düzeltilmemiş ve düzeltilmemiş CFM değerlerinin C halkasına kalibre edilmiş olduğu veriler elde edilmiştir. Böylelikle, tüm ölçümlerin C halkasına kalibre edilmiş olarak ACH50 hesaplamalarında kullanılması olanaklı hale gelmiştir.

Çizelge 4.8. C halkasına kalibre edilen düzeltilmiş ve düzeltilmemiş CFM50 değerleri

Ölçüm	Kullanılan Akış Halkası	Dönüştürülen Akış Halkası	Ölçülen CFM @50Pa /sqft	C Halkasına Kalibre Edilen (Düzeltilmemiş) CFM @50Pa /sqft	C Halkasına Kalibre Edilen (Düzeltilmiş) CFM @50Pa /sqft
101P	B	C	567,00	211,32	217,65
101D	B	C	361,00	132,98	129,67
102P	C	C	241,00	241,00	243,00
102D	C	C	218,00	218,00	217,00
108P	C	C	346,00	346,00	359,00
108D	C	C	243,00	243,00	241,00
201P	C	C	430,00	430,00	438,00
201D	C	C	260,00	260,00	259,00
202P	C	C	284,00	284,00	292,00
202D	C	C	237,00	237,00	235,00
206P	D	C	81,04	258,36	263,91
206D	D	C	59,11	187,51	189,22
208P	E	C	42,59	315,16	325,82
208D	E	C	42,69	315,88	314,18
203P	D	C	74,00	235,31	242,08
203D	C	C	153,00	153,00	149,00

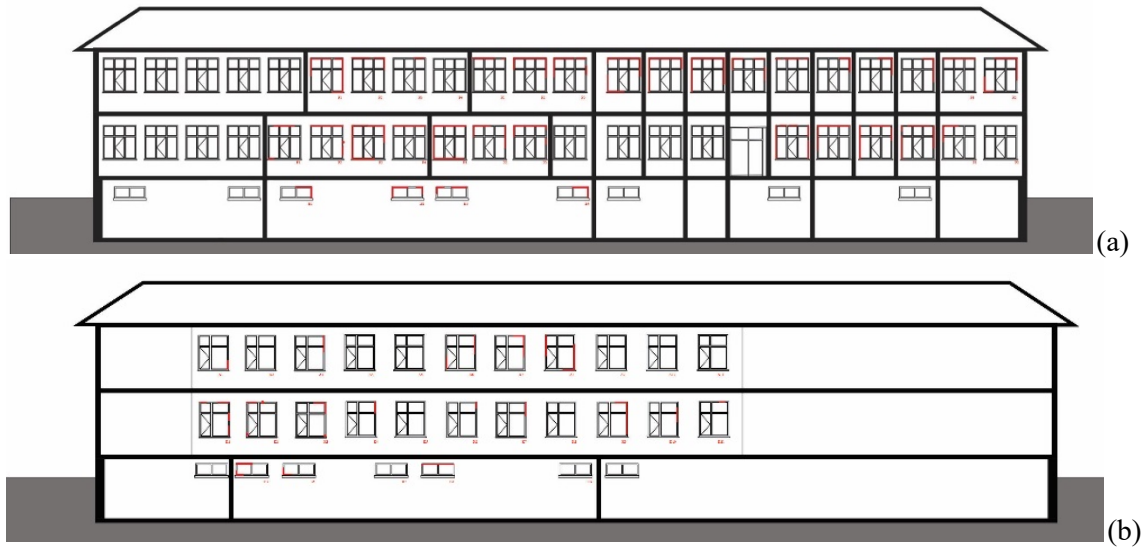
Çizelge 4.9. Düzeltilmiş ve düzeltilmemiş CFM50 değerlerine göre ACH50 değerleri

Ölçüm Kod	ACH50 (Düzeltilmemiş)	ACH50 (Düzeltilmiş)	Ortalama ACH değerleri		Sızdırmazlık durumu
			Düzeltilmemiş	Düzeltilmiş	
101P	2,78	2,87	2,27	2,29	Sızdırmaz
101D	1,75	1,71			
102P	4,25	4,28	4,04	4,05	Kısmen sızdırmaz
102D	3,84	3,82			
108P	19,35	20,08	16,47	16,78	İleri düzeyde sızdıran
108D	13,59	13,48			
201P	5,67	5,77	4,55	4,59	Kısmen sızdırmaz
201D	3,43	3,41			
202P	5,00	5,15	4,59	4,64	Kısmen sızdırmaz
202D	4,18	4,14			
206P	14,30	14,61	12,34	12,54	İleri düzeyde sızdıran
206D	10,38	10,48			
208P	19,19	19,84	19,21	19,49	İleri düzeyde sızdıran
208D	19,24	19,13			
203P	13,87	14,27	11,44	11,52	İleri düzeyde sızdıran
203D	9,02	8,78			

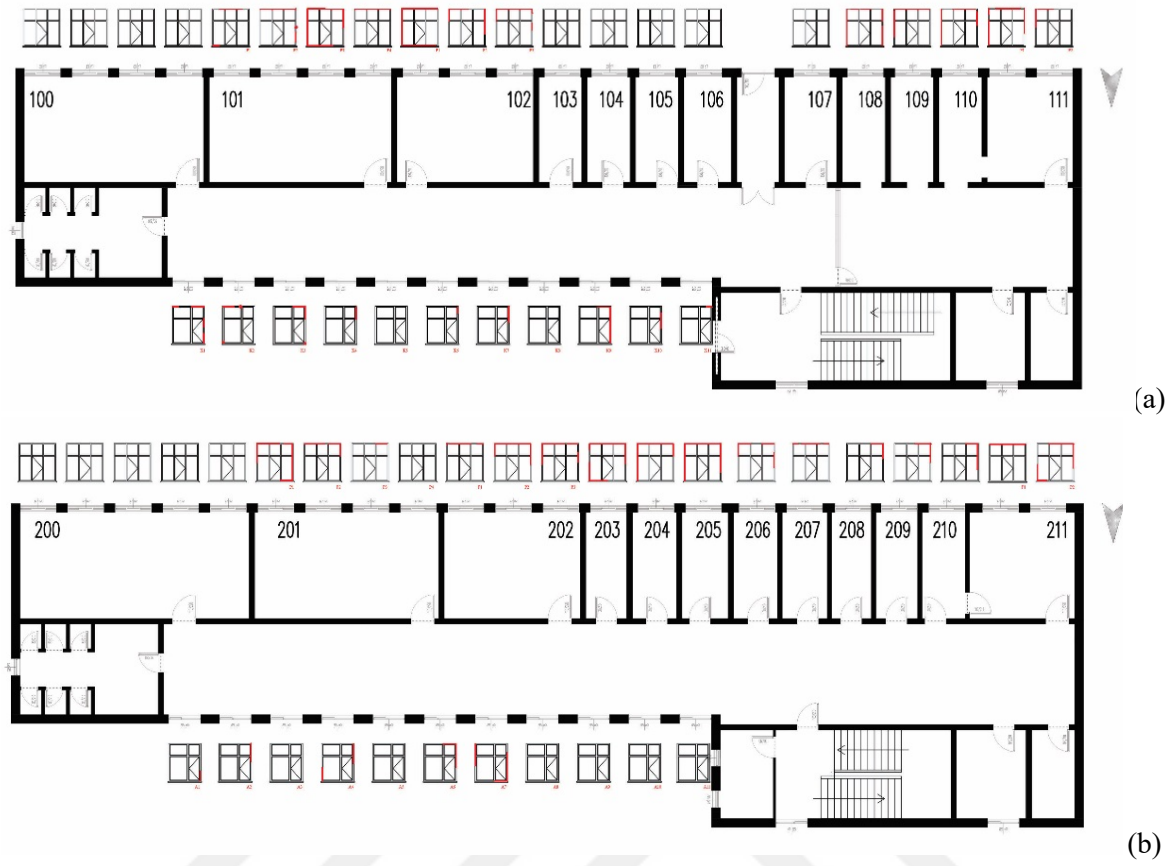
Düzeltilmiş CFM değerlerinden hareketle (Çizelge 4.8) tüm hacimler için ACH50 değeri hesaplanmıştır ve Çizelge 4.9’da sunulmuştur. Bölüm 2 ve Bölüm 4.1.2’de de ifade edildiği gibi CFM50 Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu veriler, Sayfa 29’da bulunan Çizelge 2.1’deki sınır değerlere uygun olarak değerlendirilmiştir. Bu bağlamda 101 kodlu hacmin sızdırmaz, 102, 201 ve 202 kodlu hacimlerin kısmen sızdırmaz, 108,206, 208 ve 203 kodlu hacimlerin de ileri düzeyde sızdıran özellik gösterdiği saptanmıştır. Bu noktada vurgulanması gereken en önemli bulgulardan biri 2. katta konumlanmış mekanların *efektif sızma alanının sadece cephe alanından değil aynı zamanda çatı döşemesini de içerdiği* ve *20X kodlu mekanlardaki ileri düzeyde sızdırma durumuna efektif sızma alanındaki artışın katkısının olduğu düşünülmektedir.*

Çizelge 4.9’daki verilerin ileri düzeyde irdelenebilmesi amacıyla Şekil 3.13’te sunulmuş kontrol listesinin arka sayfası kullanılarak ölçüm sürecindeki öznel değerlendirilmelerin not edilmesi, yapı kabuğundaki hava akış çatlak uzunluklarının folyo testi ile saptanması, uzunlukların not edilmesi, ilgili fotoğraflama ve eskizlerin belgelenmesi sürecindeki verilerin etüd edilmesi önem kazanmaktadır.

