

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MİMARLIK ANABİLİM DALI



ÇİFT KABUK CEPHE KURULUŞLARININ ISITMA-SOĞUTMA
YÜKLERİ BAĞLAMINDA İNCELENMESİ

HANDE HİLAL ÜN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. Türkan GÖKSAL ÖZBALTA (Tez Danışmanı)**
 Prof. Dr. Yusuf YILDIZ
 Dr. Öğr. Üyesi Dinçer AYDIN

BALIKESİR, ŞUBAT - 2025

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Çift Kabuk Cephe Kuruluşlarının Isıtma-Soğutma Yükleri Bağlamında İncelenmesi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Hande Hilal ÜN

ÖZET

**ÇİFT KABUK CEPHE KURULUŞLARININ ISITMA-SOĞUTMA YÜKLERİ
BAĞLAMINDA İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
HANDE HİLAL ÜN
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MİMARLIK ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. TÜRKAN GÖKSAL ÖZBALTA)**

BALIKESİR, ŞUBAT - 2025

İklim değişikliğinin tetiklediği enerji krizi, bina sektöründe enerji verimliliğini öncelikli bir konu haline getirmiştir. Binalar, küresel enerji talebinin %34'ünü oluşturmakta ve enerji tüketimine bağlı CO₂ emisyonlarının %37'sinden sorumlu tutulmaktadır. Bu tüketimin büyük bir kısmı, binaların işletim sürecinde gerçekleşmektedir. Artan enerji talebi ve karbon salımları, sürdürülebilirlik hedeflerini zorunlu kılarken, Avrupa Birliği'nin net sıfır karbon stratejileri doğrultusunda enerji etkin cephe tasarımları bina sektöründe önemli bir çözüm sunmaktadır. Özellikle ofis binalarında yaygınlaşan çift kabuk cephe (ÇKC) sistemleri, doğru tasarım kararları ile ısıtma ve soğutma yüklerini azaltarak iç mekân konforunu artırmaktadır.

Bu çalışmada, ısıtma/soğutma yüklerinin azalmasına katkı sağlayacak çift kabuk cephe tasarımının belirlenmesi amaçlanmıştır. Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsü'nde yer alan mevcut bir ofis binası alan çalışması olarak seçilmiş; mevcut tek kabuk cephe sistemi ile farklı ÇKC kuruluşları DesignBuilder programı ile modellenmiştir. Modellemelerde dört farklı parametre (cam türü, boşluk genişliği, havalandırma türü ve yönlenme) dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar mevcut durum ile karşılaştırılarak irdelenmiş; tasarım parametrelerinin enerji tüketimi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

Sonuç olarak, 80 cm boşluk genişliğine sahip, low-e cam, mevcut yönlenme ve doğal havalandırma parametrelerinden oluşan ÇKC kuruluşu, mevcut duruma kıyasla ısıtma enerjisi gereksiniminde %50,7 oranında azalma hesaplanmıştır. Soğutma yüklerinde ise 80 cm boşluk genişliği, elektrokromik cam, kuzey-güney yönlenme ve doğal havalandırma ile %33,64'lük bir düşüş kaydedilmiştir. 80-EC-KG-DH ÇKC kuruluşu, yıllık toplam enerji tüketiminde mevcut duruma kıyasla %43,89 oranında azalma sağlayarak en etkin çift kabuk cephe kuruluşu olarak tespit edilmiştir. Bu çalışma, ÇKC sistemlerinde boşluk genişliği, cam türü, yönlenme ve havalandırma türü parametrelerinin enerji performansı üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymuştur.

ANAHTAR KELİMELELER: Çift kabuk cephe, ısıtma-soğutma yükleri, designbuilder, enerji etkin cephe, ofis binaları, enerji tasarrufu, bina enerji simülasyonu

Bilim Kod / Kodları : 80130

Sayfa Sayısı : 131

ABSTRACT

EVALUATION OF DOUBLE-SKIN FAÇADE SYSTEMS IN THE CONTEXT OF HEATING AND COOLING LOADS

MSC THESIS

HANDE HİLAL ÜN

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

ARCHITECTURE

(SUPERVISOR: PROF. DR. TÜRKAN GÖKSAL ÖZBALTA)

BALIKESİR, FEBRUARY - 2025

Climate change-induced energy crises have prioritized energy efficiency in the building sector, which accounts for 34% of global energy demand and 37% of energy-related CO₂ emissions. A significant portion of this consumption occurs during building operation. The escalating energy demand and carbon emissions necessitate the pursuit of sustainable solutions, with energy-efficient facade systems emerging as critical under the EU's net-zero carbon strategies. Double-skin facades (DSFs), increasingly adopted in office buildings, reduce heating/cooling loads and enhance indoor comfort through optimized design strategies.

This study aims to determine the optimal DSF design that contributes to reducing heating/cooling loads. An existing office building at Balıkesir University Çağış Campus was selected as a case study. Both the current single-skin facade system and various DSF configurations were modeled using the DesignBuilder program. Four design parameters—glazing type, cavity width, ventilation strategy, and orientation—were considered in the simulations. The findings were compared with the current situation, and the effects of the design parameters on energy consumption were analyzed.

The results indicate that the DSF configuration, which integrates an 80 cm cavity width, low-e glass, northwest-southeast orientation, and natural ventilation, reduced heating energy demand by 50.7% relative to the baseline condition. Regarding cooling loads, an 80 cm cavity with electrochromic glass, a north-south orientation, and natural ventilation achieved a 33.64% reduction. Overall, the most effective DSF system 80-EC-KG-DH DSF decreased annual total energy consumption by 43.89%. This study underscores the decisive role of cavity width, glazing type, orientation, and ventilation strategies in DSF energy performance.

KEYWORDS: Double-skin facade, heating-cooling loads, designbuilder, energy-efficient facade, office buildings, energy savings, building energy simulation

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|--|------------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| İÇİNDEKİLER | iii |
| ŞEKİL LİSTESİ | v |
| SEMBOL LİSTESİ | ix |
| KISALTMA LİSTESİ | x |
| ÖNSÖZ | xi |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1 Çalışmanın Amacı..... | 3 |
| 1.2 Çalışmanın Kapsamı | 4 |
| 1.3 Çalışmanın Yöntemi | 4 |
| 2. LİTERATÜR TARAMASI | 6 |
| 2.1 İklim Değişikliği ile Mücadele, Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ve Binalar..... | 6 |
| 2.2 Enerji Etkin Cephe Tasarımı ve Kuruluşları..... | 8 |
| 2.3 Cephe Kuruluşunun Enerji Tüketimine Etkisi..... | 12 |
| 2.4 Çift Kabuk Cepheler | 15 |
| 2.4.1 Çift Kabuk Cephelerin Tarihçesi | 18 |
| 2.4.2 Çift Kabuk Cephelerin Çalışma İlkeleri..... | 30 |
| 2.4.3 Çift Kabuk Cephelerin Sınıflandırılması | 32 |
| 2.4.3.1 Boşluk Havalandırma Türüne Göre Çift Kabuk Cepheler | 33 |
| 2.4.3.2 Boşluğun Bölümlendirilmesine Göre Çift Kabuk Cepheler..... | 34 |
| 2.4.3.3 Boşluktaki Hava Akış Moduna Göre Çift Kabuk Cepheler | 37 |
| 2.4.4 Çift Kabuk Cephelerin Enerji Performansına Etkisi..... | 39 |
| 3. ALAN ÇALIŞMASI | 47 |
| 3.1 Alan Çalışmasında İncelenen Mevcut Binaya İlişkin Veriler..... | 50 |
| 3.2 Örnek Binaya ait Cephe Tasarımı ve Detayları | 56 |
| 3.3 Balıkesir İçin İklim Koşulları | 59 |
| 3.4 Çift Kabuk Cephe Kuruluşu Tasarımlarının Belirlenmesi..... | 61 |
| 3.5 Bina Simülasyon Modelinin Kalibrasyonu | 66 |
| 4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ | 70 |
| 4.1 Mevcut Binanın Yıllık Isıtma ve Soğutma Yüklerinin Hesaplanması..... | 70 |
| 4.2 Çift Kabuk Cephe Tasarım Parametrelerinin Isıtma ve Soğutma Yükleri Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi | 73 |
| 4.2.1 50 cm Boşluk Genişliğine Sahip Çift Kabuk Cephe Kuruluşlarının Analizi..... | 73 |
| 4.2.2 80 cm Boşluk Genişliğine Sahip Çift Kabuk Cephe Kuruluşlarının Analizi..... | 80 |
| 4.2.4 100 cm Boşluk Genişliğine Sahip Çift Kabuk Cephe Kuruluşlarının Analizi..... | 84 |
| 5. SONUÇLAR | 89 |
| 6. KAYNAKLAR | 101 |
| EKLER | 121 |
| EK A: 50-EC sabit parametresine sahip ÇKC kuruluşlarının enerji tüketimleri..... | 121 |
| EK B: 50-TC sabit parametresine sahip ÇKC kuruluşlarının enerji tüketimleri..... | 122 |
| EK C: 50-REF sabit parametresine sahip ÇKC kuruluşlarının enerji tüketimleri..... | 123 |

| | |
|--|-----|
| EK D: 80-LOW sabit parametresine sahip KC kuruluşlarının enerji tüketimleri..... | 124 |
| EK E: 80-EC sabit parametresine sahip KC kuruluşlarının enerji tüketimleri. | 125 |
| EK F: 80-TC sabit parametresine sahip KC kuruluşlarının enerji tüketimleri. | 126 |
| EK G: 80-REF sabit parametresine sahip KC kuruluşlarının enerji tüketimleri. | 127 |
| EK H: 100-LOW sabit parametresine sahip KC kuruluşlarının enerji tüketimleri..... | 128 |
| EK J: 100-EC sabit parametresine sahip KC kuruluşlarının enerji tüketimleri..... | 129 |
| EK K: 100-TC sabit parametresine sahip KC kuruluşlarının enerji tüketimleri..... | 130 |
| EK L: 100-REF sabit parametresine sahip KC kuruluşlarının enerji tüketimleri..... | 131 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 1.1: Enerji tüketiminin sektörlere göre dağılımı..... | 1 |
| Şekil 1.2: Cephe sistemlerinin enerji verimliliği açısından gelişim süreci..... | 3 |
| Şekil 1.4: Çalışmanın akış şeması..... | 5 |
| Şekil 2.1: İklim değişikliği ile ilgili uluslararası eylemlerin kronolojik zaman çizelgesi..... | 6 |
| Şekil 2.2: Sürdürülebilir kalkınma amaçları..... | 8 |
| Şekil 2.3: Enerji verimli ve düşük karbon ayak izine sahip yapısal tasarım yaklaşımlarının birbirleriyle olan ilişkisi..... | 9 |
| Şekil 2.4: Cephe tasarım parametreleri ile enerji etkin cephe arasındaki ilişkisi..... | 11 |
| Şekil 2.5: Cephe ile enerji tüketiminin doğrudan ilişkisi..... | 13 |
| Şekil 2.6: Yapı kabuğunun konstrüktif parametrelere göre sınıflandırılması..... | 15 |
| Şekil 2.7: Çift kabuk cephelerin avantaj yüzdeleri..... | 17 |
| Şekil 2.8: Çift kabuk cephelerin dezavantaj yüzdeleri..... | 17 |
| Şekil 2.9: Çift kabuk cephelerin tarihsel gelişimi ve farklı dönemlerdeki öncelikleri..... | 18 |
| Şekil 2.10: Mısır’da bulunan Suhaymi; Japonya, Fukiya köyündeki Katayama tampon bölgesi konut müzeleri..... | 18 |
| Şekil 2.11: Edward Morse’un ilk trombe duvar çizimi..... | 19 |
| Şekil 2.12: Steiff Fabrikası’nın bugünkü hali ve cephe kısmi kesiti..... | 20 |
| Şekil 2.13: Post Office Savings Bank binası çift kabuk çatı ışıklığı..... | 20 |
| Şekil 2.14: Corbusier’in Centrosoyuz binası çizimi ve görünüşü..... | 21 |
| Şekil 2.15: İngiliz Şeker Firması binası cephesi..... | 21 |
| Şekil 2.16: Occidental Kimya Merkezi, ısı bölgeleme, ofis binası görünüşü ve çift kabuk cephe sistemi havalandırma şeması..... | 22 |
| Şekil 2.17: Rogers ve Davis’in Polyvalent Cephe’si..... | 22 |
| Şekil 2.18: Commerzbank binasının görünüşü, cephe aksonometrik çizimi, cephe plan (a) ve kesiti (b)..... | 23 |
| Şekil 2.19: Fotonik Merkezi’nin cephesi ve hava akışını gösteren görünüş ve kesitler..... | 23 |
| Şekil 2.20: Homeostatik cephenin minimum, orta ve maksimum gölgelendirme etkisi ve homeostatik kaplı bina cephesi..... | 24 |
| Şekil 2.21: One Angel Square görünüşü ve binanın kesiti..... | 24 |
| Şekil 2.22: Monarch Sanctuary, diagrig yapısı ve cephe tasarımına yönelik görselleştirmeleri..... | 25 |
| Şekil 2.23: Çift kabuk cephe sisteminin bileşenleri ve konsept şeması..... | 30 |
| Şekil 2.24: Havalandırmasız ve havalandırmalı çift kabuk cephenin şematik gösterimi..... | 31 |
| Şekil 2.25: Çift kabuk cephelerin iklim koşullarına göre havalandırma prensipleri..... | 32 |
| Şekil 2.26: Çift kabuk cephelerin üç ana başlıkta sınıflandırılması ve şematik gösterimi..... | 33 |
| Şekil 3.1: Bir ofis binasındaki tipik enerji tüketimi ve HVAC dağılımı..... | 47 |
| Şekil 3.2: Çift kabuk cephe sistemlerinin en yaygın uygulandığı bina türleri ve konumlandırıldığı cepheler..... | 48 |
| Şekil 3.3: Simülasyon sürecinin işleyiş biçimi..... | 49 |
| Şekil 3.4: Örnek ofis binasının Balıkesir ilindeki konumu..... | 50 |
| Şekil 3.5: BAÜN Çağış yerleşke krokisi ve örnek ofis binasının konumu..... | 51 |
| Şekil 3.6: Örnek binaya ait kat planları..... | 53 |
| Şekil 3.7: Ofis mekânı ve kat koridoru..... | 54 |
| Şekil 3.8: Benzetim programında çizilen kat planları ve ısı bölgelemeler..... | 55 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 3.9: DesignBuilder programında çizilen mevcut binanın üç boyutlu simülasyon modelleri..... | 55 |
| Şekil 3.10: Örnek binanın alüminyum giydirme cephesine ait görünüş ve kesiti..... | 56 |
| Şekil 3.11: Örnek binanın cephe sistem detay planı..... | 57 |
| Şekil 3.12: Mekanik montaj traverten kaplama nokta detayı 1/5..... | 57 |
| Şekil 3.13: Balıkesir iline ait son 30 yıllık ortalama iklimsel veriler..... | 60 |
| Şekil 3.14: TS 825'e göre derece gün bölgeleri..... | 60 |
| Şekil 3.15: Elektrokromik cam katmanları..... | 64 |
| Şekil 3.16: Elektrokromik camın üç farklı durumdaki saydamlık düzeyleri ve kullanıcı gereksinimlerine göre modüllerdeki değişim..... | 64 |
| Şekil 3.17: Termokromik camın ısıtılmadan önce ve ısıtıldıktan sonra normal ve termografik görünümleri ile farklı şeffaflık düzeyleri..... | 65 |
| Şekil 3.18: Örnek ofis binasına ait 2024 yılı gerçek ve simülasyon enerji tüketimleri..... | 69 |
| Şekil 4.1: Örnek binada çift kabuk cephe uygulanan yüzeyler..... | 70 |
| Şekil 4.2: Örnek ofis binasının yıllık toplam ısıtma/soğutma yükleri..... | 71 |
| Şekil 4.3: Örnek ofis binasının bir yıllık ısıtma/soğutma yüklerinin aylara dağılımı..... | 72 |
| Şekil 4.4: 50-LOW ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri..... | 73 |
| Şekil 4.5: 50-LOW sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı..... | 74 |
| Şekil 4.6: 50-LOW sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşunun soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı..... | 75 |
| Şekil 4.7: 50-EC ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri..... | 76 |
| Şekil 4.8: 50-TC ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri..... | 77 |
| Şekil 4.9: 50-REF ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri..... | 79 |
| Şekil 4.10: 80-LOW ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri..... | 80 |
| Şekil 4.11: 80-EC ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri..... | 81 |
| Şekil 4.12: 80-TC ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri..... | 82 |
| Şekil 4.13: 80-REF ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri..... | 83 |
| Şekil 4.14: 100-LOW ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri..... | 84 |
| Şekil 4.15: 100-EC ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri..... | 86 |
| Şekil 4.16: 100-TC ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri..... | 87 |
| Şekil 4.17: 100-REF ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri..... | 88 |
| Şekil 5.1: 80-LOW-M-DH ÇKC kuruluşu ile mevcut durumun yıllık ısıtma yükü değerleri karşılaştırması..... | 92 |
| Şekil 5.2: 80-EC-KG-DH ÇKC kuruluşu ile mevcut durumun aylara göre soğutma yükü dağılımı..... | 94 |
| Şekil 5.3: 80-EC-KG-DH ÇKC kuruluşu ile mevcut durum tüketim değerlerinin karşılaştırılması..... | 99 |
| Şekil A.1: 50-EC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı..... | 121 |
| Şekil A.2: 50-EC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı..... | 121 |
| Şekil B.1: 50-TC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı..... | 122 |
| Şekil B.2: 50-TC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı..... | 122 |
| Şekil C.1: 50-REF sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı..... | 123 |
| Şekil C.2: 50-REF sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı..... | 123 |

| | |
|---|-----|
| Şekil D.1: 80-LOW sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı..... | 124 |
| Şekil D.2: 80-LOW sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı. | 124 |
| Şekil E.1: 80-EC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı..... | 125 |
| Şekil E.2: 80-EC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı..... | 125 |
| Şekil F.1: 80-TC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı..... | 126 |
| Şekil F.2: 80-TC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı..... | 126 |
| Şekil G.1: 80-REF sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı..... | 127 |
| Şekil G.2: 80-REF sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı. | 127 |
| Şekil H.1: 100-LOW sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı. | 128 |
| Şekil H.2: 100-LOW sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı. | 128 |
| Şekil J.1: 100-EC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı..... | 129 |
| Şekil J.2: 100-EC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı..... | 129 |
| Şekil K.1: 100-TC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı..... | 130 |
| Şekil K.2: 100-TC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı. | 130 |
| Şekil L.1: 100-REF sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı..... | 131 |
| Şekil L.2: 100-REF sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı. | 131 |