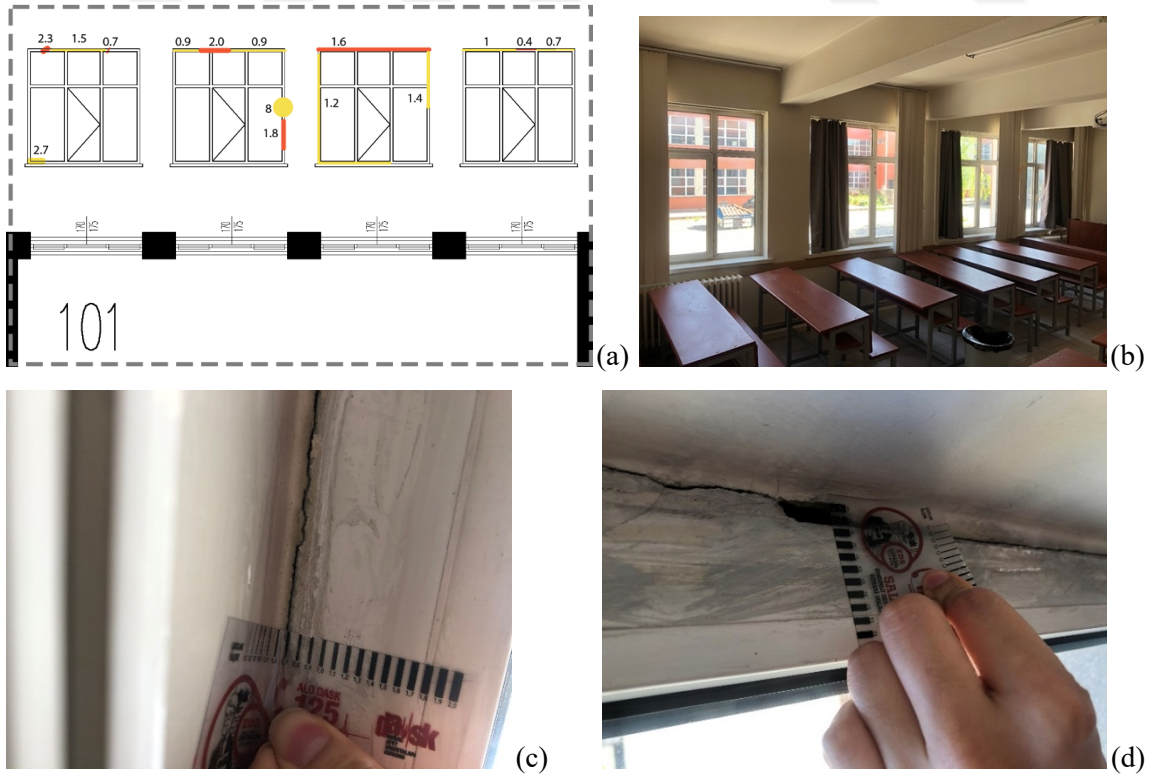
İlgili ölçümlerin tümü çizimlere işlenmiştir. Şekil 4.83 iç görünürlere işlenmiş çatlakları, Şekil 4.84 ise plan düzleminde çatlakları ifade etmek için düzenlenmiştir.



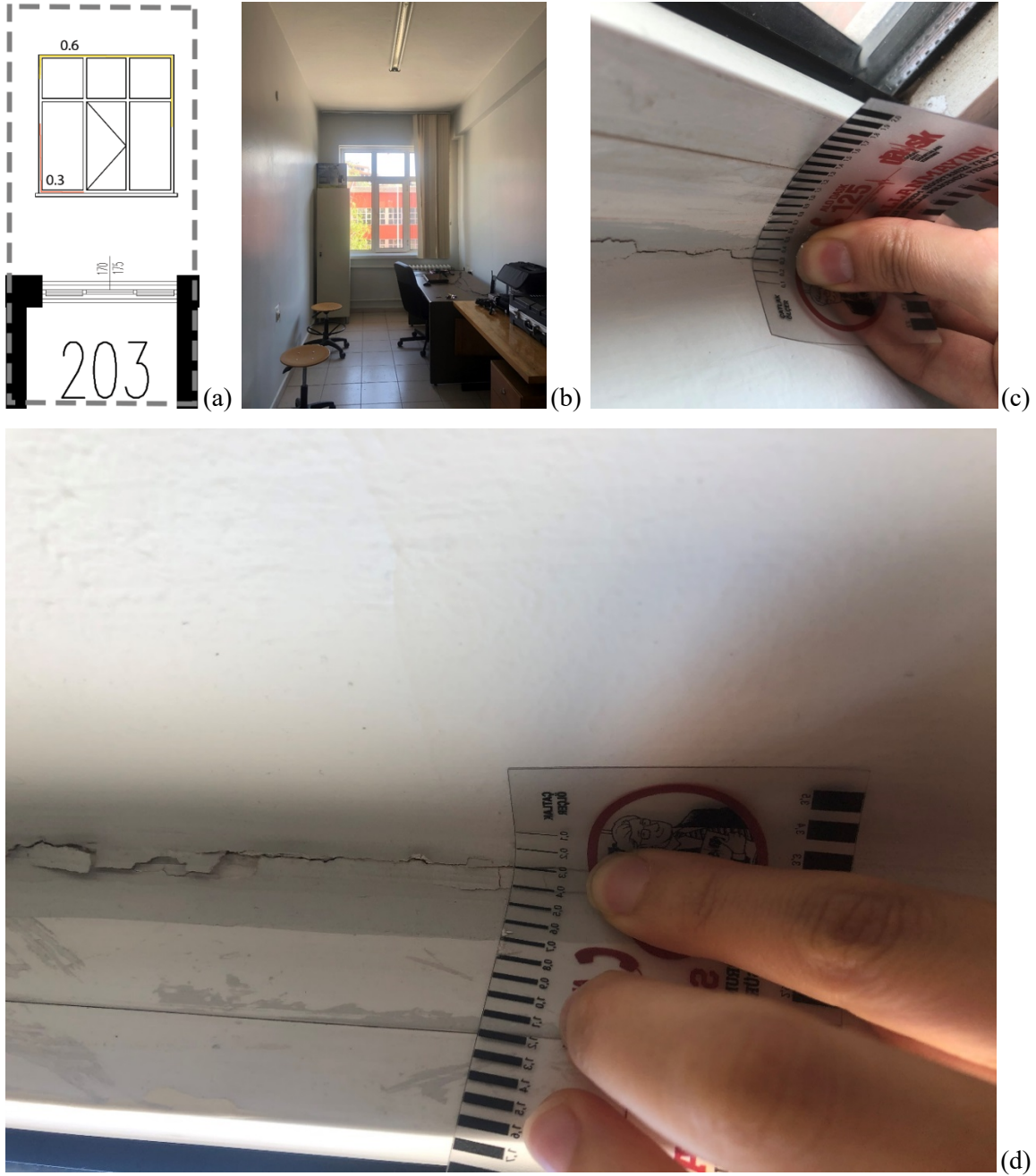
Şekil 4.83. İç görünüş- çatlakların temsili (a) güney yönü, (b) kuzey yönü



Şekil 4.84. Çatlakların plan düzleminde temsili (a) birinci kat planı, (b) ikinci kat planı



Şekil 4.85. 101 no'lu hacimde (b) yürütülen tespit çalışmaları (c ve d) ve verilerin işlenmesi (a)



Şekil 4.86. 203 no'lu hacimde (b) yürütülen tespit çalışmaları (c ve d) ve verilerin işlenmesi (a)

Şekil 4.85 ve Şekil 4.86'te tespit sürecine ilişkin örnekler bulunmaktadır. 101 ve 203 kodlu hacimlere odaklanan bu tespit yöntemi aracılığıyla Çizelge 4.10'da sunulan binadaki bütün mekanlara ait gözle ve folyo testiyle tespit edilebilen sızma alanları elde edilmiştir.

Çizelge 4.10. Gözlem ve folyo testi ile elde edilen çatlak uzunluk ve kalınlıkları – mekan bazında

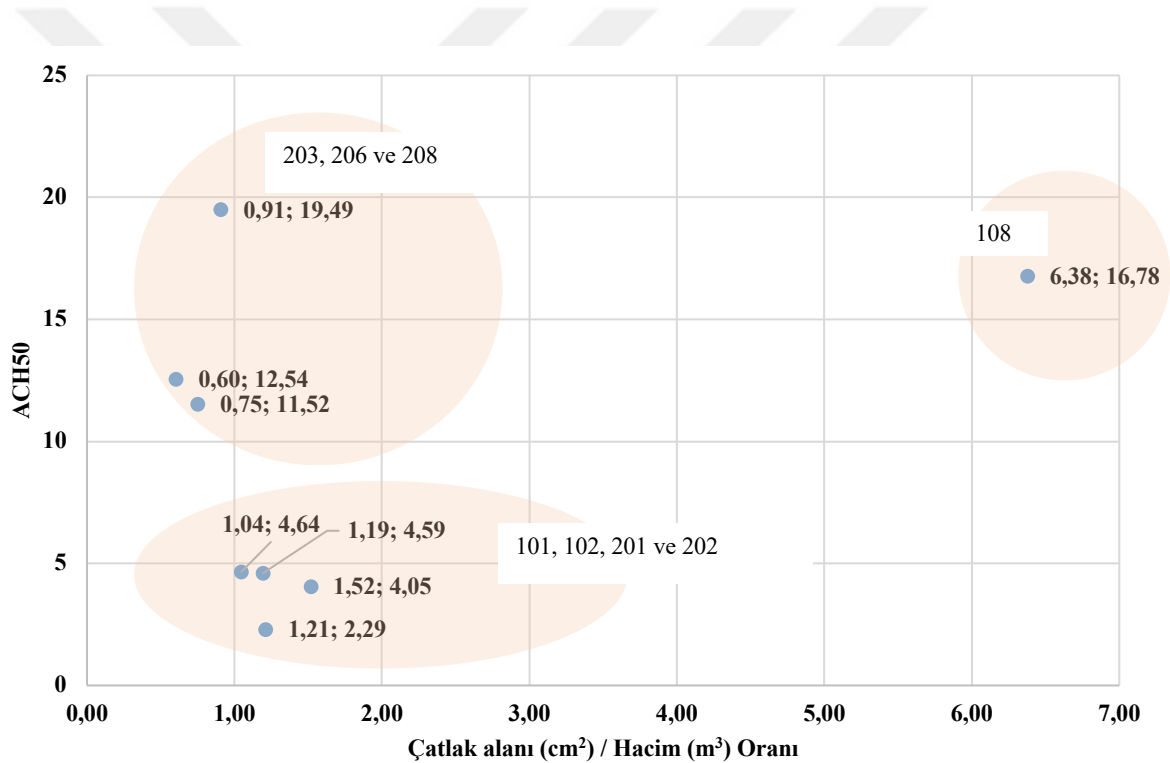
Mekan Kodu/ Açıklık Kodu	Çatlak Uzunluk (cm)	Çatlak Kalınlık (cm)	Mekan Kodu/ Açıklık Kodu	Çatlak Uzunluk (cm)	Çatlak Kalınlık (cm)	Mekan Kodu/ Açıklık Kodu	Çatlak Uzunluk (cm)	Çatlak Kalınlık (cm)
101 P1	10,00	0,23	111 P1	120,00	0,12	203	290,00	0,06
101 P1	80,00	0,15	111 P1	50,00	0,27	203	140,00	0,03
101 P1	5,00	0,07	111 P1	120,00	0,23	204	320,00	0,10
101 P1	30,00	0,27	111 P1	120,00	0,19	205	350,00	0,07
101 P2	100,00	0,09	111 P2	110,00	0,25	206	110,00	0,07
101 P2	70,00	0,20	111 P2	40,00	1,20	206	60,00	0,12
101 P2	10,00	0,80	K1	40,00	0,04	206	120,00	0,03
101 P2	50,00	0,18	K1	50,00	0,07	207	20,00	0,60
101 P3	170,00	0,16	K1	30,00	0,70	207	100,00	0,10
101 P3	335,00	0,12	K1	40,00	0,09	208	110,00	0,23
101 P3	90,00	0,14	K2	10,00	0,50	209	20,00	1,00
101 P4	80,00	0,10	K2	0,90	5,00	209	200,00	0,30
101 P4	30,00	0,04	K2	15,00	0,80	210	140,00	0,17
101 P4	60,00	0,07	K3	10,00	0,60	211 P1	170,00	0,03
102 P1	395,00	0,11	K3	110,00	0,05	211 P2	150,00	0,34
102 P2	150,00	0,19	K4	60,00	0,03	211 P2	300,00	0,12
102 P2	100,00	0,05	K6	70,00	0,07	A1	50,00	0,50
102 P2	50,00	0,06	K7	70,00	0,09	A3	100,00	0,40
102 P3	100,00	0,35	K9	220,00	0,18	A6	80,00	0,03
102 P3	125,00	0,15	K10	100,00	0,10	A6	110,00	0,34
102 P3	50,00	0,25	K10	20,00	0,40	A7	150,00	0,27
108	170,00	0,12	201 P1	170,00	0,34	A8	90,00	0,05
108	20,00	0,64	201 P1	235,00	0,12	A8	120,00	0,15
108	35,00	0,70	201 P2	140,00	0,40	B1	150,00	0,43
108	100,00	1,03	201 P2	110,00	0,09	B2	140,00	0,12
108	100,00	0,33	201 P3	40,00	0,04	B2	80,00	0,25
109	90,00	0,13	202 P1	10,00	0,50	B3	40,00	0,42
109	150,00	0,24	202 P1	140,00	0,33	B3	90,00	0,35
110	170,00	0,09	202 P1	30,00	0,11	B4	150,00	0,23
110	110,00	0,35	202 P2	310,00	0,07	B5	100,00	0,80
110	70,00	0,29	202 P3	170,00	0,05	B5	80,00	0,11
			202 P3	60,00	0,22	B6	60,00	0,34
			202 P3	70,00	0,04	B8	170,00	0,24