TABLO LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Tablo 2.1: Bir cephe teknolojisi olarak çift kabuk cephelerin evrimi. | 26 |
| Tablo 2.2 (devam)..... | 27 |
| Tablo 2.3 (devam)..... | 28 |
| Tablo 2.4 (devam)..... | 29 |
| Tablo 2.5: Kutu tipi ÇKC sisteminin teknik çizimleri ve şematik gösterimi. | 35 |
| Tablo 2.6: Şaft tipi ÇKC sisteminin teknik çizimleri ve şematik gösterimi. | 36 |
| Tablo 2.7: Koridor tipi ÇKC sisteminin teknik çizimleri ve şematik gösterimi..... | 36 |
| Tablo 2.8: Çok katlı tipi ÇKC sisteminin teknik çizimleri ve şematik gösterimi..... | 37 |
| Tablo 2.9: Açık sistem hava akış modları ve şematik gösterimi. | 38 |
| Tablo 2.10: Kapalı sistem hava akış modları ve şematik gösterimi. | 38 |
| Tablo 2.11: Çift kabuk cephe sistemleriyle ilgili literatür taraması. | 42 |
| Tablo 2.12 (devam)..... | 43 |
| Tablo 2.13 (devam)..... | 44 |
| Tablo 2.14 (devam)..... | 45 |
| Tablo 2.15 (devam)..... | 46 |
| Tablo 3.1: Örnek ofis binasına ait temel veriler. | 51 |
| Tablo 3.2: Örnek binaya ilişkin cephe pencere/duvar oranları..... | 52 |
| Tablo 3.3: Binanın işletimsel ve HVAC sisteminin özellikleri. | 54 |
| Tablo 3.4: Örnek ofis binasına ait yapı malzemelerinin fiziksel özellikleri..... | 58 |
| Tablo 3.5 (devam)..... | 59 |
| Tablo 3.6: TS 825'e göre U-değeri gereksinimleri.. | 61 |
| Tablo 3.7: Çift kabuk cephe kuruluşları cephe tasarım parametreleri..... | 61 |
| Tablo 3.8: Çalışma kapsamında oluşturulan ÇKC kuruluşlarının kodlanması. | 62 |
| Tablo 3.9: Simülasyonlarda kullanılan cam türlerinin termo-optik özellikleri. | 66 |
| Tablo 3.10: Yapılan kabule göre net ısıtılan alan. | 67 |
| Tablo 3.11: Bina enerji simülasyon modellerinin kalibrasyonu için \pm sınır değerleri. | 67 |
| Tablo 5.1: Yıllık toplam ısıtma yüküne göre en düşük ve en yüksek değerleri sağlayan sonuçlar..... | 89 |
| Tablo 5.2: Yıllık toplam soğutma yüküne göre en düşük ve en yüksek değerleri sağlayan sonuçlar..... | 93 |
| Tablo 5.3: Yıllık toplam enerji tüketim değerleri en düşük ÇKC kuruluşları. | 95 |

SEMBOL LİSTESİ

| | |
|-----------------------------|----------------------------------|
| % | : Yüzde |
| λ | : Isıl iletkenlik katsayısı |
| cm | : Santimetre |
| CO₂ | : Karbondioksit |
| kWh | : Kilowatt saat |
| m | : Metre |
| m² | : Metrekare |
| mm | : Milimetre |
| U | : Toplam ısıl geçirgenlik değeri |
| °C | : Santigrat |
| W/ (m².K) | : Isıl geçirgenlik katsayısı |

KISALTMA LİSTESİ

| | |
|---------------|---|
| AB | : Avrupa Birliği |
| AR6 | : Altıncı Değerlendirme Raporu |
| ASHRAE | : American Society Of Heating, Refrigerating And Air-Conditioning Engineers (Amerikan Isıtma, Soğutma ve Havalandırma Mühendisleri Derneği) |
| BEP | : Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği |
| BIPV | : Building-integrated Photovoltaics (Bina Entegre Fotovoltaik Sistem) |
| BM | : Birleşmiş Milletler |
| BMİDÇS | : Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi |
| BREEAM | : Building Research Establishment's Environmental Assessment Method |
| CFD | : Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) |
| ÇKC | : Çift Kabuk Cephe |
| HVAC | : Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme |
| IEA | : International Energy Agency (Ulusal Enerji Ajansı) |
| IPCC | : Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli |
| LEED | : Leadership in Energy and Environmental Design |
| Low-e | : Low Emissivity (Düşük Emisyonlu) |
| nZEB | : Neredeyse Sıfır Enerjili Bina |
| SHGC | : Güneş Enerjisi Kazanç Katsayısı |
| TS825 | : Türk Standartları 825 |
| XPS | : Ekstrüde Polistiren |
| COP | : Performans Katsayısı (Coefficient of performance) |
| EER | : Enerji Tasarruf Oranı (Energy Efficiency Ratio) |
| MBE | : Mean Bias Error (Ortalama Sapma Hatası) |
| CVRMSE | : Coefficient of Variation of the Root Mean Squared Error (hata karelerinin ortalamasının kökü değişim katsayısı) |
| RMSE | : Root Mean Squared Error (hata karelerinin ortalamasının kökü) |

ÖNSÖZ

Öncelikle zorlu tez sürecimde değerli katkıları, sabrı ve bilgeliği ile bana her aşamada yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Türkan GÖKSAL ÖZBALTA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca gösterdiği sınırsız sevgi, şefkat ve destek sayesinde her zorluğun üstesinden geldiğim sevgili annem Sema İNCE'ye, bu zorlu serüvende her zaman elimden tutarak bana güç ve ilham veren değerli babam Fatih İNCE'ye ve varlığı ile yolumu aydınlatan, her anımda yanımda olan kıymetli eşim Ömer Sunda ÜN'e çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında Teknokent ofis binasının kullanımına izin vererek tezimin gerçekleşmesinde rol oynayan yetkiliye çok teşekkür ederim.

Bu tezin hayata geçmesinde maddi ve manevi yanımda olan, yaşamıma iyilikle dokunan herkese minnettarım.

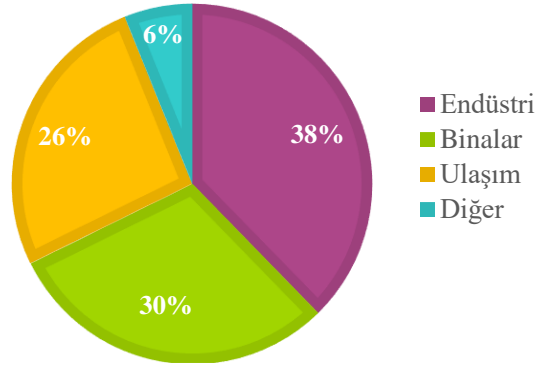
Balıkesir, 2025

Hande Hilal ÜN

1. GİRİŞ

İklim krizine karşı alınan önlemler, yapı sektörünü de yakından ilgilendirmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre, 2022 yılında binaların enerji talebi 2020'ye kıyasla %4 artarken, buna bağlı CO₂ emisyonları %5 oranında yükselmiştir (International Energy Agency [IEA], 2022). Sektördeki enerji tüketiminin %70'i konutlardan, %30'u ise ticari binalardan kaynaklanmaktadır. Ayrıca, küresel elektrik talebinin %18'inden fazlasını yapı çevre oluşturmaktadır. Rapora göre bu artışlar, enerji talebindeki büyümenin fosil yakıt temelli sistemlere bağımlılıkla doğrudan ilişkili olduğunu işaret etmektedir (IPCC, 2023; Cabeza et al., 2022). Şekil 1.1'de nihai enerji tüketiminin sektörlere göre yüzdelik dağılımı verilmiştir; endüstri sektörü en yüksek paya sahipken, ikinci sırada binalar yer almaktadır.

TOPLAM NİHAİ ENERJİ TÜKETİMİ 2023



Şekil 1.1: Enerji tüketiminin sektörlere göre dağılımı (IEA, 2023a'dan uyarlanmıştır).

COP 27'de, 2030'a kadar sıfır karbon salımlı ve iklime dayanıklı binalar inşa etmek amacıyla "Binalarda Atılım" çağrısı yapılmıştır (GlobalABC, 2023). Binaların uluslararası ölçekte karbonsuzlaştırılmasını hızlandırmak için önemli girişimler arasında; Global Alliance for Buildings and Construction (Binalar ve İnşaat için Küresel İttifak), World Green Building Council (Dünya Yeşil Bina Konseyi) ve Global Buildings Performance Network (Küresel Binalar Performans Ağı) bulunmaktadır. Birçok ülke, bu hedeflere ulaşmak için 2022-2023 yıllarında bina yönetmeliklerini yeniden düzenlemiştir. Bu ülkelerden biri olan Japonya, 2030'dan itibaren tüm yeni binalarda sıfır enerji performansını zorunlu hale getirirken, ABD'de ASHRAE, bina faaliyetleri için net sıfır enerji ve karbon standartları yayınlamış, AB ise 2026'dan itibaren kamu binalarında sıfır salım şartı getirmiştir (IEA, 2022). Bu kapsamda yapılan bir çalışmada, EDGE modeline dayanan üç farklı senaryo oluşturulmuştur. Sonuçlar, yeni enerji verimliliği uygulamalarının benimsenmesiyle, enerji talebini 2050'ye kadar %47,

2100'e kadar %61 oranında azaltabileceğini göstermektedir (Levesque, Pietzcker ve Luderer, 2019).

Bina işletim süreci, küresel nihai enerji tüketiminin %30'unu ve enerjiyle ilgili salımların ise %27'sini oluşturmaktadır (IEA, 2022). Bu tüketimin başlıca kaynağı, alan ısıtma, soğutma ve iklimlendirme (HVAC) sistemleri gibi konfor odaklı gereksinimlerdir. 2015 yılından bu yana güncellenen bina yönetmelikleri ve artan bina yenileme oranları, küresel düzeyde alan ısıtma yoğunluğunda ortalama %7 oranında bir azalmaya katkı sağlamıştır. Hedefler doğrultusunda, 2030 yılına kadar alan ısıtma enerji yoğunluğunun %35, soğutma da ise %25 oranında azalması gerekmektedir (IEA, 2023b). Bu süreçte cepheler, yüzey alanı en geniş yapı bileşeni olarak; ısı kaybı/kazançları üzerinde belirleyici bir rol üstlenmektedir (Yüksel ve Ekici, 2023; GlobalABC, 2020; Anaç, 2019). Özellikle saydam elemanlar, binanın toplam enerji kaybının %60'undan sorumludur (Jelle et al., 2012). Dolayısıyla enerji kayıplarını en aza indirmek ve enerjiyi etkin kullanmak için cephe tasarımı önemli bir faktördür. Şekil 1.2'te cephelerin enerji verimliliği açısından evrim süreci verilmektedir.

Sürdürülebilirlik kaygılarıyla tasarlanmış cepheler, pasif ısı kontrolü sağlayarak aktif sistemlere olan bağımlılığı azaltmaktadır. Bu bağlamda, enerji etkin cephe sistemlerinden biri olan ve kullanımı giderek yaygınlaşan çift kabuk cepheler öne çıkmaktadır. Özellikle yüksek katlı yapılarda ve ofis binalarında uygulanan bu sistemler, doğal havalandırma ve aydınlatma sağlanması, iç ortam konforu ve rüzgâr yüküne karşı yapısal direnç göstermesi gibi nedenlerle tercih edilmektedir. İki kabuk arasındaki hava boşluğu, tampon bölge oluşturarak ek yalıtım katmanı işlevi görmektedir; bu sayede enerji verimliliğini artırmakta ve doğal havalandırma ile güneş kontrolünün sağlanmasına olanak tanımaktadır (Ghaffarianhoseini et al., 2016; Poirazis, 2004). Çift kabuk cepheler ile ilgili yapılan çalışmalar, tek kabuk cephe sistemine kıyasla enerji kayıplarını önlediği (Araji et al., 2024; Qurraie ve Sertyamaç, 2023; Năstase et al., 2022) ve daha uzun ömürlü ve dayanıklı olduğunu ortaya koymaktadır (Ahmed et al., 2016). Ayrıca, bu sistemlerin performansının, gölgeleme elemanı uygulanması, kullanılan cam türü, havalandırma türü ve boşluk genişliği gibi parametrelere bağlı olarak değiştiği belirtilmektedir (Matour et al., 2022; Tahmasbi et al., 2025).



Şekil 1.2: Cephe sistemlerinin enerji verimliliği açısından gelişim süreci (LaFrance, 2013).

1.1 Çalışmanın Amacı

Bina cepheleri, dış ortamla sürekli etkileşim içerisinde bulunmaları ve çeşitli atmosferik koşullara maruz kalmaları sebebiyle enerji kayıp ve kazançlarında belirleyici rol oynamaktadır. Dolayısıyla, enerji tüketimini azaltmaya yönelik yenilikçi tasarım stratejilerinin geliştirilmesi, enerji etkin cephe kavramını mimarlık ve mühendislik alanlarında öncelikli bir araştırma konusu haline getirmektedir. Bu tez çalışmasının temel amacı, ofis binalarında kullanımı giderek yaygınlaşan çift kabuk cephe sistemlerinin ısıtma ve soğutma yükleri üzerindeki etkilerini; farklı boşluk genişlikleri (50-80-100 cm), cam türleri (low-e, termokromik, elektrokromik, reflektif), yönelme (kuzey, güney, doğu, batı) ve havalandırma türü (doğal, hibrit, mekanik) parametreleri kapsamında simülasyon yöntemiyle ortaya koymaktır. Söz konusu parametrelerin birbirleriyle etkileşiminin bina enerji tüketimi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde değerlendirilerek, binalarda enerji verimliliğini artırmaya yönelik sürdürülebilir çözümler geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Literatürde, çift kabuk cephe kuruluşlarının ısı performans ve enerji tasarrufuna ilişkin çalışmalar, genellikle tek bir parametreye odaklanmakta veya deneysel verilerle sınırlı kalmaktadır. Bu durum, farklı parametrelerin bir arada kullanılmasıyla elde edilebilecek verimin incelenmesi açısından bir boşluk oluşturmaktadır. Dolayısıyla bu çalışma, 108 farklı çift kabuk cephe kuruluşu modelleme sonuçları analiz edilerek; literatürdeki boşluğu doldurmaya ve ofis bina cephelerinde enerji tasarrufu stratejileri geliştirmeye hizmet etmektedir. Çalışma kapsamında aşağıdaki araştırma soruları ele alınmıştır:

1. **Parametrelerin Etkileşimi:** Belirlenen parametrelerin etkileşimi sonucunda, enerji etkinlik açısından en verimli çift kabuk cephe kuruluşu hangisidir?

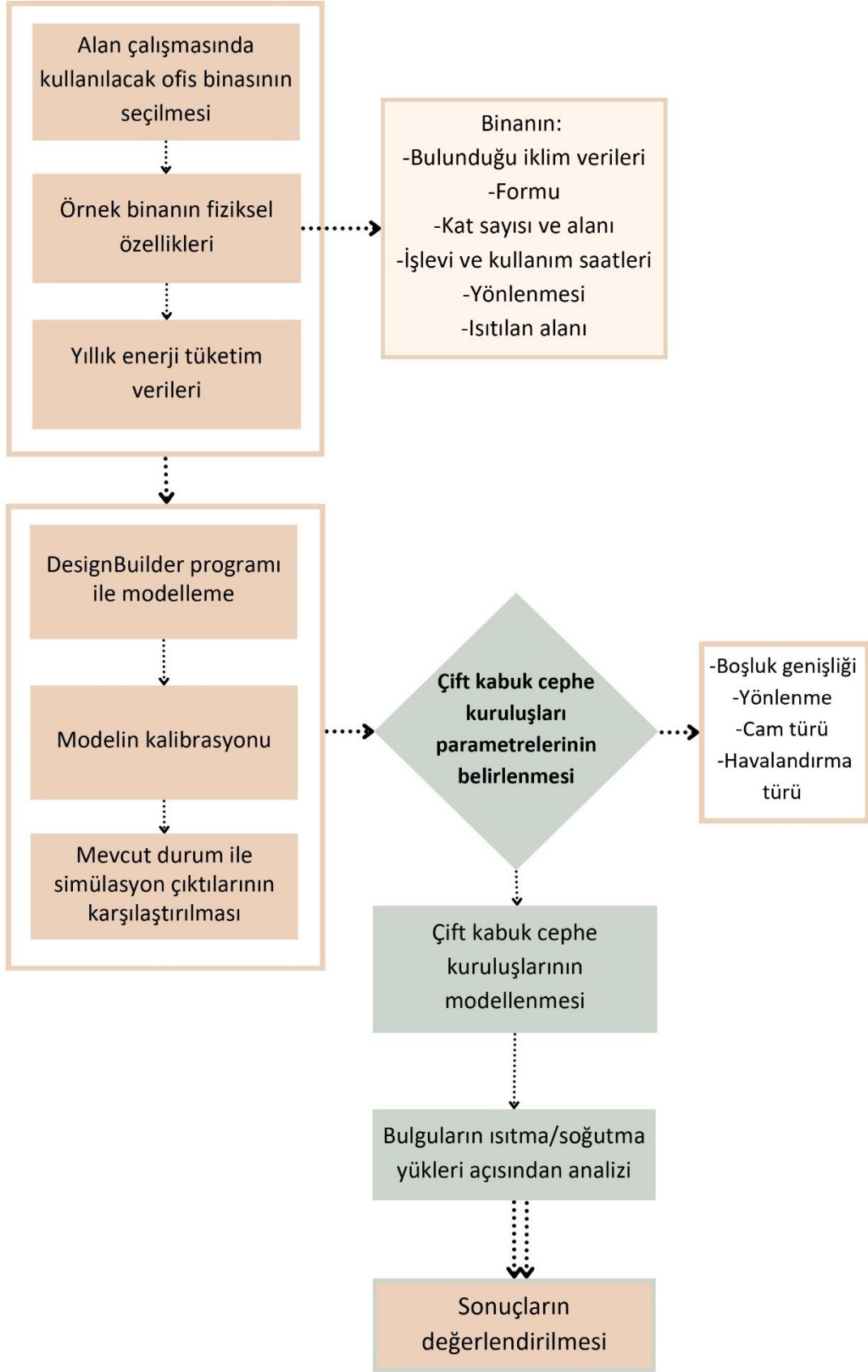
2. **Cephe Performans Karşılaştırması:** Örnek binanın tek kabuk cephe sistemi ile kıyaslandığında, çift kabuk cephe kuruluşlarının enerji performansı ne ölçüde farklılık göstermektedir?
3. **Cam Türü ve Yönlenmenin Enerji Performansına Etkisi:** Dinamik ve pasif cam türleri ile yönlenmenin etkileşimi yaz ve kış aylarında enerji yüklerinin dengelenmesine nasıl katkı sağlamaktadır?
4. **Boşluk Genişliği ve Cam Türü Etkileşimi:** Cam türü (low-e, termokromik, elektrokromik, reflektif) ile boşluk genişliği (50-80-100 cm) etkileşiminin bina ısıtma/soğutma yüklerini azaltmadaki rolü nedir?

1.2 Çalışmanın Kapsamı

Tez kapsamında, ofis binalarında çift kabuk cephe tasarımının enerji performansı üzerindeki etkileri araştırılmaktadır. Çalışma, farklı çift kabuk cephe kuruluşları ile mevcut cephe kuruluşunun ısıtma-soğutma yükleri ve yıllık enerji tüketimi üzerindeki etkileri inceleyerek, en düşük enerji tüketimini sağlayan tasarım parametrelerini belirlemeye odaklanmaktadır. Bu bağlamda, benzetim programından yararlanılarak çeşitli çift kabuk cephe kuruluşlarının analizleri yapılmış olup bu tasarımların ısıtma/soğutma yükleri üzerindeki etkisi irdelenmiştir.

1.3 Çalışmanın Yöntemi

Öncelikle, çalışmanın kapsamını belirlemek üzere enerji etkin cephe sistemleri, çift kabuk cephe uygulamaları ve bina enerji performansı konularında daha önce yapılmış çalışmalar (bildiri, makale, tez vb.) incelenmiştir. Daha sonra, Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsü'nde bulunan bir ofis binası alan çalışması kapsamında ele alınmış ve binanın üç boyutlu modeli, DesignBuilder programı ile EnergyPlus entegre yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Yıllık enerji simülasyonu gerçekleştirilen örnek bina modeli, gerçek enerji tüketim değerleri kullanılarak kalibre edilmiştir. Ardından, ÇKC sistemlerinin ısıtma/soğutma yükleri üzerindeki etkisini incelemek için dört temel parametre (yönlenme, havalandırma türü, cam türü, boşluk genişliği) dikkate alınarak 108 farklı tasarım oluşturulmuş ve her biri modellenmiştir. Simülasyon sonuçları, mevcut durum ile karşılaştırılmıştır. Sonuç itibarıyla, en düşük tüketim değerine sahip ÇKC kuruluşu belirlenmiş; parametreleri temel alınarak analiz edilmiştir. Çalışmada izlenen yöntem Şekil 1.3'te akış şeması ile özetlenmiştir.



Şekil 1.3: Çalışmanın akış şeması.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 İklim Değişikliği ile Mücadele, Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ve Binalar

İklim değişikliğiyle mücadele, küresel ölçekte kaçınılmaz bir sorumluluktur. Uluslararası raporlar ve politikalar, küresel iş birliğinin ve hızlı müdahalenin önemine işaret etmektedir. Ülkelerin ortak hareket etmesi ve salım azaltımının sürekli hale getirilmesi ile önümüzdeki 20 yıl içerisinde sıcaklık artışlarının kontrol altına alınabileceği öngörülmektedir (IPCC, 2023). Şekil 2.1, iklim değişikliği konusunda uluslararası eylemleri özetleyen önemli dönüm noktalarını kapsamaktadır. İklim değişikliği ile ilgili uluslararası eylemlerin tarihsel gelişimi, büyük ölçüde enerji krizleri, çevresel problemlerin artışı ve küresel farkındalığın artışı ile şekillenmiştir.



Şekil 2.1: İklim değişikliği ile ilgili uluslararası eylemlerin kronolojik zaman çizelgesi (URL-1'den uyarlandı).

Taraflar Konferansı (COP), BMİDÇS'nin en üst düzey karar alma organı olarak her yıl 197 ülke ve temsilcisinin katılımıyla iklim ve çevre konularındaki ilerlemeleri değerlendirmektedir (Url-2). Bu süreçte öne çıkan konferanslardan COP-15'te Küresel ısınmanın 2°C altında tutulması hedeflenmiş, gelişmekte olan ülkelere finansal destek taahhüt

edilmiştir (Silolezya, 2023). COP-21’de Kyoto Protokolü’nün eksikliklerini gidermek amacıyla küresel sıcaklık artışının sanayi devrimi öncesi döneme göre 2 °C’nin altında, sürdürülebilirlik eylem planları kapsamında ise 1,5 °C’ye sabitlenmesi hedeflenmiş ve ‘Paris Anlaşması’ imzalanmıştır. COP-28’de ise ilk kez fosil yakıtlar iklim krizinin ana nedeni olarak kabul edilmiş ve taraflar kademeli olarak fosil yakıt kullanımından uzaklaşma konusunda uzlaşmıştır (Parikh and Chin-Yee, 2023; Waskow et al., 2023). COP-29, 2024 yılında Bakü’de düzenlenmiş olup iklim finansmanı ve uyum önlemlerinin değerlendirildiği konferanstır (URL-3).

Türkiye, Kyoto Protokolü ve Paris Anlaşması kapsamındaki taahhütlerini yerine getirmek amacıyla, 2007 yılında yürürlüğe giren Enerji Verimliliği Kanunu ve Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği (BEP) ile yeni binalarda enerji tüketimini sınırlandırmayı amaçlamaktadır (T. C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024).

İlk kez Brundtland Raporu’nda tanımlanan ve önemi vurgulanan "sürdürülebilir kalkınma" kavramı, 2015 yılında Birleşmiş Milletler tarafından kabul edilen ve 2030 yılına kadar ulaşılması hedeflenen 17 küresel hedefi içeren Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) çerçevesinde ele alınmaktadır (URL-4). SKA, dünya genelinde daha sürdürülebilir bir yol haritası oluşturmayı hedefleyen kapsamlı bir eylem planıdır. Bu amaçlara ulaşmada, Yeşil Ekonomi ve Döngüsel Ekonomi stratejileri önemli bir rol üstlenmektedir. Yeşil Ekonomi, ekonomik büyümeyi çevresel sürdürülebilirlikle uyumlu hale getiren politikalar öngörürken, Döngüsel Ekonomi atıkların ve kaynak kullanımının en aza indirildiği, döngüsel bir kaynak yönetim sistemi sağlar (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2021).

Bu çerçevede pek çok hedef inşaat sektörü ile doğrudan ilişkilidir. Bu hedeflerden SKA 7, binalarda enerji verimliliğinin artırılmasını ve yenilenebilir enerji kullanımının teşvik edilmesini hedeflerken, SKA 9 sürdürülebilir bina altyapılarının geliştirilmesi, enerji tüketiminin azaltılması ve yenilikçi cephe tasarımlarının uygulanmasını desteklemektedir. Ayrıca, SKA 11, binaların sürdürülebilirliğini artırarak şehirlerin karbon ayak izini düşürmeye ve iklim değişikliğiyle uyumlu, dayanıklı yapıların inşasını teşvik etmeye odaklanmaktadır. SKA 13 ise BMİDÇS politikalarının uygulanmasını hedefleyerek, bina enerji tüketimi ve karbon salımlarının azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Dolayısıyla, cephe sistemlerinde

enerji performansının iyileştirilmesi, sürdürülebilir kalkınma amaçlarına ulaşmada önem arz etmektedir (URL-5). Şekil 2.2’de SKA’nın 17 hedefi simgeleriyle birlikte verilmiştir.



Şekil 2.2: Sürdürülebilir kalkınma amaçları (URL-4).

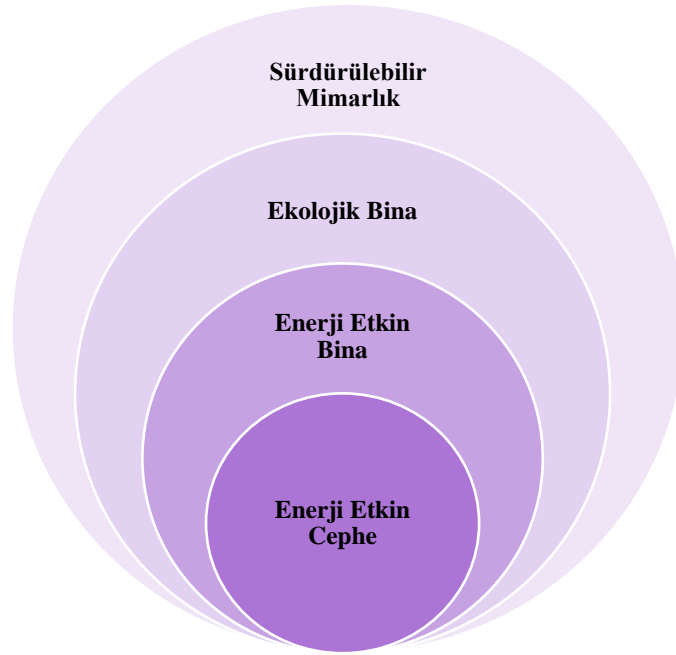
2.2 Enerji Etkin Cephe Tasarımı ve Kuruluşları

21. yüzyıl boyunca cam teknolojisinin gelişmesi ve dünya genelinde kullanımının artmasıyla, cephelerin enerji etkin hale getirilme ihtiyacı ortaya çıkmıştır (Heimrath et al., 2005). Yapı kabuğu, yalnızca binayı saran estetik bir örtü olmaktan çıkarak, kullanıcı gereksinimlerini karşılayan ve binanın enerji performansını optimize eden bir yapı elemanına dönüşmüştür. Bu değişimle birlikte, giydirme cephe sistemleri geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bu durum, binanın ısıtma, soğutma, havalandırma gibi konfor koşullarının sağlanması sırasında yüksek enerji tüketimine yol açmıştır. Bu enerji sorununun çözümüne yönelik olarak enerji etkin cephe sistemleri geliştirilmiş ve özellikle çift kabuk cepheler, bu sistemlerin en önde gelen örneklerinden biri olarak yapı sektöründe kritik bir rol üstlenmiştir (Çakır Kıasıf, 2015).

Binaların enerji tüketiminde en üst sıralarda yer alması ve enerji kayıplarının yadsınamayacak kadar yüksek olması sebebiyle binalarda enerji etkin sistemlerin uygulanması enerji kazancının da bir o kadar yüksek olacağı anlamını taşır. Özellikle, binaları dış çevre koşullarından koruyan ve en büyük yüzey alanına sahip olan cephe sistemleri, enerji

kayıplarının da en fazla yaşandığı yapı bileşenidir. Dolayısıyla cephelerin enerji verimliliğini artırmak, yalnızca çevresel sürdürülebilirliğe değil, uzun vadede ekonomik maliyetlerin azaltılmasına da hizmet eder. Enerji etkin cephe sistemleri, bu bağlamda, sürdürülebilirliğin yapı sektöründeki somut ve yenilikçi bir yansıması olarak değerlendirilebilir.

Binalarda enerji etkinlik, binanın yapım aşamasından yıkım aşamasına diğer bir deyişle beşikten eşiğe kadar ve yıkım sonrası atıkların değerlendirilmesi de dahil, enerji kaynaklarının kullanımının ve enerji kayıplarının minimize edilmesi, aynı zamanda konfor ve işlevsellikten ödün vermeden enerji tasarrufu sağlanmasını hedefleyen uygulamaların toplamıdır. Enerji etkin yapı, pasif veya aktif yöntemlerle estetik, konforlu, sağlıklı ve çevreye duyarlı koşulların oluşmasını sağlarken enerji tüketimini minimumda tutan yapı modelidir (Elbi, 2019).



Şekil 2.3: Enerji verimli ve düşük karbon ayak izine sahip yapısal tasarım yaklaşımlarının birbirleriyle olan ilişkisi (Beşiroğlu ve Özmen, 2022).

Yapıların enerji tüketimleri dengelenebilmesi için, iklim ve yerleşim planlaması dikkate alınarak tasarımlar yapılmalıdır (Erçin, 2005). Bu parametreler göz önünde bulundurulduğunda, binanın formuyla birlikte cephe sistemleri de farklılıklar göstermektedir. Sıcak iklimlerde havalandırılmalı cepheler önem kazanırken, soğuk iklimlerde ısıyı muhafaza edecek cephe sistemleri (ısı yalıtımlı cam cepheler, trombe duvarları, tampon bölge cepheler vb.) tercih edilmektedir. Ayrıca binanın formu, yönlenmesi, yüksekliği, mekânsal

organizasyonu (bölgeleme), işlevi gibi etkenler de HVAC ve aydınlatma sistemlerinde kullanılan enerjinin minimize edilmesi ve enerji kayıplarının azaltılması açısından önem arz etmektedir (Ulukavak Harputlugil, 2016). Farklı cephe kurguları, malzeme seçimleri, pencere açıklıkları, pencere-duvar oranları ve güneş kontrol elemanlarının kullanımı gibi unsurlara bağlı olarak binanın enerji performansı değişiklik göstermektedir. Bu bağlamda, iklim ve çevresel parametreler doğrultusunda en uygun cephe sisteminin seçilmesi kritik bir rol oynamaktadır.

Güvenli (2006), cepheyi şu şekilde tanımlamaktadır: ‘‘İç mekân ve dış mekân arasında ayırıcı görevi gören, içinde barınanlar için koruyucu görevi üstlenmiş olan, yapının dış mekânı ile ilişki kuran, iletişim halinde olan bir yapı elemanı’’. Dış çevreden bakıldığında ilk algılanan tüm yüzeyler binanın cephesini oluşturmaktadır. Dolayısıyla her türlü bariyer ve kontrol katmanlarını içeren yapı elemanı cephe olarak nitelendirilebilir.

Yılmaz (2006), enerji etkin cepheleri, değişen iklim koşullarına adapte olabilen, yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanan, dış çevre koşullarından yapıyı koruyan, ısıtma-soğutma, havalandırma ve aydınlatma ihtiyaçlarını enerji tüketmeden veya düşük enerji ile karşılayan, entegre edilen sistemler sayesinde enerji üretebilen sistemler olarak tanımlamaktadır. Cephelerde enerji etkinlik, tek bileşen veya entegre sistemler kullanılarak sağlanabilir. Öncelikli hedef, enerji tüketiminin azaltılması, iç mekân konforunun korunması ve çevresel etkilerin minimum düzeyde tutulmasıdır (Gündoğdu ve Arslan, 2020).