Çizelge 4.11. Çatlak alanı (cm²)/Mekan hacmi (m³) oranı ve sızdırmazlık değerleri

Mekan	Çatlak alanı (cm ²)	Hacim (m ³)	Çatlak alanı (cm ²)/Hacim (m ³) oranı	ACH50 (düzeltilmiş)
101	156,15	128,96	1,21	2,29
102	146,20	96,41	1,52	4,05
108	193,70	30,38	6,38	16,78
201	153,50	128,96	1,19	4,59
202	100,70	96,41	1,04	4,64
203	21,60	28,83	0,75	11,52
206	18,50	30,69	0,60	12,54
208	25,30	27,9	0,91	19,49

Elde edilen bu veriler ile ölçülen sızdırmazlık değerleri arasında bir korelasyon bulunup bulunmadığını saptamak amacıyla bir dizi analiz gerçekleştirilmiştir. Bu

analizlerden ilki Çizelge 4.11 ve Şekil 4.87’de sunulmaktadır. Mekânın hacmine oranla çatlak alanının en belirgin etkisinin 108 no’lu hacimde ortaya çıktığı görülmektedir. İşçilik ve kullanım sürecindeki bozulmalardan kaynaklı olarak oldukça **yüksek bir çatlak oranına sahip olan 108 no’lu mekan cephesinde sızdırmazlık test sonucu @50Pa 16,78 ACH olarak saptanmıştır**. Çatlak alanı (cm²) / mekan hacmi (m³) oranı üzerinden kurulan diğer ilişkiler önemli bulgulara işaret etmektedir. Küçük hacimli mekanlarda ACH değerleri oldukça yüksek çıkmıştır. 203, 206 ve 208 kodlu mekanlarda yapılan ölçümler sonucunda sırasıyla, 11,52, 12,54 ve 19,49 ACH50 değerleri bulunduğu, ancak bu değerlerde en önemli etmenin **sadece cephede saptanan çatlak alanı değil çatı döşemesinde gözle görünmeyen sızıntı alanlarının varlığı olduğu düşüncesi kesinleşmiştir**.



Şekil 4.87. Çatlak alanı (cm²) mekân hacmine (m³) oranı ile sızdırmazlık değerleri arasındaki ilişki

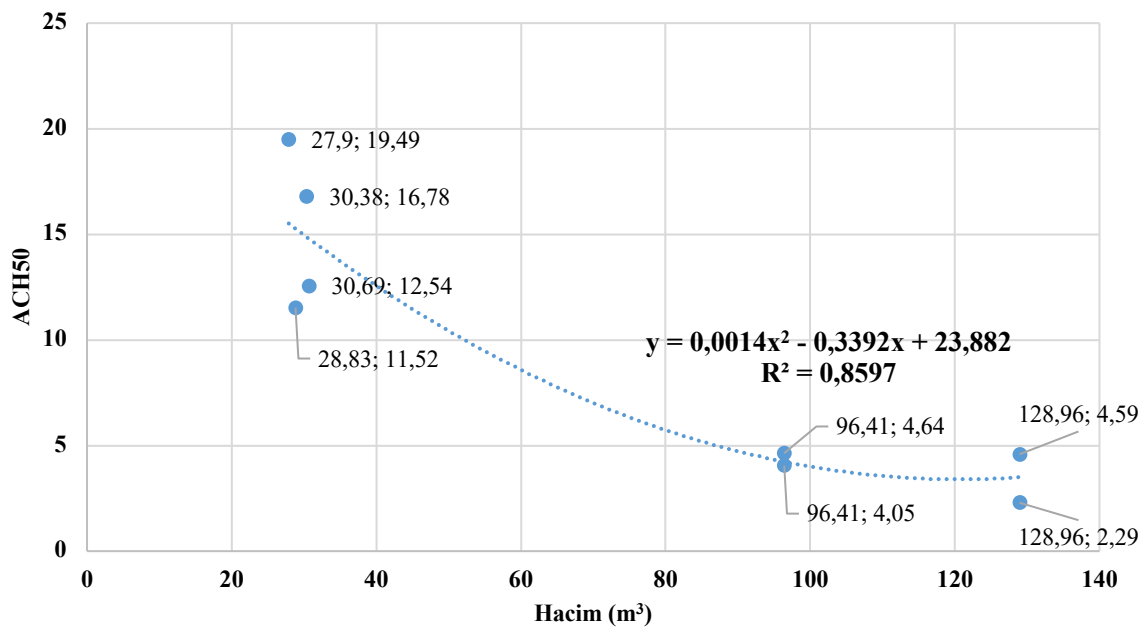
101, 102, 201 ve 202 kodlu mekanlarda çatlak alanı (cm²) / mekan hacmi (m³) oranı 1’den büyüktür ve bu mekanların hacimleri yüksek, ACH50 değerleri diğer hacimlere kıyasla daha düşüktür. 201 ve 202 kodlu hacimler için çatı döşemesinin yine efektif sızma alanları yarattığı 101 ve 102 kodlu mekanlara kıyasla görülmektedir. Bu noktada benzer hacim (128,96 m³) ve çatlak alanına sahip (sırasıyla, 156,15 ve 153,50 cm²) 101 ve 201 kodlu mekan ölçümleri sırasıyla 2,29 ve 4,59 ACH olarak saptanmıştır. Bu bağlamda, **çatı**

döşemesinin sızdırmazlık değerini %100 oranında artırdığı ifade edilebilmektedir. Yine benzer hacimli (96,41 m³) 102 ve 202 kodlu mekanlarda bu bulgu doğrulanmaktadır. 102 ve 202 arasında çatlak alanında azalma %31,12 oranındadır. 202'nin ACH değeri yaklaşık 8 ACH50 olması gerekirken, çatlak oranındaki azalma ile birlikte 4,64 ACH50 olarak gerçekleşmiştir. **Yaklaşık %31'lik bir azalma ile 5,50 ACH olması beklenen değer 4,64 olarak ölçülmüştür.**

Hacim bilgisinin ölçüm sonuçlarını nasıl etkilediğini etüt edebilmek amacıyla hazırlanan Şekil 4.88'de bulunan analiz irdelendiğinde hacim ile sızdırmazlık değerleri arasında anlamlı bir ilişki bulunduğu saptanmıştır. Şekil 4.88'e göre $R^2=0,86$ korelasyonla sızdırmazlık değerleri ve hacim bilgisi arasında bir ilişki kurulabilmektedir. Benzer hacimdeki ACH50 değerlerinin birlikte kümelenmesi dikkat çekicidir (Çizelge 4.11). $R^2=0,8597$ şartlarında ölçüm yapılan binanın tüm hacimleri için;

$$y = 0,0014x^2 - 0,3392x + 23,882 \quad \text{Denklem (4.2)}$$

kullanılarak tüm bina sızdırmazlık değerinin kestirilmesi olanaklı hale gelmektedir. Bu kestirimin güvenilirlik oranı %86'dır.



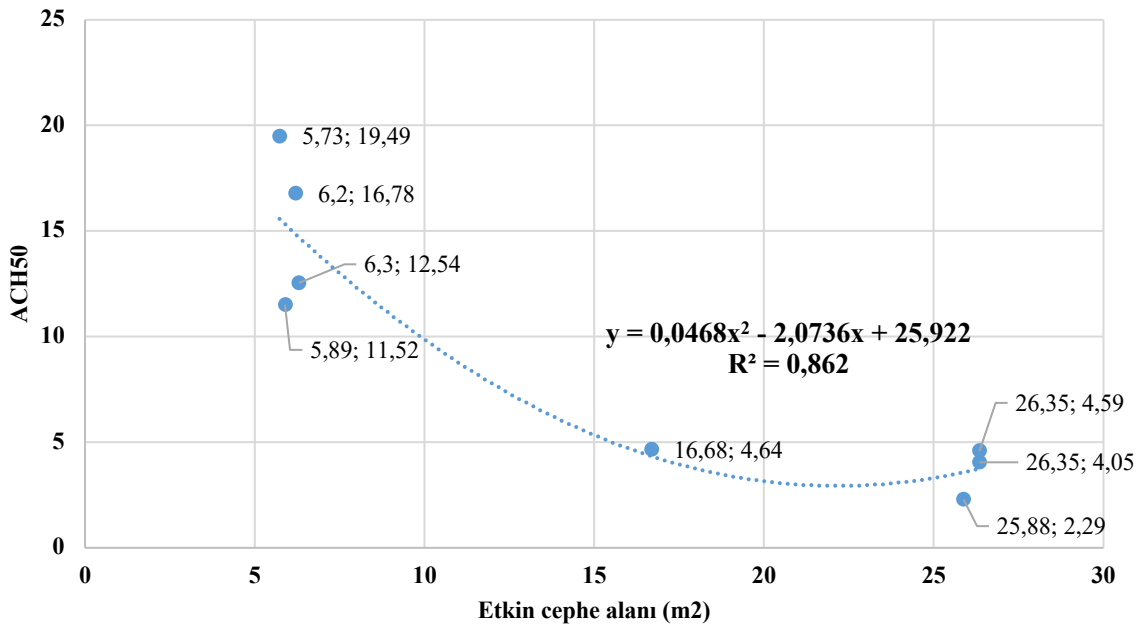
Şekil 4.88. Hacim (m³) ve ölçülen sızdırmazlık değerleri arasındaki ilişki

Ölçüm yapılan hacimlerin etkin cephe alanı ve ölçülen sızdırmazlık değerleri arasında da benzer bir ilişki bulunmaktadır. Çizelge 4.12’de görülen ölçüm yapılan mekanlara ait etkin cephe alanları ve ACH50 değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.88’de sunulmaktadır. Şekil 4.89’de görüldüğü gibi $R^2=0,8620$ olarak saptanmıştır. Etkin cephe alanına oranla ACH50 değerleri yine hacim ile kurulan ilişkilere benzer bir kümelenme göstermiştir. Etkin cephe alanının düşük olduğu durumlarda ACH50 değerleri yüksek saptanırken yüksek olduğu durumlarda düşüktür. $R^2=0,8620$ şartlarında ölçüm yapılan binanın tüm etkin cephe alanları için;

$$y = 0,0468x^2 - 2,0736x + 25,922$$

Denklem (4.3)

kullanılarak tüm bina sızdırmazlık değerinin kestirilmesi olanaklıdır.