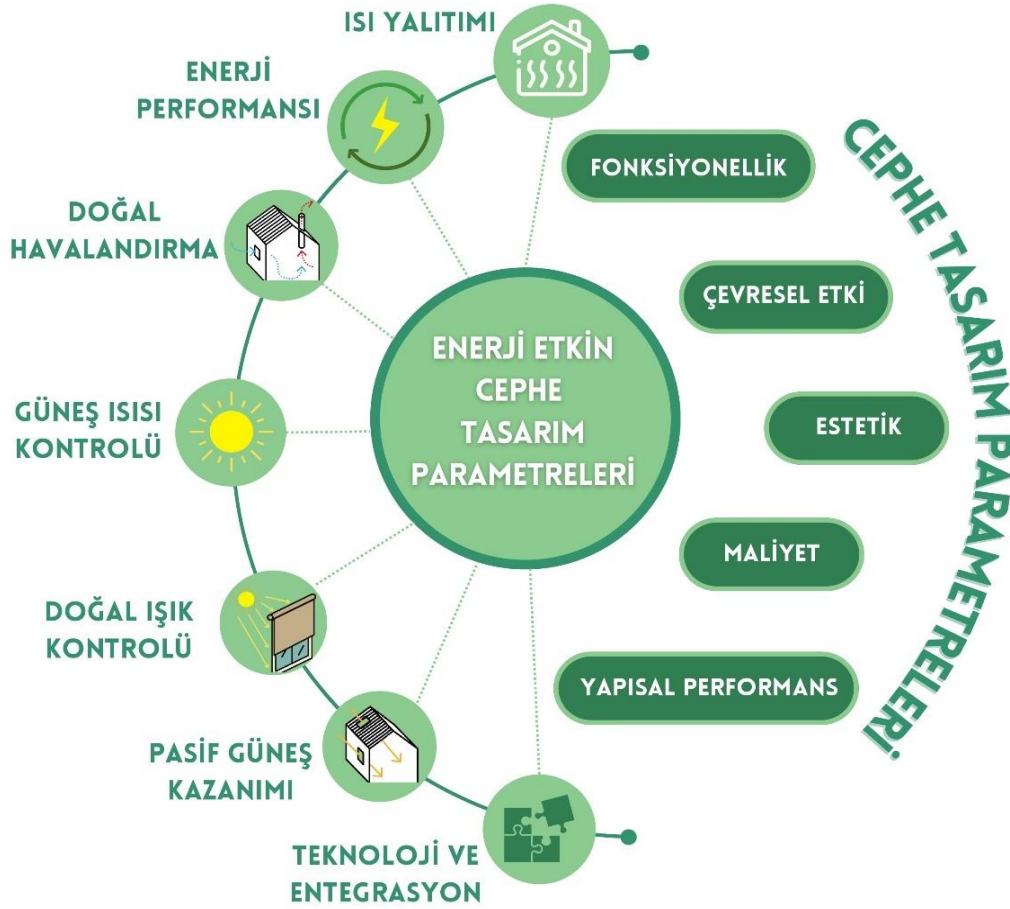
Şekil 2.4’te cephe tasarım parametreleri ile enerji etkin cephe ilişkisi hiyerarşik biçimde gösterilmektedir. Cephe tasarım parametreleri, bir binanın cephesinde detay tasarım kriterlerini de kapsayan geniş bir yelpazeyi oluşturur. Enerji etkin cephe tasarım parametreleri ise özellikle enerji verimliliğine ve sürdürülebilirlik hedeflerine odaklanmaktadır. Bu süreçte kullanılan yöntemler, binanın enerji performansını artırarak hem çevresel etkileri azaltmayı hem de ekonomik tasarruf sağlamayı hedefler. Enerji etkin cepheler, cephe tasarım parametrelerinin bir alt kümesi olarak değerlendirilebilir.

Aksamija’ya göre, enerji etkin cephe sistemlerinin özellikleri şunlardır (Aksamija, 2013):

1. Doğal aydınlatma sağlaması,
2. Aşırı ısınmanın önlenmesi,

3. Isı depolayabilmesi,
4. İklimine uygun yalıtıma sahip olması,
5. Dış koşullardan koruması, sızıntıların önlemesi (nem, rüzgâr, yağmur vb.),
6. Doğal havalandırma sağlaması.

Tüm bu özellikler, binanın konumuna, iklim parametrelerine, işlevine, pencere-duvar oranına, yönelmesine vb. pasif tasarım parametrelerine bağlıdır.



Şekil 2.4: Cephe tasarım parametreleri ile enerji etkin cephe arasındaki ilişkisi (Poirazis, 2004'den uyarlanmıştır).

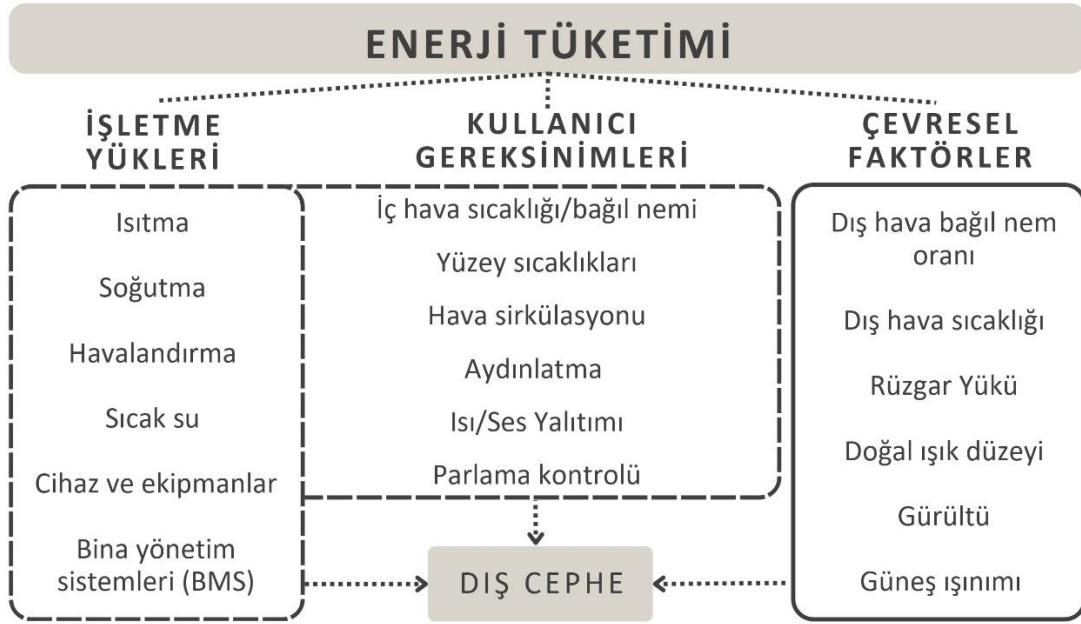
Cepheler, iç mekân konforunun sağlanması ve enerji verimliliğinin artırılması amacıyla pasif ve aktif sistemlerle donatılabilir. Pasif sistemler, çevresel koşullara duyarlı tasarım yaklaşımlarıyla doğal kaynakları (güneş ışığı, rüzgâr vb.) kullanarak ısıtma, havalandırma ve aydınlatma gibi işlevleri yerine getirirken ek bir enerji kaynağına duymaz; aktif sistemler ise yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak, güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri gibi teknolojiler aracılığıyla enerji üretimini ve depolamayı mümkün kılan sistemlerdir (Şenyurt ve Altın, 2014).

Teknolojik gelişmelerle birlikte giydirmeye cepheler, yalnızca şeffaf kaplama veya pasif yapı elemanları olmaktan çıkarak, doğal havalandırma ile güneş ısı ve ışığı kontrolünü otomatik olarak optimize eden, enerji verimliliğini artıran ve kullanıcı konforunu doğal yöntemlerle sağlayan aktif/dinamik sistemler haline gelmiştir (Çakır, 2012). Bu bağlamda cephelerin enerji etkinliğini arttıracak çeşitli tasarımlar yapılmakta ve geliştirilmektedir. Örneğin, çift kabuk cephe (ÇKC) sistemleri, pasif bir sistem olabilirken, entegrasyon sağlayabilme kapasitesi sayesinde aktif bir forma dönüşerek enerji verimliliğini pasif haline oranla daha fazla artırır. Yapılan çalışmalar, ÇKC'lerin ofis binalarında enerji yüklerini güneş kısıcılar ile %30'a kadar azaltabileceğini göstermektedir (Çetin ve Dikmen, 2022). Uyarlanabilir cepheler, malzemeler, bileşenler ve sistemler aracılığıyla iç-dış ortam koşullarına göre gerçek zamanlı ve otomatik olarak işlevini, özelliklerini veya davranışını değiştirebilme kabiliyetleri sayesinde bina enerji verimliliğinde ve ekonomisinde iyileştirmeler sağlamaktadır (Aelenei et al., 2016). Aynı zamanda bu cepheler: dinamik, kinetik, adaptif, gelişmiş, akıllı, duyarlı gibi terimlerle de anılmaktadır (ElGhazi, 2021). Bir başka enerji etkin cephe sistemi ise binaya entegre fotovoltaik (BIPV) sistemleridir. BIPV, cepheye entegre güneş panelleri sayesinde elektrik üretmektedir. Bu cephe sistemi binaya, ekonomik, estetik ve teknik destek sağlarken enerji üretimi gerçekleştirilmesiyle sürdürülebilirliğe katkıda bulunur. Araştırmalara göre BIPV sistemleri yakın gelecekte sıfır enerji ve sıfır karbon salımlı binalara yönelik sürekli artan talebi karşılamak için güçlü ve çok yönlü bir seçenek olabilir (Jelle and Breivik, 2012). Gelişmekte olan bir diğer enerji etkin cephe konsepti, Biyomimikri'dir. Biyomimikri yaklaşımı, doğadan ilham alınarak oluşturulmakta ve yapılan çalışmalar doğrultusunda, bulunduğu çevre koşullarına adaptasyon sağlayarak enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabileceği belirtilir (Gündoğdu ve Arslan, 2020).

2.3 Cephe Kuruluşunun Enerji Tüketimine Etkisi

Bina cepheleri, enerji tüketimi üzerinde doğrudan ve önemli bir etkiye sahiptir. Isı kaybı, güneş kontrolü ve doğal havalandırma gibi faktörler, cephe tasarımının enerji verimliliğine katkı sağlamasında belirleyici rol oynar. Uygun şekilde tasarlanmış bir cephe, ısıtma/soğutma gereksinimlerini dengeleyerek iç mekânın ısı konforunu artırabilir ve enerji tüketimini azaltabilir. Bu nedenle, cepheler binaların sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği hedeflerine ulaşmasında kritik öneme sahiptir. Şekil 2.5'te cephenin enerji tüketimi üzerindeki etkisi kullanıcı gereksinimleri, işletme yükleri ve çevresel faktörler başlıkları altında açıklanmaktadır. Bina işletme sistemleri, büyük ölçüde kullanıcı konfor ve sağlık

gereksinimlerini sağlamak için devreye girer; dolayısıyla enerji tüketimi ile doğrudan ilişkilidir.



Şekil 2.5: Cephe ile enerji tüketiminin doğrudan ilişkisi (Schittich, 2001).

Bina cephe tasarımlarının enerji performansına etkilerini inceleyen araştırmalar, cephelerin enerji tüketimi üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar, enerji tüketimini analiz etmek, bina performansını değerlendirmek ve farklı stratejilerin etkinliğini karşılaştırmak üzere çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu kapsamda, Charisi (2017), neredeyse sıfır enerjili binalara (nZEB) ulaşma hedefi doğrultusunda bir konut cephesini ele almıştır. Cephe parametrelerinin (yalıtım, pencere açıklıkları, gölgeleme sistemleri) enerji performansı üzerindeki etkisini dört farklı iklim bölgesinde DesignBuilder programı aracılığıyla hesaplanmıştır. Sonuç olarak yapılan analizler, iklim bölgesine özgü optimize edilmiş parametre kombinasyonlarının enerji talebinde %30 azalma sağlarken yıllık toplam enerji tüketimini 50 kWh/m²'nin altına düşürdüğünü ortaya koymuştur.

Reinhart ve Wienold (2011), bina cephelerinin enerji performansına olan etkilerini analiz etmiş ve cephe tasarımı ile enerji tüketimi arasında güçlü bir ilişki olduğunu belirtmiştir.

Li ve Lam'ın (2001) yaptıkları çalışma ile ofis binalarında enerji verimliliği stratejilerini incelemiş ve doğru cephe tasarımının ısıtma ve soğutma yüklerini önemli ölçüde azalttığı sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde, Gratia ve De Herde, 2007 yılında yaptıkları çalışmada,

akıllı cephe sistemlerinin enerji verimliliğini artırma potansiyelini araştırmış ve bu sistemlerin ısıtma/soğutma için tüketilen enerjiyi dengelemede başarılı olduğunu göstermiştir.

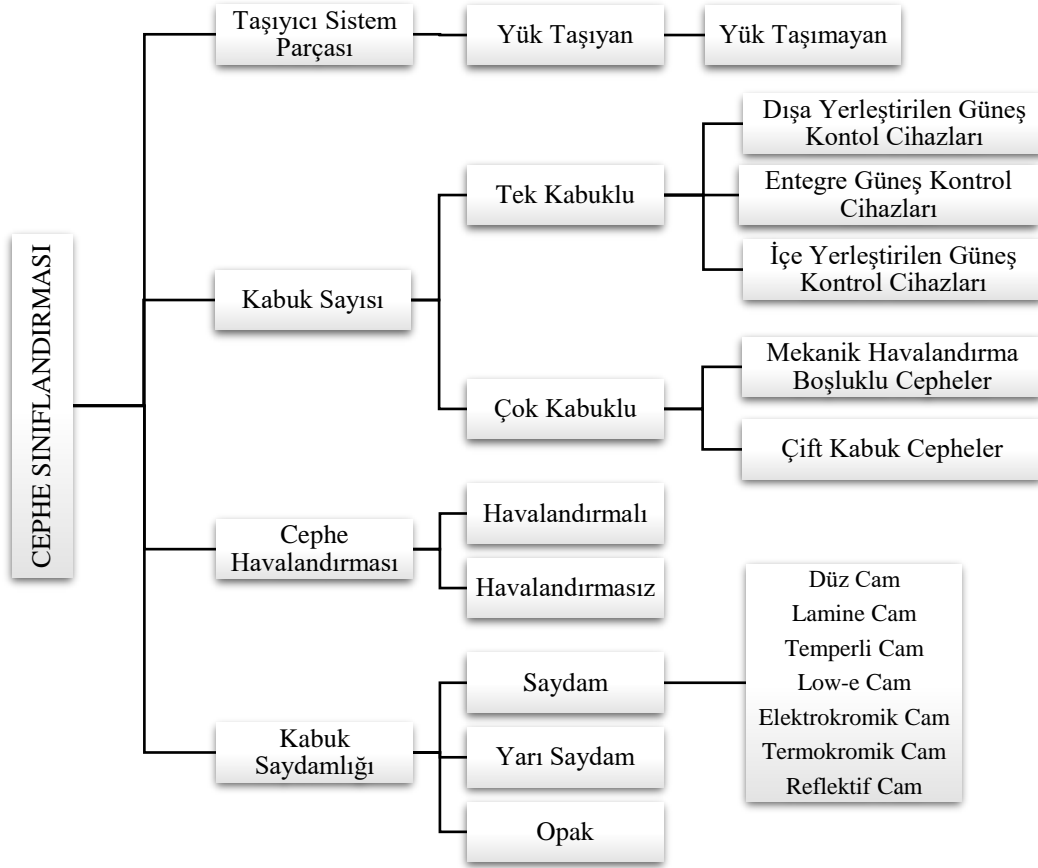
Ochoa ve Capeluto (2006) çalışmasında, ofis binalarında cephe düzenlemesi ve doğal ışığın etkin kullanımı ile enerji tüketiminde tasarruf elde edileceğini ifade etmiştir.

Çevre mühendislerinin gerçekleştirdiği araştırmaya göre, çift kabuk cephe sistemlerinin bazı tiplerinde enerji tasarrufu %30 ile %50 arasında değişebildiğini saptanmıştır (Ayçam, 2011). Örneğin, Hong Kong'da sıcak ve nemli iklim koşullarında altı farklı binanın özellikleri analiz edilerek üç farklı çift kabuk cephe tipi modellenmiş olup VisualDOE yazılımı kullanılarak yapılan dinamik simülasyonlar sonucunda, Hong Kong Bilim Parkı binasında %9,18'e kadar enerji tasarrufu sağlanabildiği tespit edilmiştir (Haase et al., 2007).

Erbil şehrinde gerçekleştirilen bir çalışmada, bir binanın enerji performansını optimize etmek için EnergyPlus ve ClimateStudio yazılımları kullanılarak çift kabuk cephe sistemlerinin farklı tipleri (bina yüksekliğinde, kat yüksekliğinde, şaft, kutu) analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçta şaft tipi ÇKC kuruluşu, ara boşlukta hava akışının artması sayesinde soğutma enerjisi ihtiyacını %9-14 azaltmıştır. Ayrıca bu tasarım, Erbil'in ılıman ikliminde yıllık 116.574 kWh enerji tasarrufu sağlayarak binanın başlangıç durumuna göre belirgin bir iyileşme sunmuştur (Naddaf and Baper, 2023). Benzer biçimde Saelens ve arkadaşları (2008), çift kabuk cephe sistemlerinin enerji performansını değerlendirmiş ve bu sistemlerin ısıtma ve soğutma yüklerini düşürmede etkili olduğunu belirtmiştir.