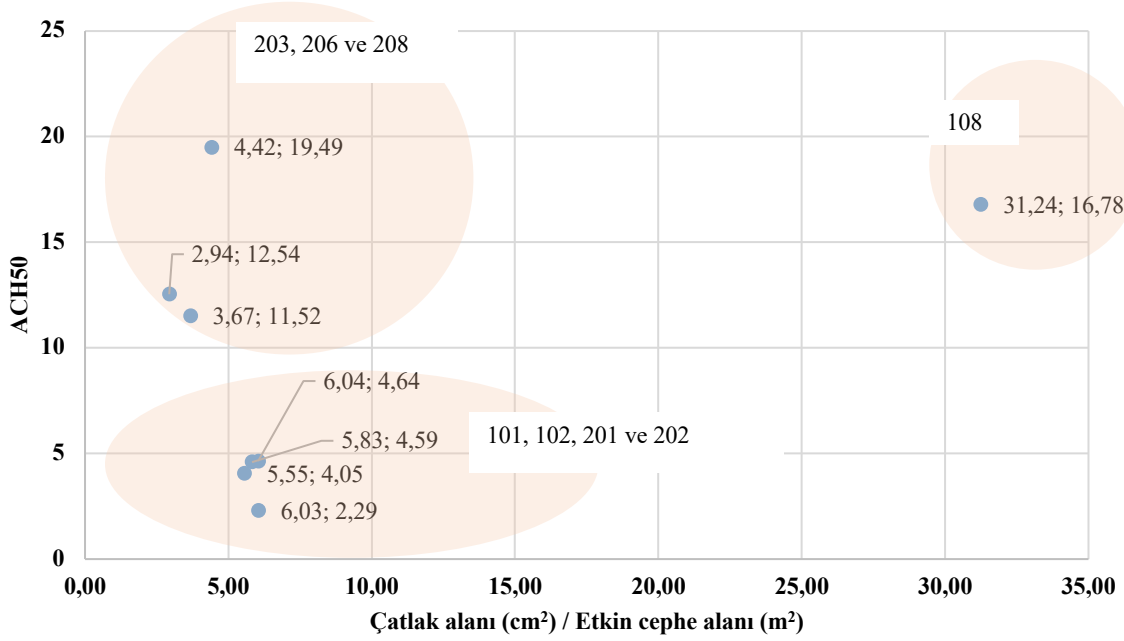


Şekil 4.89. Etkin cephe alanı (m²) ve düzeltilmiş ACH50 değerleri arasındaki ilişki

Çizelge 4.12. Etkin cephe alanı (m²) ve düzeltilmiş ACH50 değerleri

Mekan	Etkin cephe alanı (m²)	ACH50 (düzeltilmiş)
101	25,88	2,29
102	26,35	4,05
108	6,2	16,78
201	26,35	4,59
202	16,68	4,64
203	5,89	11,52
206	6,3	12,54
208	5,73	19,49

Etkin cephe alanının düşük olduğu durumlarda ACH50 değerleri yüksek olarak saptanmasına ilişkin bulgunun etkin cephe alanı üzerindeki toplam çatlak alanı ile ilişkili olduğu düşüncesi ile çatlak oranı (cm^2) / etkin cephe alanı (m^2) ilişkisi irdelenmiş ve bulgular Çizelge 4.13 ve Şekil 4.89’da sunulmuştur.



Şekil 4.90. Çatlak alanının (cm^2) etkin cephe alanına (m^2) oranı ve sızdırmazlık değerleri arasındaki ilişki

Çizelge 4.13. Çatlak alanı (cm^2) / etkin cephe alanı (m^2) oranı ve sızdırmazlık değerleri

Mekan	Çatlak alanı (cm^2)	Etkin cephe alanı (m^2)	Çatlak alanı (cm^2) / Etkin cephe alanı (m^2) oranı	ACH50 (düzeltilmiş)
101	156,15	25,88	6,03	2,29
102	146,20	26,35	5,55	4,05
108	193,70	6,20	31,24	16,78
201	153,50	26,35	5,83	4,59
202	100,70	16,68	6,04	4,64
203	21,60	5,89	3,67	11,52
206	18,50	6,30	2,94	12,54
208	25,30	5,73	4,42	19,49

Şekil 4.90 ve Çizelge 4.13’teki bulgular Şekil 4.87 ve Çizelge 4.11’deki bulgularla paraleldir. Bu çalışma kapsamında uygulanan kesinleşmiş ölçüm protokolünün sonuçlarına göre **çatlak alanı sızdırmazlık değerlerini hacim ve etkin cephe alanına oranla en çok etkileyen parametredir**. Bu bağlamda, hacim ve etkin cephe alanı bilgisinden binadaki tüm mekanların sızdırmazlık değerleri ayrı ayrı tespit edilebilmektedir. Denklem 4.2 kullanılarak hacme bağlı hesaplanan tüm hacimler için sızdırmazlık değerleri Çizelge 4.14’te

sunulmaktadır. Kesinleşmiş ölçüm protokolünün bulguları hacim bazında değerlendirildiğinde elde edilen değerler benzer hacimler için ACH50 kestirimini ters yönlü, yani hacim arttıkça sızdırmazlık değerinin düşmesi yönünde, -0,9017383 gibi oldukça yüksek bir korelasyon değeri ile elde edilmesini sağlamaktadır. Bu bağlamda, **bu çalışmanın en önemli çıkarımlarından biri, bir binada örneklem olarak seçilen hacimlerde yürütülecek sağlıklı ölçümlerin benzer hacimlerin sızdırmazlık değerini saptamada yeterli güvenilirliği sağlayabileceği yönündedir.**

Çizelge 4.14. Tüm bina hacimleri için ölçülmüş ve $y = 0,0014x^2 - 0,3392x + 23,882$ bağıntısı ile hesaplanmış sızdırmazlık değerleri

Mekan kodu	Hacim (m ³)	ACH50 (düzeltilmiş)	Korelasyon Katsayısı
100	126,79	3,38	-0,9017383
101	128,96	2,29	
102	96,41	4,05	
103	30,38	14,87	
104	30,38	14,87	
105	30,38	14,87	
106	32,24	14,40	
107	36,89	13,27	
108	30,38	16,78	
109	30,38	14,87	
110	30,38	14,87	
111	60,76	8,44	
200	160,89	5,55	
201	128,96	4,59	
202	96,41	4,64	
203	28,83	11,52	
204	31,31	14,63	
205	32,24	14,40	
206	30,69	12,54	
207	31,31	14,63	
208	27,90	19,49	
209	29,45	15,11	
210	30,38	14,87	
211	73,78	6,48	
TÜM BİNA SIZDIRMAZLIK (Ortalama ACH) – hacim üzerinden		11,48	

Benzer bir analiz etkin cephe alanı üzerinden yürütüldüğünde, korelasyon katsayısının yani etkin cephe alanı üzerinden tüm bina sızdırmazlık kestirimi yapabilme güvenilirliğinin -0,72456 düzeyine gerilediği görülmektedir (Çizelge 4.15).

Çizelge 4.15. Tüm bina hacimleri için ölçülmüş ve $y = 0,0468x^2 - 2,0736x + 25,922$ bağıntısı ile hesaplanmış sızdırmazlık değerleri

Mekan kodu	Etkin cephe alanı (m ²)	ACH50 (düzeltilmiş)	Korelasyon Katsayısı
100	25,88	3,60	-0,72456
101	26,35	2,29	
102	16,68	4,05	
103	6,20	14,86	
104	6,20	14,86	
105	6,20	14,86	
106	6,89	13,86	
107	7,50	13,00	
108	6,20	16,78	
109	6,20	14,86	
110	6,20	14,86	
111	35,68	7,41	
200	26,35	11,74	
201	26,35	4,59	
202	16,68	4,64	
203	5,89	11,52	
204	6,30	14,72	
205	6,60	14,27	
206	6,30	12,54	
207	6,30	14,72	
208	5,73	19,49	
209	6,00	15,17	
210	6,20	14,86	
211	15,00	5,35	
TÜM BİNA SIZDIRMAZLIK (Ortalama ACH) – etkin cephe alanı üzerinden		11,50	

Çizelge 4.14 ve 4.15'teki bulgular ışığında ölçüm yapılan mekanlardan elde edilen veriler ve hacim bilgisi arasında anlamlı bir bağıntı saptanması halinde, örnek mekanlar üzerinden tüm bina sızdırmazlık değeri kestirilebilmektedir. Çatlak alanlarının etkisi de tüm bina ACH 50 verisinin düzeltilmesinde kullanılabilir. Bu çalışmanın temel kısıtlılıklarından biri birinci kattaki bazı mekânlara erişim sağlanamamış olmasıdır. 102-109 kodlu mekanlara erişilemediği için çatlak ölçümleri tamamlanamamıştır. Ayrıca koridor gibi taban alanı ve hacim oranı büyük alanların test edilmesi de söz konusu olamamıştır. Bu tip alanların test edilmesinde birden fazla fan basınçlandırma test ekipmanı kullanılması gerekmektedir. Çizelge 4.14'te elde edilen veriler sonucunda Mimarlık Bölümü M2 blok sızdırmazlık ortalama değeri (güney yönlenmeli 24 hacim üzerinde) **11,48** ACH@50Pa olarak saptanmıştır ve bu sızdırmazlık değeri uluslararası standartlarca *ileri düzeyde sızdıran* binaya karşılık gelmektedir. Binanın enerji performansı bakımından

sızdırmazlık düzeylerinin iyileştirilmesi iç mekan konfor koşullarını ve tüketim profillerini olumlu yönde etkileyecektir.