Türkiye'de yapılan bir çalışmada, cephe tasarımının enerji verimliliği üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, ülkenin en yüksek konut binası olan İstanbul Sapphire örnek yapı olarak seçilmiştir. Çalışmada, binanın mevcut cephe tasarımı, DesignBuilder programı kullanılarak enerji tüketimi açısından analiz edilmiştir. Mevcut cephe, 3-6 metre derinlikli ikinci bir katmana sahip olduğundan, yazarlar tarafından "hava koridorlu çift katmanlı cephe" olarak tanımlanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, bu cephe sisteminde toplam enerji tüketiminin %25'i ısıtma, %14'ü ise soğutma amaçlı kullanılmıştır. Ayrıca, elde edilen enerji tüketim verileri, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, hava koridorlu bina cephesinin aynı büyüklükteki binalara göre enerji tüketimini %30 oranında azaltabildiğini göstermiştir (Aydın ve Mihlayanlar, 2020).

Enerji etkin cephe sistemleri, kullanım gereklilikleri, kabuk sistemleri, konstrüktif özellikler ve gölgeleme elemanları gibi kriterlere göre farklı kategorilere ayrılabilir. Şekil 2.6, bu sınıflandırmanın detaylı bir gösterimini sunmaktadır.



Şekil 2.6: Yapı kabuğunun konstrüktif parametrelere göre sınıflandırılması (Compagno and Taylor, 2002; Herzog et al., 2004).

Sonuç olarak, cephe sistemlerinde uygulanan ileri teknolojiler, yüksek yalıtım kapasitesine sahip malzemelerin tercih edilmesi, binanın doğru yönde konumlandırılması ve yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu gibi faktörler, enerji verimliliğinin artırılmasına ve sürdürülebilir mimarlık hedeflerine ulaşılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Literatür araştırması kapsamında elde edilen bulgular, akıllı sistemlerin entegrasyonu ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla bu etkinin daha da artırılabilirliğini ortaya koymaktadır.

2.4 Çift Kabuk Cepheler

Çift kabuk cephe sistemleri literatürde çeşitli isimlerle anılmaktadır; “çift cam cepheler”, “aktif cepheler”, “enerji etkin cepheler”, “çift kanatlı cepheler”, “havalandırmalı

cepheler'' gibi birçok tanımlaması mevcuttur. Saelens, (2002) doktora tezinde çift kabuk cepheleri "hava kanalı olarak kullanılan bir ara boşlukla ayrılmış iki şeffaf yüzeyden oluşan bir cephe yapısı " şeklinde tanımlamaktadır.

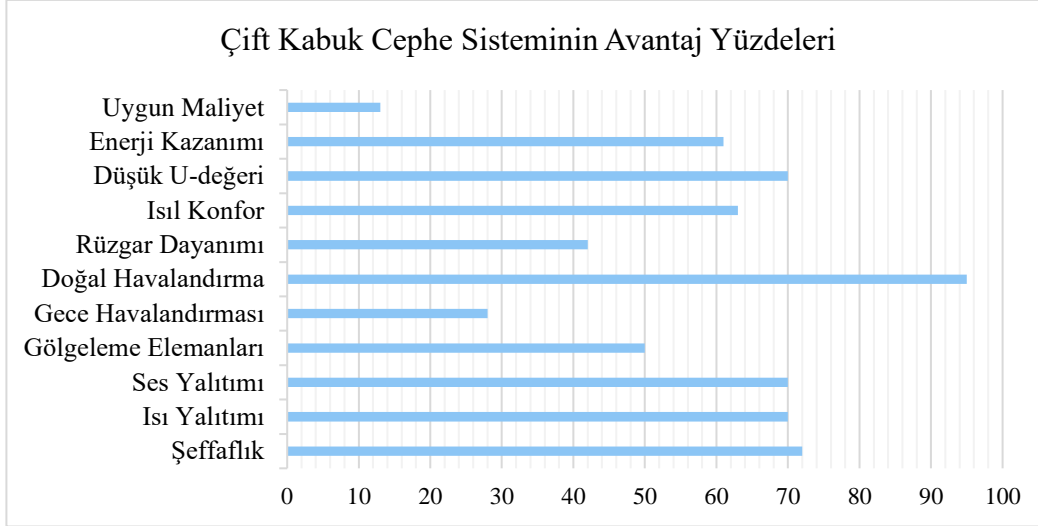
Ching'e (2014) göre çift kabuk cepheler, ısıtma, soğutma ve aydınlatma için gereken enerjiyi azaltmak ve verimliliği artırmak amacıyla tasarlanmış cephe kaplama sistemleridir. Bu sistemler, pasif güneş toplama, gölgeleme, gün ışığı kullanımı, yalıtım ve doğal havalandırma gibi özellikleri cephe yapısına entegre eder. Genellikle, tampon kısmında ısıyı toplamak üzere bir hava boşluğu ve güneş radyasyonunu kontrol eden ayarlanabilir gölgeleme elemanları içerir. Cephe, iki veya üç camlı bir üniteyle, dış kısımda ise çalıştırılabilir paneller barındıran şeffaf veya lamine cam katmandan oluşur.

Çift kabuk cephenin katmanları dış cephe camı, iç cephe camı, tampon bölge olarak üçe ayrılabilir. Bu sistemin dış katmanı genellikle tek camlı ve şeffaf bir yapıdadır; binayı dış etkenlere karşı korurken doğal ışığın iç mekâna girmesine izin verir. İç katman ise düşük emisyonlu (low-e) veya güneş kontrol özellikli çift camlarla donatılarak enerji verimliliğini artırır (Poirazis, 2004). İç cam sabit veya açılabilir bir tasarıma sahip olabilir, böylece havalandırma ve bakım için esneklik sağlar. Bu iki katman arasında, genişliği 0.2 m ile 2 m arasında değişen bir boşluk yer alır ve bu boşluk, ısıl tampon görevi görür; binayı kuvvetli rüzgarlar, gürültü ve ses gibi etkenlerden korur. Hava kanalı olarak da adlandırılan bu alan, doğal hava akımı veya mekanik sistemlerle iklimlendirilebilir. Aynı zamanda, bu boşluğa yerleştirilen güneş kırıcılar, dış ortam koşullarından bağımsız şekilde güneş ışınlarını kontrol ederek iç mekân konforunu sağlar (Poirazis, 2004; İnan ve Başaran, 2013; Bonham, 2019).

Çift kabuk cephelerin ısıl performansı, geleneksel parametrelerin (Güneş Isısı Kazanımı Katsayısı (SHGC), U-Değeri ve iç cam sıcaklığı vb.) yanında, ara boşlukta hava akışı ve sıcaklığı gibi dinamik faktörlere bağlıdır. Bu parametreler, çift kabuk cephe sistemlerinin soğutma dönemi boyunca emilen güneş ışınımını ne oranda geri yansıttığını ve ve tampon bölge ile bitişik alanlar arasında doğal havalandırma sağlama kapasitesini belirler (Doebber and McClintock, 2006).

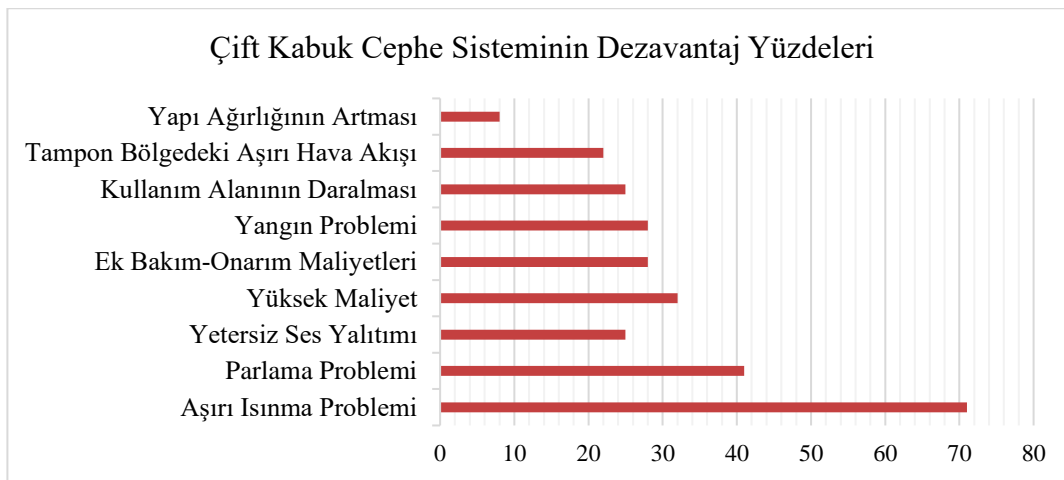
Şekil 2.7'de çift kabuk cephelerin avantajları incelendiğinde, doğal havalandırma özelliği, %90'ın üzerinde bir oranla en yüksek avantaj olarak öne çıkmaktadır. Bu, çift kabuk cephelerin, iç mekân hava kalitesini artırarak enerji verimliliği sağladığını göstermektedir. Isı

yalıtımı, şeffaflık, ses yalıtımı ve güneş kırıcı elemanların koruma işlevi gibi avantajlar da %60 ile %80 arasında yüksek yüzdelerle ifade edilmiştir. Ayrıca, ısı kazancı ve düşük U katsayısı gibi performans faktörleri, enerji etkinliği sağlama açısından önemli avantajlar olarak görülmektedir. Düşük maliyet avantajı ise diğer özelliklere kıyasla daha az oranda (%10 civarında) vurgulanmıştır.



Şekil 2.7: Çift kabuk cephelerin avantaj yüzdeleri (İnan ve Başaran, 2015).

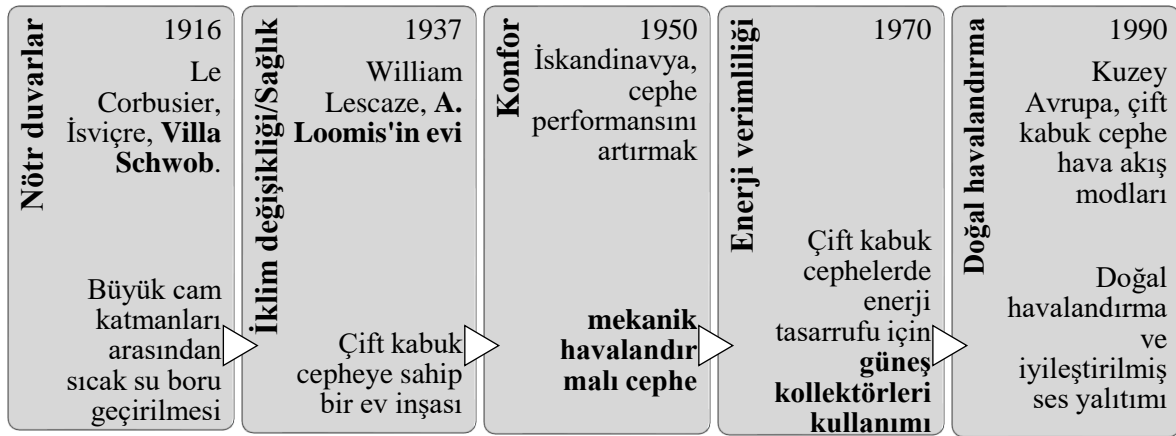
Şekil 2.8’de yer alan en belirgin dezavantaj ise %70’in üzerinde bir oranla aşırı ısınma problemleri olarak dikkat çekmektedir. Diğer öne çıkan sorunlar arasında parlama (%40 civarı) ve maliyet (yaklaşık %32) yer almaktadır. Bu bulgular, çift kabuk cephe tasarımlarının hem enerji verimliliği hem de termal konfor açısından dengeli bir şekilde ele alınmasını ve çevresel koşullara uygun cephe tipi seçilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.



Şekil 2.8: Çift kabuk cephelerin dezavantaj yüzdeleri (İnan ve Başaran, 2015).

2.4.1 Çift Kabuk Cephelerin Tarihçesi

Modern anlamda çift kabuk cephelerin ortaya çıkışı, 20. yüzyılın başlarına dayanmaktadır. Bu dönemde bina cepheleri, yalnızca yapıyı dış ortam koşullarından korumakla sınırlı kalmamış; aynı zamanda estetik, konfor ve enerji verimliliği gibi gereklilikleri karşılayacak şekilde tasarlanmaya başlanmıştır. 1970'li yıllara gelindiğinde ise, çift kabuk cephelerin kullanımı "enerji krizi" olarak adlandırılan dönemde ivme kazanmıştır. Şekil 2.9'da dönemlere bağlı gereksinimlere göre şekillenen çift kabuk cephe gelişimi kronolojik olarak sıralanmıştır.



Şekil 2.9: Çift kabuk cephelerin tarihsel gelişimi ve farklı dönemlerdeki öncelikleri.

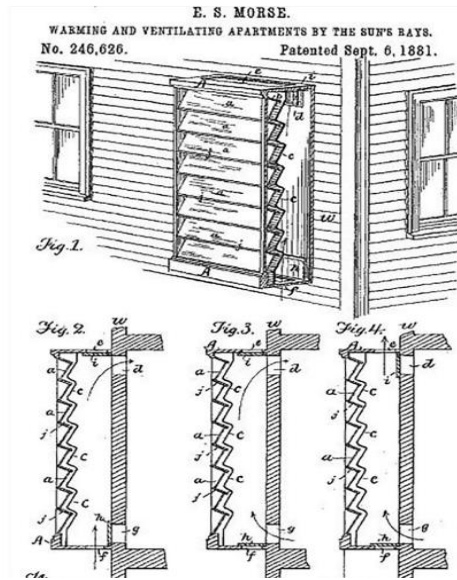
Geleneksel camlı tampon bölge veya tipik olarak delikli dekoratif tuğla veya ahşap çerçeveli tampon bölge cephe unsurları, çağdaş çift kabuk cephelerin öncüleridir (Şekil 2.10). Yerel formlardan bugün bildiğimiz şekline evrimi, inşaat ve malzeme teknolojisinde gelişim ile mümkün olmuştur. Çift kabuk cepheler, genel olarak giydirme cephelerin tarihini takip eder.



Şekil 2.10: Mısır'da bulunan Suhaymi; Japonya, Fukiya köyündeki Katayama tampon bölge konut müzeleri (Bonham, 2019).

Çift kabuk cephelere özgü tasarım çözümlerinin ortaya çıkışı, 1848'de dökme levha cam yapım teknolojisinin geliştirilmesi ve 1849'da Jean-Baptiste Jobard'ın mekanik olarak

havalandırılan çok katmanlı cephenin erken bir versiyonunu tanımlamasıyla gerçekleşmiştir. Jobard, çift kabuk cepheleri, çok kabuklu büyük şeffaf duvarlar olarak tanımlamış ve kabuklar arasındaki havanın, yaz ve kış aylarında iç mekânı iklimlendirmesi fikrini öne sürmüştür. Sir Joseph Paxton tarafından 1851'de tasarlanan Londra'daki Crystal Palace, bu yeni malzeme teknolojisinden yararlanmış olup giydirme cephenin uygulanmış ilk örneklerinden biri olarak kabul edilmektedir. Crystal Palace'ın tasarımında kullanılan büyük şeffaf camların amacı sera etkisi yaratılarak iç mekânın ısı konforuna destek olmaktır. Şekil 2.11'de 1881 yılında botanikçi Edward Morse'un, "güneş ışınlarının karanlık bir yüzeye düşerek yüzeyi ve temas halindeki havayı ısıtması" prensibiyle ilk güneş duvarını (Trombe) inşa edip patentini aldığı çizim görülmektedir (Anđelković et al., 2012, Bonham, 2019).



Şekil 2.11: Edward Morse'un ilk trombe duvar çizimi (Bonham, 2019).

1903 yılında Almanya'nın Giengen kentinde Richard Steiff tarafından tasarlanan, günümüzde de kullanılmakta olan Steiff Fabrikası, ilk gerçek çift kabuk cephe sistemi olarak inşa edildi (Şekil 2.12). Yapı tasarımında öncelik, bölgenin soğuk havasını ve kuvvetli rüzgarlarını hesaba katarak gün ışığından maksimum düzeyde faydalanmaktır. Aynı zamanda sıcak havalarda boşluğun havalandırılmasıyla iç mekân konforu sağlanmıştır. Yapısal çelik çerçevenin önünde bina yüksekliğinde cam katman bulunmaktadır. Tampon bölge genişliği 25 cm olup iki kabuk birbirine çelik kirişlerle bağlanmaktadır (Bonham, 2019). Aynı yıl Post Office Savings Bank için Viyana'da açılan tasarım yarışmasında Otto Wagner, ısı kayıplarını önlemek amacıyla çatı ışıklığında kullandığı çift kabuk sistemi ile birinci olmuştur (Şekil 2.13) (Waldner et al., 2007).



Şekil 2.12: Steiff Fabrikası'nın bugünkü hali ve cephe kısmi kesiti (Solla, 2011).

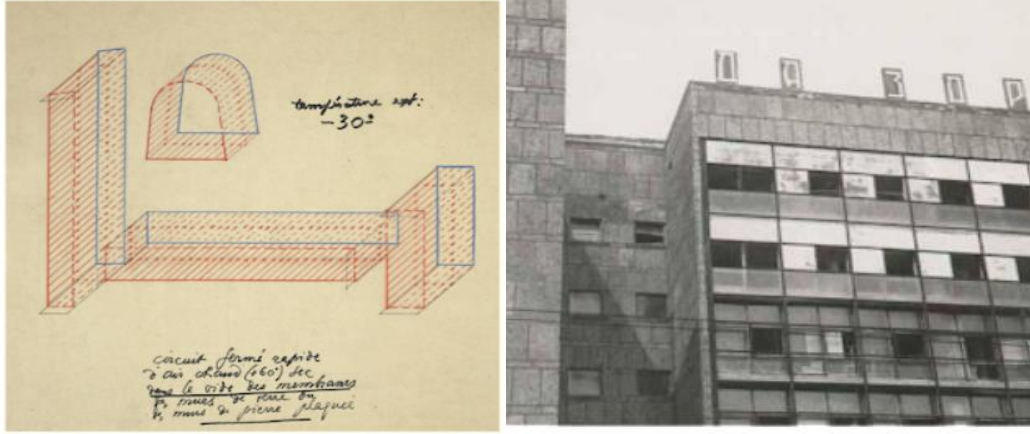


Şekil 2.13: Post Office Savings Bank binası çift kabuk çatı ışıklığı (Mindel, 2024).

20. yüzyılın ilk yarısında, cam giydirme ve çift kabuk cephelerin, doğal aydınlatma ve ısıtma verimliliğini artırdığı gözlenmiştir. Mekanik soğutma sistemlerinin gelişmesiyle de hava kirliliği ve gürültüden izole iç mekân konforu yakalamak başlıca tasarım parametrelerinden biri olmuştur. Özellikle doğal aydınlatma ve havalandırma unsurlarına odaklanan Le Corbusier, ‘mur neutralisant’ yani ‘nötrleştirici duvar’ (iç-dış ortam arasında ısıl olarak koşullandırılmış hava boşluğu ile dengeleme) ve ‘respiration exacte’ yani ‘tam solunum’ (hem sıcaklık hem de nem kontrolünü sağlayan mekanik havalandırma) fikirlerini ortaya atmıştır (Bonham, 2019; Solla, 2012).

Corbusier, bu iki fikrin birbiriyle bağlantılı olarak kullanılmasını amaçlamış ve çeşitli araştırmalar ve deneyler yaparak çift kabuk cephelerin temel konseptinin gelişiminde önemli bir rol oynamıştır. Mur neutralisant fikrini ilk kez 1916'da Villa Schwob'da kullanmıştır. Moskova'da Centrosoyuz binasını tasarlayan Corbusier, çift kabuk cephe uygulamasında yer alan ara boşluk sayesinde, havanın sürekli sirkülasyonunu sağlamayı ve yıl boyunca 18°C civarında sabit tutulmasını planlamıştır. Şekil 2.14'da Centrosoyuz (1933) binasının fikir aşamasındaki çizimi ile inşa edildikten sonraki görünüşü verilmiştir. Daha sonralarında, Cite

de Refuge (1929) ve Immeuble Clarte (1930) binalarında da çift kabuk cephe sistemini kullanmıştır. Benzer biçimde çalışmalar yapan Mimar Moisei Ginzburg, Rusya’da Narkomfin binasında (1928) aynı sistemi uygulamıştır (Heimrath, 2005; Solla, 2012). Aynı dönemde birçok mimar, binalarda hava sızdırmazlığı ve ısı kayıplarının kontrolü gibi amaçlar doğrultusunda çift kabuk cephe sisteminin gelişimini destekleyen araştırmalar ve uygulamalar gerçekleştirmiştir.



Şekil 2.14: Corbusier'in Centrosoyuz binası çizimi ve görünüşü (Solla, 2012).



Şekil 2.15: İngiliz Şeker Firması binası cephesi (URL-6).

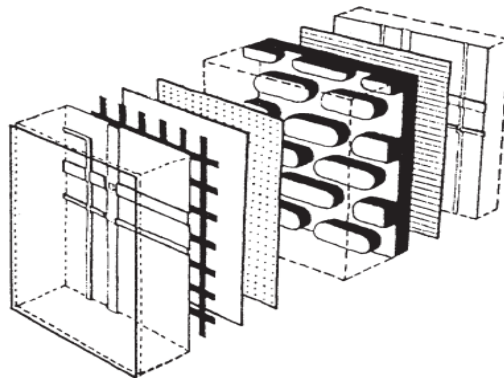
Şekil 2.15’de dönemin enerji verimliliği bakımından öncüsü kabul edilen iki katlı çift kabuk cepheye sahip İngiliz Şeker Firması verilmiştir (Pomponi and Piroozfar, 2015). 1973-1979 yıllarında, yükselen enerji krizi ve artan enerji korunum araştırmalarıyla birlikte, pasif tasarım konseptleri daha yaygın bir biçimde benimsenmeye başlanmıştır. Çift kabuk cephelerin tarihinde iki önemli dönüm noktası bu dönemde, enerji üzerine yapılan araştırmalarla yaşanmıştır. Bunlardan birincisi Şekil 2.16’de gösterilen Occidental Kimya Merkezi (1978) ikincisi ise Prudential Enerplex Ofis Kompleksi (1982) binasıdır. Her iki ofis binası da çift kabuk cephe sistemine sahip, düşük enerji tüketimi yapan bina konseptiyle tasarlanmıştır

(Bonham, 2019; Barnaş, 2014). Le Corbusier'in mekanik havalandırma fikrini içeren Occidental Kimya Merkezi, çift kabuk cephenin ilk modern örneği olarak kabul edilebilir (Boake, 2002).



Şekil 2.16: Occidental Kimya Merkezi, ısıl bölgeleme, ofis binası görünüşü ve çift kabuk cephe sistemi havalandırma şeması (Boake and Harrison, t.y.).

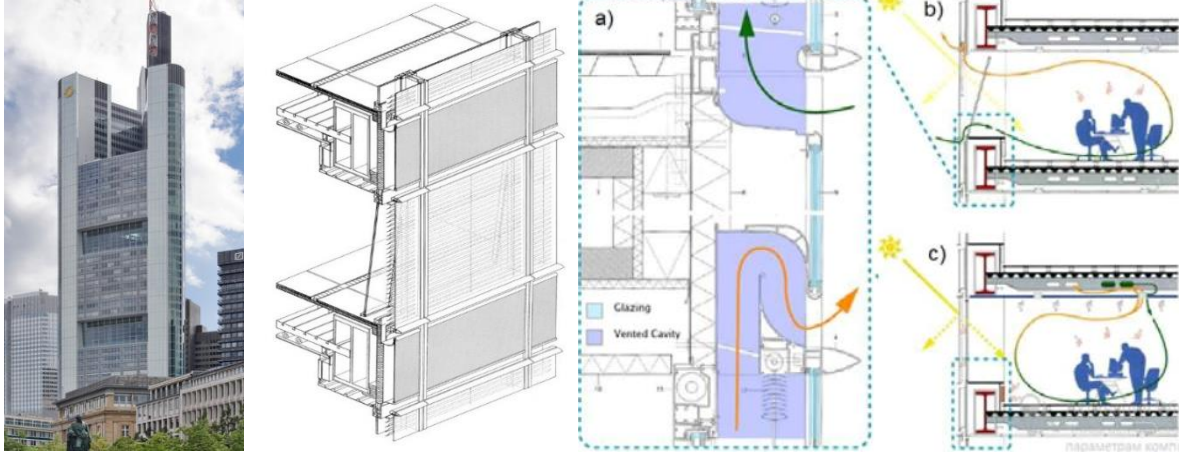
1981'de Rogers ve Davies, Polyvalent (çok değerlilik özelliği taşıyan) cephe/duvar kavramını geliştirmeye başladılar (Şekil 2.17). Polyvalent cephe, kışın ısı kaybını önlemek, yazın ısı kazancını düşürmek için geliştirilen, kendi enerjisini üretebilen, farklı işlevleri bir arada barındırabilen ve iklime duyarlı cephe tasarım ihtiyaçlarına karşılık ortaya çıkmıştır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan "Akıllı cephe" terimi, Rogers ve Davies'in bu çok işlevli cephe anlayışından ilham alınarak geliştirilmiştir (Knaack ve Klein, 2007).



Şekil 2.17: Rogers ve Davis'in Polyvalent Cephe'si (Knaack and Klein, 2007).

20. yüzyılın sonlarında Avrupa'da enerji tüketimini azaltma hedefiyle mekanik havalandırma çift kabuk cephe sistemleri yaygınlaşmaya başlamıştır. Özellikle yüksek katlı ofis binalarında rüzgâr yüküne dayanıklılığı ve enerji verimliliği sağlaması sayesinde bu sistemler, en çok tercih edilen seçenekler arasında yer almıştır. Bu döneme damga vurmuş binalar, 1997'de

dünyanın ilk ekolojik gökdeleni olarak anılan Foster and Partners tasarımı olan Frankfurt'taki Commerzbank Tower ve Ingenhoven tarafından tasarlanan Essen'deki Rwe AG Headquarters'dır (Anđelković et al., 2012). Doğal havalandırılmalı çift kabuk cepheye sahip Commerzbank (Şekil 2.18), 2008 yılından beri yenilenebilir enerji kullanmakta olup 2040'a kadar net sıfır karbon hedefine ulaşmayı amaçlamaktadır (URL-7).



Şekil 2.18: Commerzbank binasının görünüşü, cephe aksonometrik çizimi, cephe plan (a) ve kesiti (b) (Dragišić, 2016; URL-7).

Sauerbruch Hutton tarafından tasarlanan ve 1998'de inşa edilen Fotonik Merkezi'nin şaft tipi çift kabuk cephesi, cam paneller ve metal levhalardan oluşmaktadır (Şekil 2.19). Yatayda kat yüksekliğinde bölümlere ayrılırken, dikeyde binanın ikiz sütunlarıyla belirgin bir şekilde bölümlendirilmiştir. Şaft boşlukları sayesinde hava, konvektif olarak dolaşmakta ve her katın kontrollü doğal havalandırmasını sağlamaktadır. Tampon bölgeye sabit güneşlikler yerleştirilmiştir (URL-8).

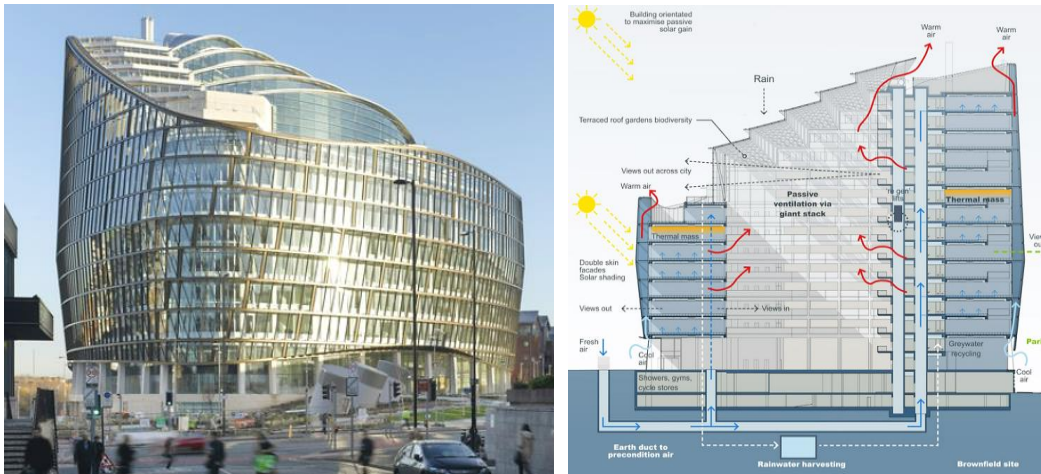


Şekil 2.19: Fotonik Merkezi'nin cephesi ve hava akışını gösteren görünüş ve kesitler (URL-8).

21. yüzyılda, gelişen teknoloji ve akıllı malzemeler, çift kabuk cephelerin performansını önemli ölçüde artırmakta ve bu cepheleri daha verimli, sürdürülebilir hale getirmektedir. Özellikle, elektrokromik camlar, BIPV (fotovoltaik entegre binalar) ve hidrojel teknolojileri gibi akıllı malzemeler, enerji talebini ve binaların karbon ayak izini azaltmaktadır. Elektrokromik camlar, ışık geçirgenliğini ayarlayarak ısı kontrolü sağlarken, BIPV sistemleri cephe yüzeylerinde enerji üretimi yaparak sürdürülebilirliğe katkı sağlar (Ergin, 2019; Okumuş, 2020). Şekil 2.20’de Decker Yeadon tarafından 2011 yılında tasarlanan Homeostatik cephe görülmektedir. Cephe, dış ortamın güneş ışığı ve sıcaklık gibi değişkenlerine uyum sağlayarak iç mekân koşullarını kontrol altına almayı amaçlar. Bu sistem, doğal prensiplerle çalışarak, cepheyi çevresel faktörlere göre otomatik olarak ayarlar ve enerji verimliliğini artırır (URL-9). Şekil 2.21’te ise fotovoltaik entegre çift kabuk cepheye (BIPV) sahip 2012 yılında inşa edilmiş One Angel Square binası görülmektedir.



Şekil 2.20: Homeostatik cephenin minimum, orta ve maksimum gölgelendirme etkisi ve homeostatik kaplı bina cephesi (URL-9).



Şekil 2.21: One Angel Square görünüşü ve binanın kesiti (URL-14).

Monarch Sanctuary, New York City’de sekiz katlı bir ticari binadır ve esas olarak monarş kelebeklerinin koruma alanı olarak 2019 yılında tasarlanmıştır (Şekil 2.22). Bina bir çift kabuk cepheye entegre biyoçeşitlilik projesidir. Dış katmanda camla doldurulmuş diagrid yapı (akıllı bir yapısal montaj konfigürasyonu) ve iç katmanda EFTE folyo "yastıkları" bulunan çift kabuk cephe sistemidir. Cephe, "dikey çimenlik" şeklinde olup kelebeklere yaşam alanı sunarken iç mekânda sıcaklık ve nemi kontrol etmektedir (URL-11).



Şekil 2.22: Monarch Sanctuary, diagrid yapısı ve cephe tasarımına yönelik görselleştirmeleri (URL-11).

Tüm bu yenilikçi malzemelerin entegre edilmesi, cephelerin dinamik olarak çevresel koşullara uyum sağlamasını ve enerji verimliliğinin en üst düzeye çıkmasına olanak tanımaktadır. Aynı zamanda, dijital kontrol sistemleri ve IoT teknolojileri kullanılarak cephe bileşenlerinin otonom çalışması sağlanabilmekte olup çift kabuk cephelerin sadece enerji verimli olmaktan öte, akıllı ve sıfır karbonlu binaların temel taşı haline gelmesini sağlamaktadır.

Sonuç olarak, günümüz teknolojilerinin çift kabuk cephelerle entegrasyonu, bina performansını optimize ederken sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir adım oluşturmaktadır. Bu yenilikler, gelecekteki yapıların iklim değişikliğiyle mücadelede daha etkili olmasını sağlayacaktır. Tablo 2.1, çift kabuk cephe sistemlerinin tarihsel gelişimini kronolojik biçimde gösterirken, döneme damgasını vuran olaylara, binalara, binaların özelliklerine, mimarlara amaç-sonuç kapsamında yer vermektedir.