Özetle, konut dışı binalarda sızdırmazlığın kompartıman ve çoklu-nokta fan basınçlandırma testleri üzerinden saptanması amacıyla bir yöntem geliştirmeye odaklanan bu çalışma örnek mekanlarda yapılacak ölçümlerin yaklaşık 0,86 güven düzeyinde diğer mekanlara hacim bilgisi üzerinden genellenebileceğini ortaya koymuştur.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapı kabuğunda kontrol edilemeyen hava geçişinin bina enerji performansını doğrudan etkilediği bilinmektedir. Bu nedenle, binaların enerji performansının değerlendirilmesinde sızdırmazlık önemli bir parametre olarak dikkate alınmaktadır. Bir binanın enerji performansının büyük bir kısmının ısıtma ve soğutma yüklerine bağlı olduğu düşünüldüğünde, sızdırmazlık düzeylerinin yeterli olmadığı binalarda bu yüklerin olumsuz etkilenmesi ve enerji tüketiminin artması kaçınılmazdır. Dolayısıyla, havalandırma ve sızdırmazlık enerji verimliliği ve iç mekân ısı konforu bakımından önemli bir parametre halini almaktadır. Bu bağlamda, birçok ülkede sızdırmazlık sınır değerleri mevcut yapıların iyileştirilmesi ya da yeni binaların tasarlanmasında bina enerji performansının değerlendirilmesi bakımından yönetmeliklerin bir parçası olarak ele alınmış ve yapı kabuğundaki istenmeyen hava geçişlerinin olabildiğince azaltılması hedeflemiştir. Sızdırmaz ve “süper-yalıtımlı” konutlar enerji performans kriterlerini karşılama potansiyeline sahip yaklaşımlar olarak sıklıkla araştırılan ve uygulanan örnekler halini almıştır. Sızdırmaz binalarda ise iç hava kalitesinin kontrolü doğal ya da mekanik havalandırma ile olanaklı hale gelmektedir. Yapı kabuğundan istenmeyen hava geçişlerinin engellendiği sızdırmaz binalarda iç hava kalitesinin mekanik sistemlerle düzenlenmesi de enerji tüketimi ile sonuçlanmaktadır. Bu nedenle, pasif mimari ve yapısal uygulamaların sızdırmazlık, yalıtım, yapı kabuğu kurgusu, iç mekân konfor koşulları, iç hava kalitesi düzeylerinin saptanması önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasının Giriş ve Amaç bölümünde aktarıldığı ve bir önceki paragrafta özetlendiği gibi, binalarda sızdırmazlığın saptanması kritik önemdedir ve binanın enerji performansının doğru tahmin edilebilmesi için sızdırmazlık değerinin bilinmesi gerekmektedir. Sızdırmazlık düzeyini belirlemeye yönelik olarak yürütülen birçok bilimsel çalışma mevcut binalarda belirli ölçüm protokollerinin yürütülmesine odaklanmıştır. Bölüm 2’de literatür çalışması kapsamında ele alınan yaklaşımlar iki önemli noktayı ortaya koymuştur. Bunlardan ilki binalarda sızdırmazlık çalışmalarının büyük oranla bağımsız/müstakil konutlarda gerçekleştirildiği, ikincisi ise ölçüm yöntemi olarak sıklıkla fan basınçlandırma testi tercih edildiğidir. Büyük ölçekli yapılarda sızdırmazlık değerlerinin saptanması bağımsız/müstakil konutların sızdırmazlık değerlerine ilişkin veri miktarına

kıyasla oldukça az rastlanan bir araştırma alanıdır. Konut dışı yapılarda sızdırmazlığın belirlenmesi, bağımsız bölümler arasındaki bölücü duvarlar, bina cephe alanının büyüklüğü, gibi nedenlerden dolayı daha karmaşıktır. Ek olarak, konut dışı yapılarda başka sızma alanları da oluşabilmektedir: örneğin merdiven boşluğuna açılan kapılar, garaj kapıları, asansör şaftları vb. Büyük ölçekli yapıların sızdırmazlık değerlerini ölçebilmek için fan basınçlandırma yöntemi kullanılabilmektedir ancak bu durumda da çok sayıda fan basınçlandırma test ekipmanı kullanarak eş zamanlı ölçüm yapılması anlamına gelmektedir. Genellikle işleyiş halinde bulunan binalarda bu ölçekte bir çalışmayı yönetmek binadaki doğal akışların kesintiye uğratılmasını gerektirmektedir. Bu bağlamda, sızdırmazlık çalışmalarının bağımsız/müstakil konut yapılarına odaklandığı saptamasından hareketle, bu tez çalışması kapsamında, konut dışı yapılarda tek ekipman kullanarak fan basınçlandırma testlerinin uygulanabilirliği ve sızdırmazlık değerinin saptanabilirliğini araştırmak amaçlamıştır.

Tez çalışmasının kurgusunu belirleyen temel araştırma sorusu *konut dışı binalarda, çok sayıda mekanda tek fan basınçlandırma test ekipmanı kullanarak yapılan ölçümler sonucunda tüm-bina sızdırmazlık değerinin saptanıp saptanamayacağı* olarak belirlenmiştir. Alt araştırma soruları ise, böyle bir çalışmada yürütülecek ölçüm prosedürünün nasıl belirlenmesi gerektiği, ölçüm yapılacak çoklu mekanların hangi koşullara göre belirlenmesi gerektiği, belirsizlik ve güvenilirlik çalışmalarının nasıl yapılması gerektiği, elde edilen sızdırmazlık değerleri ve standartlar arasında nasıl ilişkiler kurulması gerektiğine odaklanmıştır. Bu alt araştırma soruları tez kapsamında literatür çalışması ve yöntem kurgusu bakımından belirleyici olmuştur. Böylece, bu tez çalışması kapsamında binaların enerji performansı üzerinde büyük bir etkisi olduğu kabul edilen yapı kabuğu sızdırmazlık değerleri bir kamu yapısı üzerinden ölçüm yöntemiyle irdelenmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında Giriş ve Amaç bölümünde tanımlanmış olan problem, araştırma soruları ve hipotez bağlamında bir literatür araştırması yürütülmüştür. Literatür araştırmasında; sızdırmazlığa ilişkin temel bilgiler aktarılmış ve araştırma alanının bilimsel arka planı özetlenmiştir. Ulusal ve uluslararası ölçekte sızdırmazlık standartlarının ölçüm, sınır değer ve değerlendirme kriterleri açıklanmıştır. Son on yılda sızdırmazlık çalışmalarının özetlendiği bir meta analiz çalışması yapılmıştır. Saptanan ve yöntem kurgusunun netleştirilmesine yardımcı olan yaklaşım ve parametreler tartışılmıştır.

Literatür taramasında da görüldüğü gibi sızdırmazlık verilerinin tespit edilmesi zahmetli bir süreçtir ve bina ne kadar büyük ve karmaşıksa, veri elde etmek o kadar zor ve zaman alıcı olmaktadır. Bu nedenle, mevcut çalışmaların çoğu tekil ve müstakil konutlarda yürütülmüştür. Çok katlı, kamu kullanımına açık, hücre tipi plan organizasyonuna sahip yapılarda yürütülen çalışma sayısı oldukça azdır. Yine literatür çalışması ortaya koymuştur ki, sızdırmazlık binanın tüm fiziksel nitelikleri, işlevi, içinde bulunduğu iklim ve çevreye ait etmenlerden etkilenmekte olup, bina sızdırmazlığına ilişkin yürütülecek tüm çalışmalarda bu parametrelerin değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

Diğer yandan, 50Pa basınçta yapılan testlerde saatlik hava değişim oranı (ACH50) 2'den küçük ise bina sızdırmaz olarak değerlendirilmekte, $ACH50 < 1.5$ değeri ise yapının mekanik havalandırmaya ihtiyacı olduğu anlamına gelmektedir. Pasif konutlarda ortama $ACH_{nat} 0.6h^{-1}$ iken yeni yapılan binalarda $1.5 h^{-1}$ değerinin altında olması beklenmektedir.

Uluslararası sızdırmazlık standartlara ait değerlendirme ölçütleri, test prosedürleri, basınçlandırma kriterleri, test hazırlık uygulama sürecine ait detaylar ve test doğruluk düzeylerinin değerlendirilmesine yönelik yöntemler detaylı bir biçimde ele alınmış, yöntem kurgusunun oluşturulması bu değerlendirme ölçütlerine göre belirlenmiştir. Chapter Eight RESNET, ABAA, ASTM E779, ASTM E1827, ASHRAE 1478 RP, ISO 9972, standartları irdelenmiştir. Tüm incelenen standartlarda, özellikle Chapter Eight RESNET (2013) ölçüm sürecindeki çevresel koşulların kontrolünü, ASTM E779 (2003) ve ISO 9972 (2006) hesaplama yöntemi ve test geçerliliği kriterlerini net bir biçimde tanımlaması bakımından, bu tez çalışması kapsamında dikkate alınan iki standart olarak belirlenmiştir.

Deneysel bir alan çalışmasına dayalı olarak kurgulanan yöntem, konut dışı bir yapıda yürütülen fan basınçlandırma testleri aracılığıyla uluslararası standartlara referansla çok-mekanlı/çok-noktalı bir ölçüm yaklaşımı öne sürmektedir. Bu deneysel yöntem aracılığıyla tüm-bina sızdırmazlık değerlerinin saptanması amaçlanmıştır. Bu bağlamda, konut dışı binalarda, çok sayıda mekanda tek fan basınçlandırma test ekipmanı kullanarak yapılan ölçümler sonucunda tüm-bina sızdırmazlık değerini saptamanın mümkün olup olmadığı test edilmiştir.

Binada öncelikli olarak bir ön denetleme süreci yürütülmüş, bina sızdırmazlığını etkileyebilecek değişkenlere ait verileri detaylı biçimde toplanmış, uygulanacak ölçüme dayalı nicel çalışmanın ilgili tüm alt parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra kesinleşmiş ölçüm protokolünde kullanılacak yaklaşımı belirlemek amacıyla tek bir mekânda farklı ölçüm yaklaşımları test edilmiş, ölçüm sonuçlarının ön incelemesi tamamlanmış ve kesinleşmiş ölçüm yöntemine karar verilmiştir. Temsili hacimlerde kesinleşen ölçüm protokolü kullanılarak ölçüm süreci tamamlanmıştır. Elde edilen veriler ölçüm ve değerlendirme kriterleri kapsamında ele alınmış ve bulgular irdelenmiştir.

Tez çalışması kapsamında yürütülen tüm sızdırmazlık testi uygulamalarında aşağıdaki ortak adımlar uygulanmıştır:

- Yapı kabuğu basıncını ölçmek için tek fanlı Minneapolis Blowerdoor Model 3 ve TECLOG4 yazılımı kullanılmıştır.
- 12 adet Testo 174 veri kaydedici cihaz ile sızdırmazlık ölçümünün yapıldığı birim ve çevreleyen diğer birimlerin sıcaklık ve nem profilleri 10 dakikalık aralıklarla ölçüm öncesi, süresince ve sonrasında kaydedilmiştir.
- Tüm ölçümler süresince, ölçüm yapılan binanın karşısında bulunan bir başka binanın çatısında konumlandırılmış DavisPro Vantage hava istasyonu aracılığıyla 10 dakikalık aralıklarla mikroklimatik veriler kaydedilmiştir.
- Testo 480 ile çevreyelen hacimlerde basınç ölçümleri manuel okuma ile yapılmıştır.

Yapılan tüm ölçümlerde ortak olan bir dizi sınır koşullu belirlenmiştir ve uygulanmıştır:

- Ölçüm yapılan hacimlerin komşu hacimlerinde dışa açılan tüm pencereler kapalı tutulmuştur.
- Ölçüm yapılan tüm hacimlerin her katta ortak koridora açılan hacimler olması gerekmektedir.
- Cephe hattının ortasına yakın olan alanlar örneklem olarak seçilmiştir. Bina köşelerine yakın hacimlerde basınç ölçümü yapılması hatalı sonuçlar verebileceği için cephe ortasına yakın konumlarda ölçüm yapılmıştır. (Şekil 2.6; ASTM E779, 2003).