Tablo 2.1: Bir cephe teknolojisi olarak çift kabuk cephelerin evrimi.

| Yıl / Zaman dilimi | Öne Çıkan Binalar/Olaylar ve Ref. | Mimar/ Önemli Kişiler | Amaç / Önemli Gelişme | Sonuç / Etkiler | Binanın Özellikleri |
|---|--|-----------------------|--|--|--|
| 1849-1882 Çift Kabuk Cephe Kavramının Ortaya Çıkış Aşamaları | Mekanik havalandırmalı çok katmanlı cephe prototipi / 1849 | Jean-Baptiste Jobard | Cepheler arasında hava boşluğuyla ısı yalıtımı ve enerji tasarrufu sağlamak hedeflendi | Jobard'ın bu önerisi, çift kabuk cephelerin gelişiminde başlangıç noktası oldu. | Paxton, sergi salonunu dönemin en büyük plaka cam (254 x 1245 mm) ile tasarladı. |
| | Seralar / Greenhouses | Joseph Paxton | -Şeffaflık ve ışık geçirgenliği. -Sera etkisi ile ısınan havanın iç mekâna dağıtılması. | Paxton'un binası, endüstriyel tasarımda yeni bir çağ açtı. | Morse, evinin cephesinde koyu renkli ısı emici duvarın önünde cam yüzeye sahip bir güneş ısı toplama duvarı inşa etti. |
| | Kristal Saray / 1851, Birleşik Krallık | | Edward Morse Felix | Çalışan ilk çoklu duvar fikri Morse tarafından öne sürdürüldü. | |
| | Erken Trombe duvarı dönemi: Botanikçi E. M. Felix'in evi. | | | | |
| 1903 İlk Çift Kabuk Cephe | Margarete Steiff Oyuncak Fabrikası | Eisenwerk München AG | Doğal aydınlatma. Rüzgâr izolasyonu. Termal konfor. | Avrupa'daki ve tarihteki ilk tamamen çift kabuk cephe uygulaması. | Bina yüksekliğinde ÇKC tipine sahiptir. Tampon bölge genişliği 25 cm'dir. Çift cam ve ısıtma boruları kullanılmıştır. İlk doğal havalandırmalı cephe niteliğindedir. |
| 1910-1950 Cam Cephelerin Yükselişi ve Deneysel Yapılar | Post Office Savings Bank / 1912, Viyana | Otto Wagner | Enerji tasarrufu. Doğal aydınlatma. Isının korunumu. | Doğal aydınlatma ve şeffaflık sayesinde, elektrikli aydınlatmanın yüksek maliyetinden kaçınıldı. | Çatı ışıklığında çift kabuk sistemi kullanıldı. |
| | Villa Schwob / 1916, İsviçre | Le Corbusier | Isı kontrolü. Hava geçirmezlik. Güneş kontrolü. | " Mur Neutralisant " fikrini ilk kez hayata geçirdi. | İki cam tabaka arasına ısıtma elemanları yerleştirildi. Mekanik havalandırma sistemi sağlandı. |
| | Zuev İşçi Kulübü / 1926, Moskova (Barnaş, 2014) | Ilya Golosov | Isı yalıtımı. Estetik. | Çift kabuk cephe kavramının gelişiminde öncü bir deneme olarak değerlendirilir. | Binanın silindirik cam köşesi, çift kabuk cam cepheye sahiptir. Cam ve çelik malzemeler kullanılmıştır. |

Tablo 2.2 (devam)

| | | | | | |
|---|--|-----------------------------|--|--|---|
| 1910-1950 Cam Cephelerin Yükselişi ve Deneysel Yapılar | La Cite de Refuge / 1929, Paris | Le Corbusier | Enerji tasarrufu. Havalandırma. Isı ve güneş kontrolü. | ‘‘Mur Neutralisant’’ sistemi uygulandı. | Güney cephesindeki çift kabuk, cam katmanlar arasına ısıtma boruları yerleştirildi. Tampon bölge doğal havalandırmalıdır. |
| | Immeuble Clarte / 1930, Paris (Heimrath, 2005) | | | | |
| | Narkomfin İşçi Konutları / 1929, Moskova | Ginzburg & Milinis | Isı kazancı ve konfor. | Çift kabuk cephe uygulaması denendi. | Doğu cephesinde sürekli şeffaf şerit formatında koridor tipi çift kabuk cephe sistemi uygulandı. |
| | Centrosoyuz Binası / 1933, Moskova (Bonham, 2019) | Le Corbusier | Isı kazancı. Enerji verimliliği. Doğal havalandırma. | Çift kabuk cephelerin öncüsü sayılabilecek yapıdır. | ‘‘Mur Neutralisant’’ ve ‘‘Respiration Exacte’’ sistemlerine sahiptir. |
| | Alfred Loomis Evi / 1937, New York (Bonham, 2019) | William Lescaze | Sağlık. Isı kazancı. | Lescaze, ‘‘mur neutralisant’’ konseptine benzer 'çift kabuk' bir ev tasarlamıştır. Çift kabuk cepheler için erken deneylerden biridir. | Evin etrafını saran 2 fit (60 cm) genişliğinde ikinci bir katman tasarlandı. İç mekândan ayrı iklimlendirilen tampon bölge ile yoğunlaşma riski olmadan nem optimum seviyede tutuldu. |
| 1957-1969 Yeniden Doğuş | Hava Akış Pencereleleri & EKONO Genel Merkez Binası / 1957-1967, İsveç (Arons, 2000) | Alvar Aalto & EKONO Şirketi | Temperlenmiş temiz hava sağlamak. Isı kaybını önlemek. Enerji verimliliği. Termal konfor. | 1957'de hava akış pencereleleriyle ilgili ilk patent İsveç'te alındı. 1967 yılında EKONO Şirketi Alvar Aalto ile birlikte, Helsinki kentinde hava akış pencereleleriyle donatılmış ilk ofis binasını inşa etti. Hava akış pencereleleri, çift kabuk cephelerin çalışma prensibine benzer. Dolayısıyla hava akışlı pencereleler, çift kabuk cephelerin gelişimine destek olmuştur. | |
| | Bayerische Vereinsbank / Stuttgart, 1969 (URL-12) | Behnisch & Partner | Akustik. Sürdürülebilirlik. | Bina, iklim stratejisinin bir parçası olarak 1999'da yenilendi. Sonuçta, daha çevre dostu bir ofis binası elde edildi. | Akustik yalıtımı sağlamak için cephe çift cephe olarak tasarlandı. |
| 1970 Enerji Krizi ve ÇKClerin Yükselişi | Occidental Kimya Merkezi / New York (Boake ve Harrison, t.y.) | Cannon Design | Isı korunumu. Enerji verimliliği. | Le Corbusier'in havalandırma konusundaki fikirlerini içeren şeffaf ÇKC'nin ilk modern örneği olarak kabul edilebilir. | Tampon bölge arası 1,5 metredir. Kışın ön ısıtma fonksiyonuna sahiptir. 20 cm boşluk, sıralar halinde gruplandırılmış bir gölgeleme sistemini barındırıyor. |
| | İngiliz Şeker Firması / UK, 1973 (Bonham, 2019) | Arup Associates | Enerji verimliliği. Sürdürülebilirlik. Doğal aydınlatma ve Havalandırma. | Binanın cephesi, 1970'lerde enerji tasarrufu ve sürdürülebilirlik konusunda öncü bir tasarım olarak kabul edilir. | Kışın ısı kayıplarını önlemek, yazın ise güneş ısı kazancını minimumda tutma fikriyle tasarlanmış sahip ilk cephe. |

Tablo 2.3 (devam)

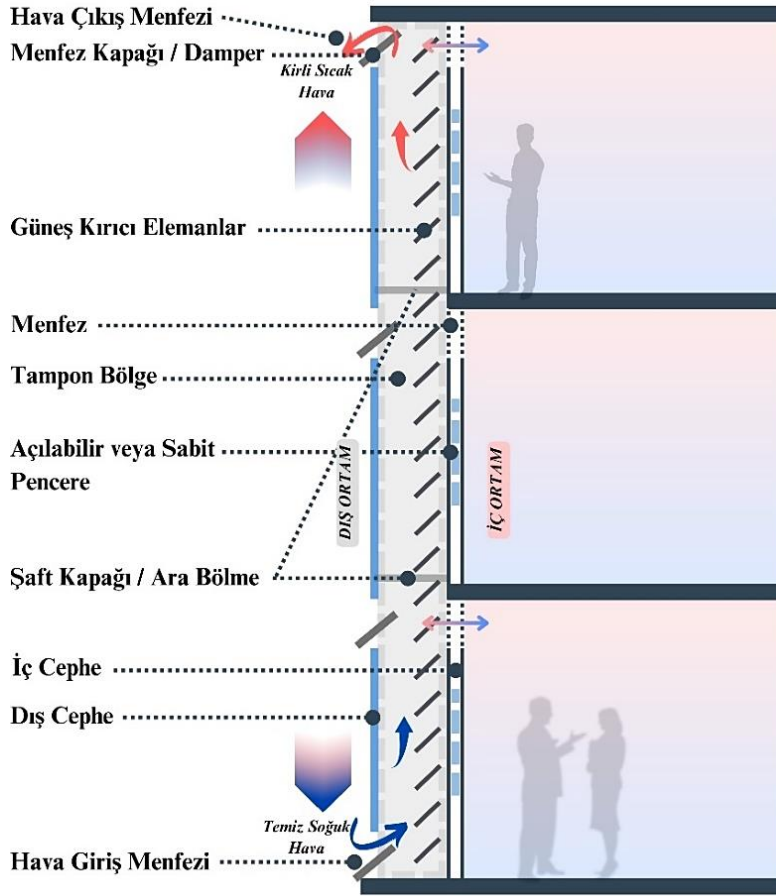
| | | | | | |
|--|--|------------------------|--|--|--|
| 1980-2000 Yüksek Teknoloji ve Geniş Ölçekli Kullanım | Polyvalent Cephe Tasarımı / 1981 (Knaack ve Klein, 2007) | Rogers & Davies | Hava sızdırmazlık. Çevre kontrolü. Bireysel kontrol. Enerji verimliliği | Çift kabuk cepheler, polyvalent cephelerin bir türü olarak görülebilir çünkü çift kabuk cepheler aynı zamanda çoklu işlevselliği destekleyebilir. | Genellikle modüler sistemler, ayarlanabilir paneller veya çeşitli malzemeler kullanılarak tasarlanır. Adaptiftir. Cephe, gerekli enerjiyi kendisi üretmesi yönünde geliştirildi. |
| | Arap Dünyası Enstitüsü / Paris, Fransa, 1987 (Bonham, 2019) | Jean Nouvel | Gün ışığı kazancı & kontrolü. Enerji verimliliği. Estetik. | Çok katmanlı-kinetik cephesiyle bu bina, otomatik gölgeleme elemanlarının ve kinetik cephe kullanımının öncüsüdür. | Kutu tipi çift kabuk cephe, binanın doğu cephesinde bulunur. Işığa duyarlı, hareketli metal diyafraamlarla donatılmıştır. |
| | Commerzbank Tower / Frankfurt, Almanya, 1997 | Foster + Partners | Enerji verimliliği. Doğal aydınlatma & havalandırma. | Üçgen atriyum bölümü, doğal havalandırılmalı kutu tipi çift kabuk cephedir. Dış cam, low-e kaplamalı 8 mm. kalınlığında çift camdır. Tampon bölge genişliği 252 cmdir. | Üçgen atriyum bölümü, doğal havalandırılmalı kutu tipi çift kabuk cephedir. Dış cam, low-e kaplamalı 8 mm. kalınlığında çift camdır. Tampon bölge genişliği 252 cmdir. |
| | Fotonik Merkezi / Berlin, 1998 (Knaack ve Klein, 2007) | Sauerbruch Hutton | Doğal aydınlatma & havalandırma. | Cephe düzleminde dikey olarak ayrılmış havalandırma şaftlarının, üstte birleşerek çift cepheyle çevrili alanın etkin bir şekilde havalandırılmasını sağlayan şaft-kutu cephenin erken bir modelidir. | Cephe düzleminde dikey olarak ayrılmış havalandırma şaftlarının, üstte birleşerek çift cepheyle çevrili alanın etkin bir şekilde havalandırılmasını sağlayan şaft-kutu cephenin erken bir modelidir. |
| 2000- Günümüz Adaptif Çift Kabuk Cephelerin Gelişimi ve Karbon Nötr Hedefleri | ARAG Kulesi / Düsseldorf, 2000 (Knaack ve Klein, 2007) | RKW; Foster + Partners | İç mekân konforu. Güneş ısı kazancı. Doğal aydınlatma & Havalandırma. | Şaft-kutu tipi çift kabuk cepheye sahiptir. 7 kat yüksekliğinde şafta sahip cephesi kutu pencere boşluklarından yukarı hava çeker. 8. Katta ise egzoz havası atılır. Tampon bölge 92 cm genişliğindedir. İç kabuğun dış yüzeyine gölgelendirme cihazları bulunur. | Şaft-kutu tipi çift kabuk cepheye sahiptir. 7 kat yüksekliğinde şafta sahip cephesi kutu pencere boşluklarından yukarı hava çeker. 8. Katta ise egzoz havası atılır. Tampon bölge 92 cm genişliğindedir. İç kabuğun dış yüzeyine gölgelendirme cihazları bulunur. |
| | 30 St Mary Axe Kulesi / Londra, 2003 (URL-13) | Foster + Partners | Doğal aydınlatma ve havalandırma. Rüzgâr izolasyonu. Enerji verimliliği. | Çift kabuklarla donatılmış cephe, binanın aerodinamik formuna uyum sağlayan üçgen cam panellerden oluşur. Pasif tasarım önlemleriyle birlikte %50 daha az enerji tüketmektedir. | Çift kabuklarla donatılmış cephe, binanın aerodinamik formuna uyum sağlayan üçgen cam panellerden oluşur. Pasif tasarım önlemleriyle birlikte %50 daha az enerji tüketmektedir. |
| | Homeostatik cephe / New York, 2011 (Engin, 2019; Okumuş, 2020) | Decker Yeadon | İç mekân konforu. Enerji verimliliği Sürdürülebilirlik. Güneş kontrolü. | Homeostatik cephe, iç mekân sıcaklıklarına duyarlı olarak otonom şekilde açılıp kapanan yalıtkan şeritlerden oluşur ve iki kabuk arasına yerleştirilir. Şeritler, iki kabuk arasına yerleştirilmiş olup ısı arttığında açılarak güneş kontrolü sağlar, düştüğünde büzülerek ısı dengesini korur. | Homeostatik cephe, iç mekân sıcaklıklarına duyarlı olarak otonom şekilde açılıp kapanan yalıtkan şeritlerden oluşur ve iki kabuk arasına yerleştirilir. Şeritler, iki kabuk arasına yerleştirilmiş olup ısı arttığında açılarak güneş kontrolü sağlar, düştüğünde büzülerek ısı dengesini korur. |

Tablo 2.4 (devam)

| | | | |
|---|---------------|---|--|
| One Angel Square, / Manchester, 2012 (URL-14) | 3D Reid | Enerji verimliliği & üretimi. Sürdürülebilirlik. | BIPV çift kabuk cephe. Binayı 2050 için öngörülen iklim verilerine göre tasarladılar. Enerji tüketiminde diğer ofis binalarına kıyasla %50, karbon ayak izinde ise %80 azalma potansiyeli gözlemlendi. |
| RMIT Design Hub, / Avustralya, 2012 (URL-16; Engin, 2019) | Sean Godsell | Sürdürülebilirlik. Enerji verimliliği & üretimi. Karbon nötr. | Cephe, iç hava kalitesini iyileştiren ve işletme maliyetlerini azaltan fotovoltaik hücreler, evaporatif (buharlaştırıcı) soğutma ve temiz hava girişleri içeren otomatik güneş gölgelendirme cihazları içerir. Cephe kendi enerjisini üretir. Sahip olduğu cam diskler iklime duyarlıdır ve ısı kazanç ve kayıplarını optimize eder. Akıllı /Kinetik – çift kabuk cephe dir. |
| SymBIO2 Bio-cepheler / 2013 (Schindler, 2016; Ergin 2019) | XTU Mimarlık | Sürdürülebilirlik. Enerji verimliliği & üretimi. | Mikro algleri ve CO2 emen bir bitki türünü yapı malzemesi olarak kullanılmıştır. ÇKC'nin tampon bölgesine yerleştirilen algler, ışığa maruz kaldığında dikey sera gibi davranırlar. Dolayısıyla enerji performansı sağlarken termal düzenleyici görevi de görürler. Ayrıca algler, dinamik gölgeleme görevi de görürler. |
| The Edge Binası / Amsterdam, 2014 (URL-10; URL-15) | PLP Mimarlık | Sürdürülebilirlik. Enerji verimliliği & üretimi. Karbon nötr. | Güney cephenin hava klapeleri güneş açılarına göre tasarlanmış olup ofis alanları için ek gölgeleme sağlar ve güneş ısısı kazancını düşürür. Ayrıca bina, cepheye ve çatıya entegre PV panelleri sayesinde enerji üretir. |
| Monarch Sanctuary New York, 2019 (Ergin, 2019; Salzano, 2021) | Cooper Hewitt | Sürdürülebilirlik. Enerji verimliliği & üretimi. | Çift kabuk cephe dış katmanı ve çapraz örgü çerçeveye desteklenen ETFE membran örtüden oluşur. ETFE katmanı, optimum nem seviyesini korumak amacıyla hidrojel kabarcıkları ve alg keseleri içerir; bu keseler, havayı ve bina atık suyunu artırır. |

2.4.2 Çift Kabuk Cephelerin Çalışma İlkeleri

Çift kabuk cepheler, binanın ısı performansını artırmak, doğal havalandırmayı teşvik etmek ve enerji tasarrufu sağlamak amacıyla geliştirilmiş sistemlerdir. Bu sistemlerin temel çalışma prensibi, gölgelendirme elemanlarını barındıran iki kabuk arasındaki boşlukta, hava akışını yöneterek binanın enerji performansını optimize etmeye dayanır. Şekil 2.23'te çift kabuk cephe sisteminin temel bileşenleri ve bu bileşenlerin açıklamaları gösterilmektedir. Ayrıca çift kabuk cephe sisteminin çalışma prensibi şematik biçimde ifade edilmiştir.