Ön ölçümler ve kesinleşmiş ölçümlerin tümünde fan basınçlandırma testleri için Minneapolis Blower Door Model 3 kullanılmış, sızdırmazlık düzeyi saatlik olarak nicel hava değişimi üzerinden ölçülmüştür. Minneapolis Blower Door Model 3 bilgisayar tarafından kontrol edilen ve bina hava sızdırmazlığını belirlemek için kullanılan basınçlandırma/basınçsızlaştırma test ekipmanıdır ve ölçüm ve veriler TECLOG 4.0 yazılımı kullanılarak yürütülmüş ve analiz edilmiştir.

Kesinleşmiş ölçüm protokolünden önce, kurgulanmış olan senaryolardan en güvenilir ölçüm sonuçlarını veren kombinasyon ya da kombinasyonların saptanabilmesi amacıyla, bir ön ölçüm protokolü yürütülmüş ve elde edilen veriler değerlendirilmiştir.

Fan/ölçüm cihazının ölçüm yapılan mekana göre konumu test yönteminin belirleyicisidir. Fan ve ölçüm cihazının mekan içerisinde konumlanması basınçsızlaştırma (*depressurization – D*) testlerini, dışarıda konumlanması ise basınçlandırma (*pressurization -P*) testlerini gerektirmektedir. Her senaryo bu temel ölçüm farklılığı üzerinden tartışılmıştır. Bu bağlamda kesinleşmiş ölçüm protokolünde basınçlandırma (*pressurization -P*) testlerinin uygulanmasına karar verilmiştir. Standartlar tarafından açıkça belirtilmiş olan basınçlandırma ve basınçsızlaştırma testlerinin mümkün olduğunca bir arada kullanılması prensibine bağlı kalınarak kesinleşmiş ölçümlerde uygun tüm durumlarda basınçsızlaştırma testleri de yapılmıştır.

Elektrik armatürlerinin sızdırmazlığının sağlanması ya da olduğu gibi bırakılmasının test koşullarına etkisini değerlendirmek amacıyla her test için ACH50 değeri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, kesinleşmiş ölçüm protokolünde elektrik armatürlerinin sızdırmazlığı sağlanmaksızın ölçümlerin yapılmasının uygun olabileceğini ortaya koymuştur. Yağmurlu günde yapılan ölçümler ve güneşli günde yapılan ölçümler arasında ACH50'nin tespiti bakımından belirgin bir farklılık görülmektedir. Yağmurlu günde ölçülen ACH50 değerleri güneşli günlerde tespit edilen düzeyin yaklaşık 3 katıdır. Bu nedenle, kesinleşmiş ölçüm protokolünde ölçümlerin güneşli/yağışsız günlerde yürütülmesine karar verilmiştir.

Bina/koridor pencerelerinin açık ya da kapalı olmasına ilişkin verilerin ihmal edilebilir bir değer olduğu tespit edilmiş bu sebeple, kesinleşmiş ölçüm protokolünde ölçümlerin bina/koridor pencere ve kapıları açık olarak yürütülmesine karar verilmiştir.

kesinleşmiş ölçüm protokolü güneşli/yağışsız günlerde, elektrik armatürlerinin sızdırmazlığı sağlanmaksızın, bina/koridor pencere ve kapıları açık olarak, basınçlandırma (*pressurization* – P) ve basınçsızlandırma (*depressurization* – D) testlerinin bir arada uygulanmasına karar verilmiştir.

Kesinleşmiş ölçüm protokolüne geçişte alınan önemli bir diğer karar da ölçüm sırasında akış halkası değişikliği yapmanın doğruluk oranını etkilemesi nedeniyle halka değişikliğinin devre dışı bırakılması olmuştur. Halka değişikliği yapılmayan ölçümlerde düşük basınç farklarının test edilememesi riskine karşı, daha fazla çoklu-nokta ölçümü alabilmek için basınç farkı uygulama aralıkları değiştirilmiştir. Aynı akış halkası kullanılarak indüklenebilen en yüksek ve en düşük basınç farkları her uygulamadan önce test edilmiş ve ölçüm doğruluğunu artırmak için ölçüm yapılan nokta sayısı artırılmış ve 5Pa aralıklarla basınç farkı indüklenmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında kurulan ana çerçeve, sıklıkla tekil konut yapılarında yürütülen sızdırmazlık testlerinin konut dışı yapılara kompartıman ölçümleri üzerinden uygulanabilme potansiyelini araştırmak ve çok mekandan oluşan daha büyük ölçekli yapılarda sızdırmazlık düzeyini kestirebilmeye odaklandığı için ön ölçüm protokolüne bağlı olarak geliştirilmiş olan kesinleşmiş ölçüm protokolüne ait veriler ölçüm sonuçları üzerinden sistematik olarak karşılaştırılmıştır.

Karşılaştırma öncesi, özellikle farklı akış halkaları kullanılarak tamamlanan ölçümlere ait verilere ait CFM50 değerlerinin eşitlenebilmesi için TEC,2017b ve TEC, 2020a kaynaklarında belirtilen çevirme katsayı ve formülleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çevirme işleminin temel amacı tüm ölçümlerde aynı halka kullanılmışçasına CFM50 değerlerini eşitleyebilmek böylece mekan bazında ACH50 değerlerinin birbiriyle doğru bir şekilde ilişkilendirebilmesini sağlamaktır. Düzeltilmemiş ve düzeltilmemiş CFM değerlerinin C halkasına kalibre edilmiş olduğu veriler hesaplanmış, tüm ölçümlerin C halkasına kalibre edilmiş olarak ACH50 hesaplamalarında kullanılması olanaklı hale gelmiştir. Düzeltilmiş CFM değerlerinden hareketle tüm hacimler için ACH50 değeri hesaplanmıştır. Bu noktada en önemli bulgulardan biri 2. katta konumlanmış mekanların efektif sızma alanının sadece cephe alanından oluşmaması, aynı zamanda çatı

döşemesini de içermesine bağlı olarak sızdırmazlık düzeylerinin daha yüksek olduğu bulgusudur. Bu bulgu, efektif sızma alanındaki artış ile açıklanabilmektedir.

Binadaki bütün mekanlara ait sızma alanları gözle ve folyo testiyle tespit edilmiştir. Elde edilen bu veriler ile ölçülen sızdırmazlık değerleri arasında bir korelasyon bulunup bulunmadığını saptamak amacıyla bir dizi analiz gerçekleştirilmiştir. İşçilik ve kullanım sürecindeki bozulmalardan kaynaklı olarak oldukça yüksek bir çatlak oranına sahip olan mekanların ileri düzeyde sızdırmaya sahip olduğu tespit edilmiştir. Çatlak alanı (cm^2) / mekan hacmi (m^3) oranı üzerinden kurulan diğer ilişkiler de önemli bulgulara işaret etmektedir. Küçük hacimli mekanlarda ACH değerleri oldukça yüksek çıkmıştır. Bu bulgular, sızdırmazlığı etkileyen parametrenin sadece cephede saptanan çatlak alanlarına bağlı olarak değil, efektif sızma alanını artıran çatı döşemesinde de görülmeyen sızma alanlarından kaynaklandığı düşüncesini pekiştiren niteliktedir.

Hacim bilgisinin ölçüm sonuçlarını nasıl etkilediğini etüt edebilmek amacıyla sonuçlar irdelendiğinde hacim ile sızdırmazlık değerleri arasında anlamlı bir ilişki bulunduğu saptanmıştır. Benzer hacimdeki mekanlar için ACH50 değerlerinin birlikte kümelenmesi dikkat çekicidir.

Ölçüm yapılan hacimlerin etkin cephe alanı ve ölçülen sızdırmazlık değerleri arasında da benzer bir ilişki bulunmaktadır. Etkin cephe alanı göz önüne alındığında, benzer etkin cephe alanına sahip mekanların ACH50 değerlerinin yine hacim üzerinden yapılan okumalara benzer bir kümelenme gösterdiği saptanmıştır. Etkin cephe alanının düşük olduğu durumlarda ACH50 değerleri yüksek, yüksek olduğu durumlarda ise düşüktür.

Bu çalışma kapsamında uygulanan kesinleşmiş ölçüm protokolünün sonuçlarına göre çatlak alanı sızdırmazlık değerlerini hacim ve etkin cephe alanına oranla en çok etkileyen parametredir. Bu bağlamda, hacim ve etkin cephe alanı bilgisinden binadaki tüm mekanların sızdırmazlık değerleri ayrı ayrı tespit edilebilmektedir. Bu bağlamda çalışmanın en önemli çıktılarından biri, bir binada örneklem olarak seçilen hacimlerde yürütülecek sağlıklı ölçümlerin benzer hacimlerin sızdırmazlık değerini saptamada yeterli güvenilirliği sağlayabileceği yönündedir.

Ölçüm yapılan mekanlardan elde edilen veriler ve hacim bilgisi arasında anlamlı bir bağıntı saptanması halinde, örnek mekanlar üzerinden tüm bina sızdırmazlık değeri kestirilebilmektedir. Çatlak alanlarının sızdırmazlığı nasıl etkilediğine dair yaklaşım da konut dışı yapılarda tüm bina ACH 50 verisinin kestiriminde kullanılabilecek niteliktedir. Dolayısıyla bu çalışma, bugüne dek yaygın olarak bağımsız/müstakil konut yapılarında yürütülen sızdırmazlık ölçüm çalışmalarının, binaya özel olarak geliştirilecek bir yöntem kurgusu aracılığıyla kompartıman ölçümleri üzerinden uygulanabileceğini ortaya koymuştur. Bu çalışmanın en önemli çıktılarından biri, bir binadaki benzeşen tekil hacimlerin sızdırmazlık değerlerinin ölçülmesi yoluyla, tüm binaya dair sızdırmazlık değerinin kestirilebileceğini ortaya koymasındır.

Bu çalışmanın temel kısıtlılıklarından biri birinci kattaki bazı mekânlara erişim sağlanamamış olmasıdır. Mekanlara erişilemediği için çatlak ölçümleri tamamlanamamıştır. Ayrıca koridor gibi taban alanı ve hacim oranı büyük alanların test edilmesi de söz konusu olamamıştır. Bu tip alanların test edilmesinde birden fazla fan basınçlandırma test ekipmanı kullanılması gerekmektedir. Elde edilen veriler sonucunda Mimarlık Bölümü M2 blok sızdırmazlık ortalama değeri (güney yönlenmeli 24 hacim üzerinde) 11,48 ACH@50Pa olarak saptanmıştır ve bu sızdırmazlık değeri uluslararası standartlarca *ileri düzeyde sızdıran* binaya karşılık gelmektedir. Binanın enerji performansı bakımından sızdırmazlık düzeylerinin iyileştirilmesi iç mekân konfor koşullarını ve tüketim profillerini olumlu yönde etkileyecektir. Sonraki çalışmalar, bu çalışmanın kısıtlılıklarını da ortadan kaldırarak daha bütüncül bir yöntem önerisi kuracak şekilde yürütülebilir. Farklı binalarda yürütülecek benzer yöntemler aracılığıyla, kompartıman ölçümleri aracılığıyla tüm bina sızdırmazlık değerlerinin saptanmasına ilişkin bir veri tabanı oluşturmak da bina enerji performansı çalışmaları bakımından oldukça yararlı olabilecektir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- ABAA, 2016, Air Barrier Association of America: Standard Method for Building Enclosure Airtightness Compliance Testing.
- Alfano, Dell’Isola, Ficco, Palella ve Riccio, 2016 , “Experimental Air-Tightness Analysis in Mediterranean Buildings after Windows Retrofit”, Sustainability.
- Alfano, Dell’Isola, Ficco ve Tassini, 2012, “Experimental analysis of air tightness in Mediterranean buildings using the fan pressurization method”, Building and Environment.
- Almeida, Ramos ve Pereira , 2017 , “A contribution for the quantification of the influence of windows on the airtightness of Southern European buildings”, Energy and Buildings 139.
- Almeida, Barreira ve Moreira, 2020 , “A Discussion Regarding the Measurement of Ventilation Rates Using Tracer Gas and Decay Technique”, infrastructures.
- Ambrose and Syme, 2017, “Air tightness of new Australian residential buildings”, Procedia Engineering 180.
- ANSI/ASHRAE/IESNA. 2007. ANSI/ASHRAE/IESNA 90.1-2007, Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia.
- ANSI/ASHRAE/IES. 2010. ANSI/ASHRAE/IES 90.1-2010, Energy Standard for Buildings Except LowRise Residential Buildings. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia.ASHRAE 1478-RP 2013.
- Bae, Moon, Lee, Kim ve Ryou, 2013 “Improvement in the applicability of the airtightness measurement using a sudden expansion of compressed air”, Building and Environment 61, ss.133–139.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Barrera, Almeida ve Moreira , 2017 , “An infrared thermography passive approach to assess the effect of leakage points in building”, Energy and Buildings 140.
- Baumler ve Müller, 2014, “Experimental study on the tightness of glazing bead butt joints of aluminium windows considering comfort aspects”.
- Bielek, Szabo, Curpek, Suchanek ve Panacek, 2020 , “Infrared thermography diagnostics of air permeability through building openings - Assessment of its reliability”, Sciendo.
- Bist ve Apte, “Measuring Infiltration Rates & Leakage in residential buildings of Ahmedabad Using Blower Door Method”.
- Bobadilla, Diaz, Figueroa ve Arriagada, 2014, “Proposal of Acceptable Air Tightness Classes for Buildings in Chile” Construction.
- Bohac, 2016 “Leakage Reductions for Large Building Air Sealing”, International Journal of Ventilation”.
- BKC, (2021). Tight is Good, but Ventilation is Critical: Putting Tightness to the Test, Erişim adresi: <https://guides.co/g/putting-tightness-to-the-test/157602>, Erişim Tarihi: Haziran 2021.
- Bracke, Laverge, Bossch ve Janssens, 2016, “Durability and Measurement Uncertainty of Airtightness in Extremely Airtight Dwellings”, International Journal of Ventilation,14:4, 383-394.
- Brager, Alspach ve Nall, 2011, “Natural vs. Mechanical Ventilation and Cooling”.
- Bramiana, Entrop ve Halman, 2016, “Relationships between building characteristics and airtightness of Dutch dwellings” , Energy Procedia 96, ss.580-591.
- Brinks, Kornadt ve Oly, 2015, “Air infiltration assessment for industrial buildings”, Energy and Buildings 86.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Brojan, Weil ve Clouston, 2016, “Air tightness of straw bale construction” Green Building.
- Caffey , 1979, “Residential Air Infiltration”.
- Casado, 2020. , “Residential buildings airtightness frameworks: A review on the main databases and setups in Europe and North America”, Building and Environment 192.
- Chan, Joh ve Sherman, 2013, “Analysis of airleakage measurements of US houses” Energy and Buildings 66, ss.616-625.
- Climaplus, 2021, <http://climaplusbeta.com/> , Erişim Tarihi: 27.05.2021.
- Colijn, Entrop ve Toxopeus, 2017 , “Evaluating the effectiveness of improved workmanship quality on the airtightness of Dutch detached houses”, Energy Procedia 132.
- Crawley, Wingfield ve Elwell, 2019 “The relationship between airtightness and ventilation in new UK dwellings”, Building Services Engineering Research and Technology 41.
- Crawley, 2019, “Inferring the as-built air permeability of new UK dwellings”.
- Cuce, 2017, “Role of airtightness in energy loss from Windows:Experimental results from in-situ tests” , Energy and Buildings 129.
- Deng, Yang ve Zhang, 2012, “Key factor analysis of VOC sorption and its impact on indoor concentrations: The role of ventilation”, Building and Environment 47, ss.182-187.
- Dominguez-Amarillo, Fernandez-Agüera, Campano ve Acosta, 2019 , “Effect of Airtightness on Thermal Loads in Legacy Low-Income Housing”, Energies.
- Dominguez-Amarillo, Fernandez-Agüera, Cesteros-Garcia ve Gonzalez-Lezcano, 2020, “Bad Air Can Also Kill: Residential Indoor Air Quality and Pollutant Exposure Risk during the COVID-19 Crisis”, Environmental Research and Public Health.
- EPA , 1991, “Indoor Air Facts No. 4 Sick Building Syndrome”.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Etheridge, 2011, “Natural Ventilation of Buildings”, John Wiley & Sons.

Etheridge, 2015, “A perspective on fifty years of natural ventilation research”, Building and Environment 91, ss. 51-60.

Feijo-Munoz, Gonzalez-Lezcano, Poza-Casado, 2019 ,“Airtightness of residential buildings in the Continental area of Spain”, Building and Environment 148.

Feijo-Munoz, Gonzalez-Lezcano, Poza-Casado, 2018, “Methodology for the Study of the Envelope Airtightness of Residential Buildings in Spain:A Case Study”, Energies.

Fernandez-Agüera, Sendra, Dominguez-Amarillo, 2011 , “Protocols for measuring the airtightness of multi-dwelling units in Southern Europe, Procedia Engineering 21.

Fernandez-Agüera, Dominguez-Amarillo, Sendra, 2016 , “An approach to modelling envelope airtightness in multi-family social housing in Mediterranean Europe based on the situation in Spain” , Energy and Buildings 128.

Fernandez-Agüera, Dominguez-Amarillo, 2019 , “Characterising Draught in Mediterranean Multifamily Housing”, Sustainability.

Fernandez-Agüera, Dominguez-Amarillo, Sendra, 2019 , “Social housing airtightness in Southern Europe”, Energy&Buildings 183.

Fernandez-Agüera, Dominguez-Amarillo, Sendra, 2019, “Predictive models for airtightness in social housing in a Mediterranean region”, Sustainable Cities and Society.

Fine , Gray, Tian, Touchie, 2020 , “An investigation of alternative methods for determining envelope airtightness from suite-based testing in multi-unit residential buildings”, Energy & Buildings.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Galaj ve Saleta , 2020 , “Impact of Apartment Tightness on Temperature Variability during a Fire”, Environmental Research and Public Health.
- Galaj ve Saleta, 2020, “Impact of Apartment Tightness on the Concentrations of Toxic Gases Emitted During a Fire”, Sustainability.
- Ghazi and Marshall, 2014, “A CO₂ tracergas method for local airleakage detection and characterization” ,Flow Measurement and Instrumentation 38, ss.72-81.
- Gillot, Loveday, White, Wood, 2016 , “Improving the airtightness in an existing UK dwelling The challenges, the measures and their effectiveness”, Building and Environment 95.
- Gupta ve Kotopouleas, 2018, “Magnitude and extent of building fabric thermal performance gap in UK low energy housing”, Applied Energy 222.
- Harrje, “Building Dynamics and Indoor Air Quality”.
- Heim, Mischczuk, 2020, “Modelling building infiltration using the airflow network model approach calibrated by air-tightness test results and leak detection”, Building Services Engineering Research and Technology 41.
- Hernandez, Wallis, Graves, Narain, 2020, “The effect of ventilation on volatile organic compounds produced by new furnishings in residential buildings”, Atmospheric Environment:X Vol 6.
- Hong and Kim, 2016, “Field measurements of infiltration rate in high rise residential buildings using the constant concentration method”, Building and Environment 97.
- Hong ve Kim, 2018, “Airtightness of electrical, mechanical and architectural components in South Korean apartment buildings using the fan pressurization and tracer gas method”, Building and Environment.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ipbuker , 2014 , “Uncertainty evaluation of single-point fan pressurization measurements for calm and assumed windy conditions”.
- Jackman, 1974, “Heat loss in buildings as a results of infiltration”, Environmental Temperature Symposium: Third Paper.
- Ji, Duanmu, Dong, 2020, “Air infiltration rate of typical zones of public buildings under natural conditions”.
- Ji ve Duanmu, 2017, “Airtightness field tests of residential buildings in Dalian, China”, Building and Environment 119.
- Ji, Duanmu ve Li, , 2017, “Building air leakage analysis for individual apartments in North China”, Building and Environment 122.
- Jokisalo, Kurnitski, Korpi, 2009, “Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for Finnish detached houses”, Building and Environment 44, ss.377-387.
- Joshi,2008, The Sick Building Syndrome, Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine, Vol. 12(2), ss. 61–64.
- Kalamees, Alev, Parnalaas, 2017 , “Air leakage levels in timber frame building envelope joints”, Building and Environment 116.
- Kalmar ve Kalmar, 2021, “Investigation of natural aeration in home offices during the heating season”, Building Engineering 35.
- Kauppinen ve Siikanen, 2011, “Improvement of Energy Efficiency the use of thermography and airtightness test in verification of thermal performance of school”.
- Khemet ve Richman, 2018, “A univariate and multiple linear regression analysis on a national fan (de) Pressurization testing database to predict airtightness in houses”, Building and Environment 146.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kraus ve Kubeckova, 2013, “Airtightness of Energy Efficient Buildings” , GSTF International Journal of Engineering Technology (JET) Vol.2 No.2.
- Kraus ve Kubeckova, 2014 “Airtightness of Energy Efficient Buildings”.
- Kronvall, “Correlatting pressurization and Infiltration rate data - tests of an heuristic model”, Lund Institute of Technology Sweden.
- Krstic, Otkovic, Kosinski, Wojcik, 2016 , “Validation of neural network model for predicting airtightness of residential and non-residential units in Poland”, Energy and Buildings 133.
- Lai, Ridley, Brimblecombe, 2020, “Blower-door estimates of PM_{2.5} deposition rates and penetration factors in an idealized room”, Indoor and Built Environment.
- Laine, 2020, “Pressure difference in buildings with good air-tightness control measurements after IAQ renovations”, E3S Web of Conferences 172.
- Laverge, Delghust, 2016 ,“Airtightness Assessment of Single Family Houses in Belgium”, International Journal of Ventilation.
- Lawton, M. 2017. Airtightness in Buildings: A Canadian History, Erişim Adresi: <http://bcbec.com/wp-content/uploads/2018/03/2017.06.21-APEGBC-Airtightness-in-Buildings-Seminar-Airtightness-in-Buildings-A-Canadian-History-1.pdf>. Erişim Tarihi: şubat 2021
- Leprince, Moujalled ve Litvak, 2017, “Durability of building airtightness, review and analysis of existing studies”.
- Love, Wingfield, Smith, Biddulp, 2017, “Hitting the target and missing the point:Analysis of air permeability data for new UK dwellings and what it reveals about the testing procedure”, Energy and Buildings 155.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lee, Kim, Ryou, 2011, “Airtightness measurement with transient methods using sudden expansion from a compressed chamber”, Building and Environment 46, ss.1937-1945.
- Martin Garin, Millan Garcia, Betanzos, 2020, “Airtightness Analysis of the Built Heritage-Field Measurements of Nineteenth Century Buildings through Blower Door Tests”, Energies.
- McLauchlan, Gomis, Cooper, 2017 , “Impact of a Pilot Draught Sealing Program on Public Housing Air Permeability” , Energy Procedia 121.Meiss, 2015, “The energy impact of infiltration a study on buildings located in north central Spain”, Energy Efficiency.
- Melois, Moujalled, Guyod, Leprince, 2019 , “Improving building envelope knowledge from analysis of 219,000 certified on-site air leakage measurements in France”, Building and Environment 159.
- Meng, Wang, Xing, Xu, 2020, “Experimental study on the performance of hybrid buoyancy-driven natural ventilation with a mechanical exhaust system in an industrial building”, Energy and Buildings 208.
- Minneapolis Blower Door Operation Manual for Model 3 and Model 4 Systems.
- Miszczuk, 2016 , “The level of airtightness in energy-efficient single-family houses in Poland”, Procedia Engineering 153.
- Miszczuk, 2017, “Influence of air tightness of the building on its energy efficiency in single-family buildings in Poland”, MATEC Web of Conferences 117.
- Miszczuk, 2018, “The influence of construction and material solutions on the level of air tightness in single energy buildings”, MATEC Web of Conferences 196.
- Model 3 Minneapolis Blower Door System.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Montoya, Pastor, Carrie, Guyot, Planas, 2010, “Air leakage in Catalan dwellings: Developing an airtightness model and leakage airflow predictions”, Building and Environment 45, ss. 1458-1496.
- Moon, Sohn ve Hwang, “Indoor Air Quality Performance of Ventilation Systems in Classrooms”, Journal of Asian Architecture and Buildings Engineering, 2018.
- Nabinger ve Persily, 2011, “Impacts of airtightening retrofits on ventilation rates and energy consumption in a manufactured home”, Energy and Buildings 43, ss. 3059–3067.
- Pan, 2010, “Relationships between air-tightness and its influencing factors of post-2006 new-build dwellings in the UK”, Building and Environment 45, ss. 2387-2399.
- Passarelli, 2009, “Sick building syndrome: An overview to raise awareness” Journal of Building Appraisal Vol. 5,1, 55–66.
- Passivehouse, (2021a). List of airtightness systems, Erişim adresi: https://database.passivehouse.com/en/components/list/airtightness_system, Erişim Tarihi: Haziran 2021.
- (Passivehouse, (2021b), Passivehaus Institut, Erişim adresi: https://passivehouse.com/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm Erişim Tarihi: Haziran 2021.
- Pereira, Ramos, Almeida, Simoes, 2017 , “Occupant influence on residential ventilation patterns in mild climate conditions”, Energy Procedia 132.
- Perez-Lombard, Ortiz ve Pout, 2008, “A review on buildings energy consumption information”, Energy and Buildings 40, ss.394-398.
- Perina, 2014 “The Windows in the Modular Structure - Air Tightness and Quality of Installation Diagnostics”, Advanced Materials Research.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Prignon, Dawans, Altomonte, 2019. , “A method to quantify uncertainties in airtightness measurements: Zero-flow and envelope pressure”, Energy&Buildings.
- Prignon ve Van Moeske, 2017, “Factors influencing airtightness and airtightness predictive models : A literature review”, Energy and Buildings 146 , ss 87-97.
- Redlich, Sparer and Cullen, , 1997 “Sick Building Syndrome”, The Lancet Vol 349.
- Reinhart, C., 2018, Lecture Notes: Ventilation, Erişim adresi: https://ocw.mit.edu/courses/architecture/4-401-environmental-technologies-in-buildings-fall-2018/lecture-slides-1/MIT4_401F18_lec15.pdf, Erişim tarihi: 18 Aralık 2020
- Ren ve Chen, 2014, “Estimation of air infiltration for Australian housing energy analysis”, Building Physics.
- Rodrigues, Tubelo, Vega Pasos, 2020 , “Quantifying airtightness in Brazilian residential buildings with focus on its contribution to thermal comfort”, Building Research&Information.
- Rodriguez, 2018 , “Influence of infiltrations in the energy retrofit of the envelope. A case study from the action plans in the public housing stock of Andalusia”.
- Rodriguez-Ubinas, Montero, Porteros, Vega, 2014, “Passive design strategies and performance of Net Energy Plus Houses” Energy and Buildings 83, ss.10-22.
- Rösch, Kohajda, Röder, 2014, “Relationship between sources and patterns of VOCs in indoor air”, Atmospheric Pollution Research 5, ss.129-137.
- Ruparathna, Hewage ve Sadiq, 2016, “Improving the energy efficiency of the existing buildingstock: A critical review of commercial and institutional buildings”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 53, ss.1032-1045.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Šadauskienė, Seduikyte, 2016, “The role of air tightness in assessment of building energy performance : Case study of Lithuania”, *Energy for Sustainable Development* 32, ss. 31-39.
- Salehi, Torres and Ramos, 2017, “Experimental analysis of building airtightness intraditional residential Portuguese buildings”, *Energy and Building* 151, ss. 198-205.
- Schulze ve Eicker, 2013, “Controlled natural ventilation for energy efficient buildings”, *Energy and Buildings* 56, ss. 221-232.
- Sherman and Chan ,2004, “Building Airtightness: Research and Practice”.
- Sherman and Palmiter, 1995, “Uncertainties in fan pressurization measurements”.
- Sherman, 1980, “Air infiltration in buildings”.
- Sherman, 1995, “The Use of Blower-Door Data”, *Indoor Air*, ss.215-224.
- Sherman, 1998, “The use of blower-door data”.
- Shi, Chen and Zhao, 2015, “Air infiltration rate distributions of residences in Beijing” *Building and Environment* 92.
- Shrestha, Humphrey, Barton, Carlton, 2019 , “Impact of Low-Income Home Energy-Efficiency Retrofits on Building Air Tightness and Healthy Home Indicators”, *Sustainability*.
- Sinnot ve Dyer, 2012, “Air-tightness field data for dwellings in Ireland”, *Building and Environment*.
- Sinnott, 2016, “Dwelling airtightness: A socio- technical evalution in an Irish context”, *Building and Environment* 95.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Srba, Böhm, Berankova, Trgala, 2016, “Estimation of Air Leakage Rate Of Wood-Based Residential Buildings Constructed in the Czech Republic in the Years 2006-2014 Using Blower Door Test” , Wood Research.
- Stolwijk, 1991 ,“Sick Building Syndrome”, Environmental Health Perspectives Vol.95, ss. 99-10.
- Takewaki, 2020 ,“New Architectural Viewpoint for Enhancing Society’s Resilience for Multiple Risks Including Emerging COVID-19”, Frontiers in Built Environment Vol 6.
- Taleb, 2015, “Natural ventilation as energy efficient solution for achieving low-energy houses in Dubai”, Energy and Buildings 99, ss. 284-291.
- Tanasa , 2016 , “Air Tightness Measurements for Energy Efficient Residential House Using the Blower Door Procedure”.
- Tanyer, Tavukçuoğlu, Bekboliev, 2018, “Assessing the airtightness performance of container houses in relation to its effect on energy efficiency”.
- TEC, 2017b, Using Flow Rings C, D and E, Erişim adresi: <http://energyconservatory.com/wp-content/uploads/2017/08/Using-Flow-Rings-C-D-and-E.pdf> Erişim tarihi: Mayıs 2021
- TEC, (2017). Model 3 Minneapolis Blower Door: Test Results and Sample Test Forms, Erişim adresi: <https://energyconservatory.com/wp-content/uploads/2017/08/Test-Results-and-Sample-Test-Forms-Guide-.pdf>, Erişim Tarihi: Haziran 2021.
- TEC, (2012), The Energy Conservatory: Minneapolis Blower Door Operation Manual for Model 3 and Model 4 Systems. Erişim Adresi: <https://www.oregon.gov/ohcs/energy-weatherization/Documents/Train-Tech-Assist/operations-manual-minneapolis-blower-door.pdf>. Erişim Tarihi: Şubat 2021.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- TEC, (2020a), The Energy Conservatory: Model 3 Minneapolis Blower Door System. Erişim Adresi: <http://energyconservatory.com/wp-content/uploads/2017/08/Blower-Door-Manual.pdf>. Erişim Tarihi: Şubat 2021.
- TEC, (2020b), Multifamily Air Leakage: Test Methods and Results, Erişim adresi: <https://minnesotapower.blob.core.windows.net/content/Content/Documents/EnergyDesignConference/PresentationMaterials/2020/Day2/Multifamily%20Air%20Leakage.pdf>, Erişim tarihi: Mart 2021
- TEC, 2021, Options for blower door testing of multifamily buildings, Erişim adresi: <https://energyconservatory.com/wp-content/uploads/2015/01/General-Guarded-Blower-Door-Testing-Guidance.pdf> Erişim tarihi: Şubat, 2021
- Tiberio ve Branchi, 2013, “A study of air leakage in residential buildings”.
- Urquhart, Richman ve Finch, 2015, “The effect of an enclosure retrofit on air leakage rates for a multi-unit residential case-study building”, Energy and Buildings 86.
- US DOE, (2012), Building Technologies Program: Air Leakage Guide. Erişim adresi: https://www.energycodes.gov/sites/default/files/documents/BECB_Building%20Energy%20Code%20Resource%20Guide%20Air%20Leakage%20Guide_Sept2011_v00_lores.pdf, Erişim tarihi: Haziran 2021.
- Villi, Peretti, Graci, Carli, 2012 , “Building leakage analysis and infiltration modelling for an Italian multi family building” ,Journal of Building Performance Simulation.
- Walker ve Sherman, 2013, “Applying Large Datasets to Developing a Better Understanding of Air Leakage Measurement in Homes”, International Journal of Ventilation.
- Wanyu R. Chan, Jeffrey Joh., Max H. Sherman, 2013, “Analysis of air leakage measurements of US houses”, Energy and Building 66, ss. 616-625.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Wei Pan, 2010, “Relationships between air-tightness and its influencing factors of post-2006 new-build dwellings in the UK”, Building and Environment 45.
- Wojcik ve Kosinski, 2015, “Seeming air tightness of construction partitions”, Energy Procedia 78.
- Yongming ve Duanmu, 2016, “Air-tightness test and air infiltration estimation of an ultra-low energy building”, Science and Technology for the Built Environment.
- Younes, Shdid, 2011, “Air infiltration through building envelopes: A review”, Building Physics.
- Zhang, Yang, Tam, Tao, vd. , 2021, “A critical review of combined natural ventilation techniques in sustainable buildings” , Renewable and Sustainable Energy Reviews 141.
- Zheng, Cooper, Wood, 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.