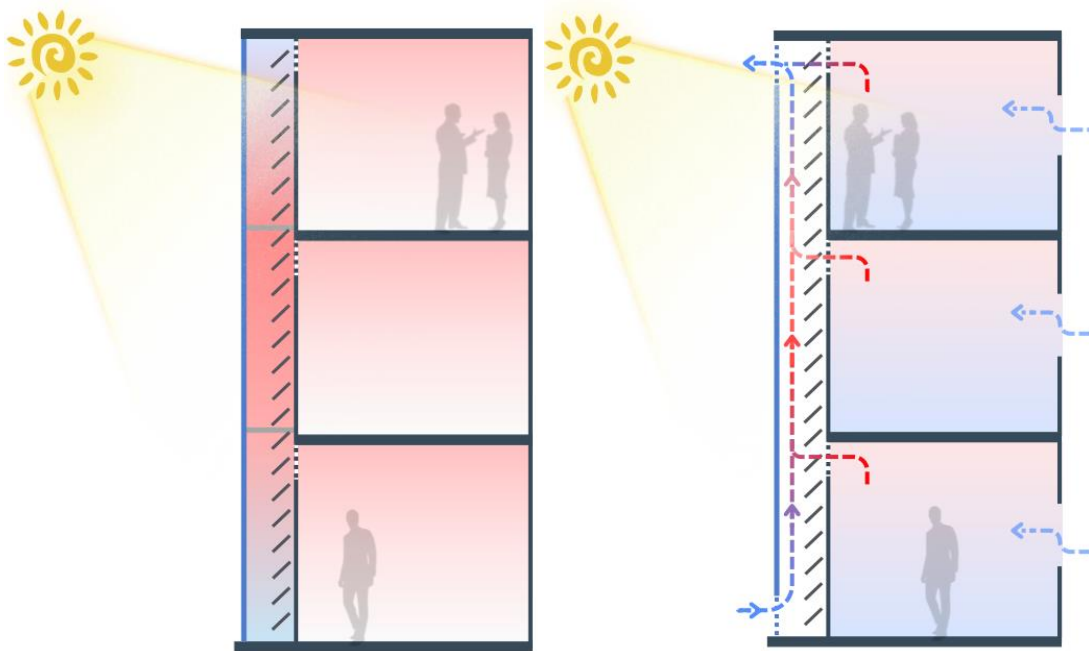


Şekil 2.23: Çift kabuk cephe sisteminin bileşenleri ve konsept şeması (Literatür taraması sonucu yazar tarafından oluşturulmuştur).

Çift kabuk bir cephe sisteminin en önemli unsuru, birincil mekanizması ve buna bağlı enerji dengesidir. Birincil mekanizma, havalandırma prensibine dayanır. Çift kabuk cephelerin tampon bölgelerinde baca etkisini kullanarak doğal havalandırma sağlayan sistemler olduğu göz önüne alındığında, bu sistemlerin pasif olarak binanın enerji performansına katkıda bulunduğu ifade edilir (Pelletier et al., 2023).

Dış cephe, binayı dış ortamın aşırı koşullarından, gürültüden, kirlilikten ve güneş radyasyonunun etkilerinden korur. Güneş radyasyonunu optimize etmek için genellikle gölgelendirme cihazları Şekil 2.24'te bulunan şemada da görüldüğü gibi iki kabuk arasındaki tampon bölgeye yerleştirilir (Zhou and Chen, 2010).

Çift kabuk bir cephe sisteminin ısı transferi iletim, konveksiyon ve radyasyon yoluyla gerçekleşir. Isıl davranış, yaz, kış ve ara dönemler için farklılık gösterir. Dış ortam ile iç ortam arasında gerçekleşen ve ısı farkından ortaya çıkan yığın etkisiyle ve güneş radyasyonu ile tampon bölgede kazanılan ısı, dış ortamdan alınan havayla beslenir ve atık sıcak hava menfezlerden dışarı atılır. Soğuk havalarda çift kabuk cephe, güneş ışığı altında bir ısı değiştirici görevi görür, böylece iç cam cephe sıcaklığı neredeyse oda hava sıcaklığına eşit olur ve bu da ısıl konforu artırır (Bonham, 2019; Zhou and Chen, 2010; Heimrath et al., 2005).

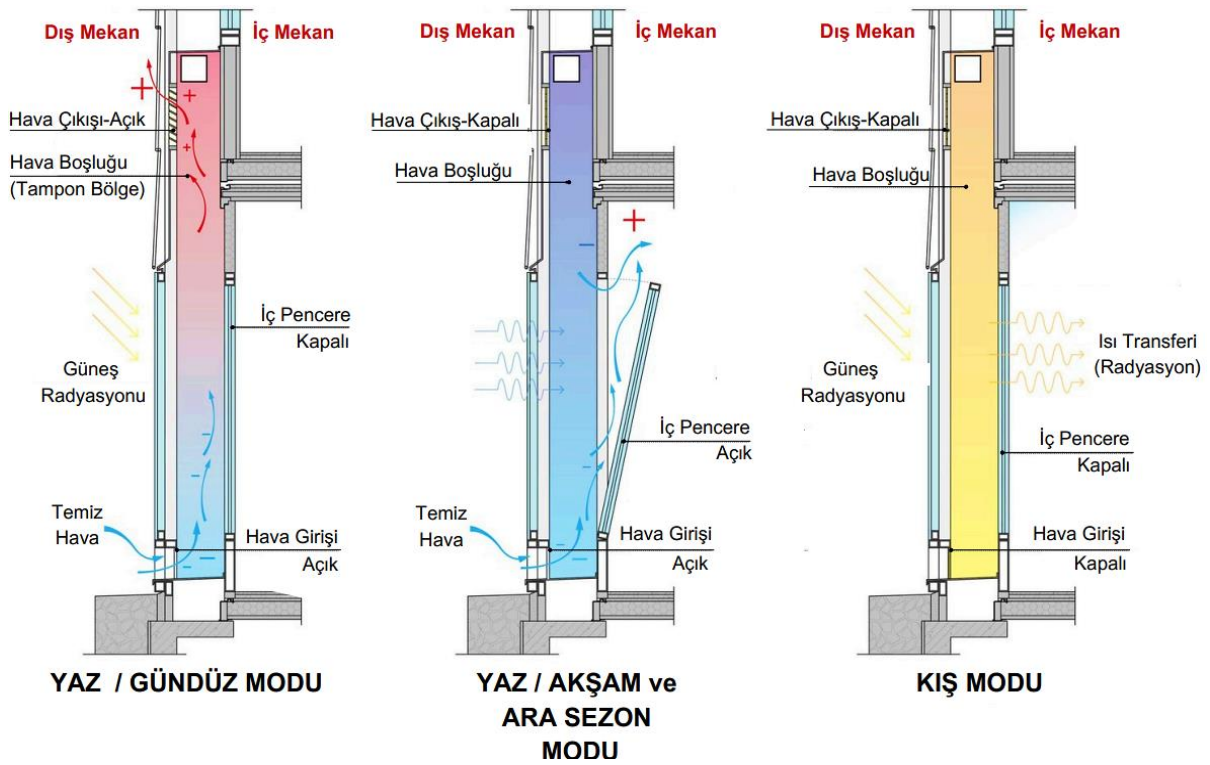


Şekil 2.24: Havalandırmaz ve havalandırmalı çift kabuk cephenin şematik gösterimi (Literatür taraması sonucu yazar tarafından oluşturulmuştur).

Çift kabuk cephe sistemine sahip binalar ara boşluk sayesinde ek bir yalıtım katmanına sahiptir. Bu yalıtım, ısı kaybı/kazançları üzerinde etkilidir. Şekil 2.25'te görüldüğü üzere, kış aylarında, çift kabuk cephenin menfezleri kapalı tutulur ve dolayısıyla güneş radyasyonuna maruz kalan boşluktaki hava ısınır. Isınan bu hava, bir tampon görevi görür ve dış ortam soğuk havasının iç mekâna ulaşmasını engeller. İç ortamın ısı kaybı azaltılır ve böylece ısıtma enerjisi tüketimi de düşer. Yaz aylarında ise, güneş radyasyonu ile boşluktaki hava ısınır, menfezlerin soğutma

dönemi boyunca açık tutulmasıyla ve baca etkisi ile sıcak hava yukarı doğru yükselerek doğal havalandırma yoluyla dışarı atılır. Bu durum, iç mekânın aşırı ısınmasını engeller ve soğutma yüklerini azaltır. Ayrıca, güneş kontrol elemanları ile birleştiğinde, güneşin ısıtıcı etkisi önemli ölçüde azaltırken, çift kabuk cephelerin pasif tasarım parametrelerinin kullanımıyla enerji tüketilmeden cephe havalandırılmış olur (URL-17; De Gracia et al., 2013; Stec and van Paassen, 2003).

Genel olarak, çift kabuk cephelerin çalışma prensibi, doğrudan iç mekân konforu ve kullanıcı yaşam kalitesini etkileyen dış koşullara (iklim, güneş radyasyonu, dış ortam koşulları, rüzgâr vb.) büyük ölçüde bağlıdır. Bu nedenle, bağlama özgü çift kabuk cephe tasarımı yapılması esastır (Charisi, 2017).

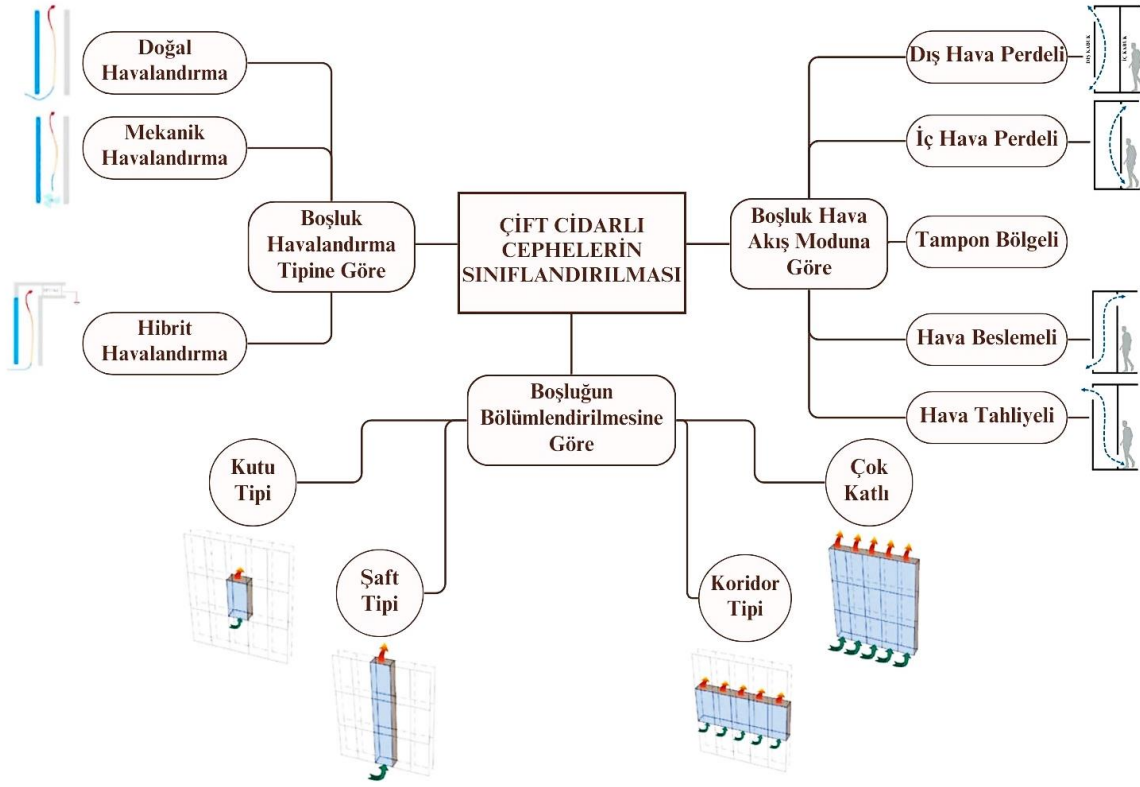


Şekil 2.25: Çift kabuk cephelerin iklim koşullarına göre havalandırma prensipleri (URL-18).

2.4.3 Çift Kabuk Cephelerin Sınıflandırılması

Binaya uygun çift kabuk cephe tipini seçmek enerjinin korunumu açısından ciddi bir öneme sahip olup tasarım aşamasında alınması gereken kararlardan biridir. Cephe tipini seçtikten sonra, sistemin fonksiyon ve performansını ve boşluğun fiziksel özelliklerini etkileyebilecek tasarımın ve teknik parametrelerin (kullanılan malzemeler gibi) tanımlanması gerekir.

Çift kabuk cephelerin birçok sınıflandırması vardır. Bunlar; boşluğun geometrisine (bölümlenmesine), boşluğun havalandırılması (hava akış modu) ve havalandırma türüne göre olmak üzere üç ana başlıkta incelenebilir. Şekil 2.26’da çift kabuk cephelerin üç ana başlıkta sınıflandırılması ve şematik gösterimleri diyagram biçiminde sunulmuştur.



Şekil 2.26: Çift kabuk cephelerin üç ana başlıkta sınıflandırılması ve şematik gösterimi (Al-awag and Wahab, 2022’den uyarlanmıştır).

2.4.3.1 Boşluk Havalandırma Türüne Göre Çift Kabuk Cephe

Bir binanın havalandırma sistemi, konforlu ve sağlıklı bir iç mekân iklimi oluşturmak için dikkat edilmesi gereken faktörlerden biridir. Çift kabuk bir cephede, binayı havalandırmak için tampon bölge kullanılır.

Çift kabuk cephe sistemi, boşluğun havalandırılma tipine göre üçe ayrılmaktadır. Bunlar;

1. Doğal Havalandırma
2. Mekanik Havalandırma
3. Hibrit Havalandırma

çift kabuk cepheler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Doğal havalandırmalı çift kabuk cepheler: Çift kabuk cephe sistemlerinin erken dönemlerinde, binalarda tercih edilmesinin temel sebeplerinden biri doğal havalandırma yönünden güçlü bir potansiyele sahip olmasıydı. Doğal havalandırmalı cepheler, hiçbir mekanik sisteme ihtiyaç duymadan, yalnızca baca ve rüzgâr etkilerinden kaynaklanan basınç farkı ile iç mekânın havalandırılmasına olanak sağlayan sistemlerdir. Çift kabuk cephelerde, dış katmanda bulunan menfezden boşluğa alınan hava, ısınan havanın yükselmesi prensibine göre güneş ışınlarının boşluktaki havayı ısıtmasıyla, hava yukarı doğru hareket eder. Sıcak atık hava ile temiz soğuk hava yer değiştirerek iç katmandaki menfezden içeri alınır (Loncour, 2005; Poirazis, 2004). Doğal havalandırmalı çift kabuk cepheler, binaların enerji verimliliğini pasif olarak iyileştirmeye yardımcı olarak termal konfor sağlayan sistemlerden biridir (Zhao et al., 2024).

Mekanik havalandırmalı çift kabuk cepheler: Mekanik havalandırma sistemleri, taze havanın kontrollü bir şekilde dağıtılabılmesine olanak sağlayan sistemlerdir. Bu sistemlerin temel amacı, tampon bölgedeki havayı yöneterek ısı konforu artırmak ve yoğunlaşma, kirlenme, gürültü gibi istenmeyen etkileri en aza indirmektir. Havanın boşluğa giriş ve çıkışı, fanlar, hava üfleme ve egzoz sistemleri gibi mekanik cihazlar aracılığıyla gerçekleştirilir. Tampon bölgeye çekilen hava yükselerek boşluktaki ısıyı uzaklaştırır; ardından dışarı atılır veya yeniden sirküle edilir. Sert hava koşullarının veya düşük hava kalitesinin bulunduğu bölgelerde, mekanik havalandırma sistemi tampon bölgedeki hava koşullarını sabit tutarak olumsuz etkileri azaltır (Loncour, 2005; Poirazis, 2004).

Hibrit sistem ile havalandırılan çift kabuk cepheler: Hem doğal hem de mekanik havalandırmanın bir arada kullanıldığı sistemlerdir. Bu sistemlerin tercih edilmesindeki asıl amaç, uygun hava koşullarında doğal havalandırmayı kullanarak enerji tasarrufu elde ederken, gerekli durumlarda mekanik havalandırma sistemiyle kontrol ve iç mekân konforu sağlamasıdır.

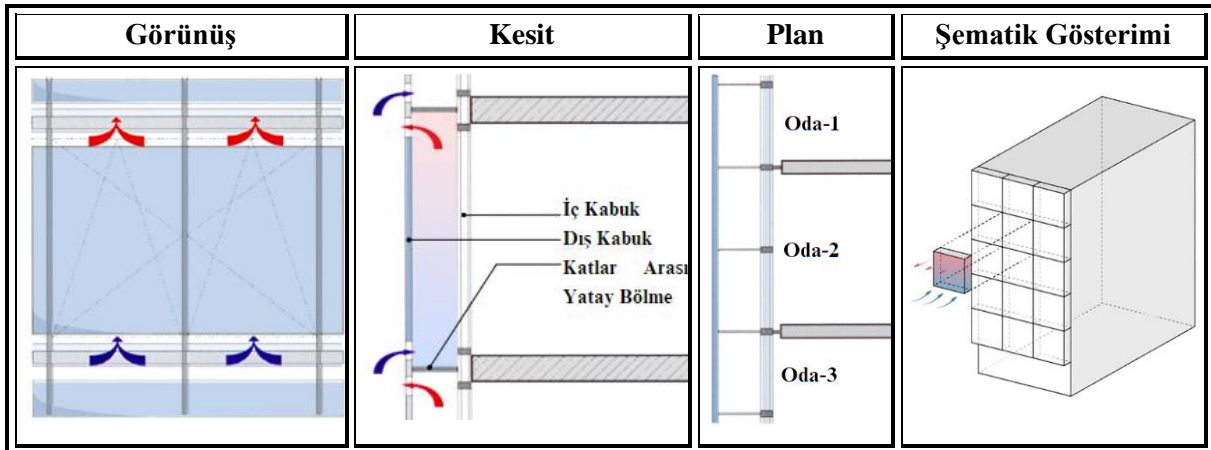
2.4.3.2 Boşluğun Bölümlendirilmesine Göre Çift Kabuk Cepheler

Boşluğun bölümlendirilmesine göre çift kabuk cepheler; kutu tipi çift kabuk cephe, şaft tipi çift kabuk cephe, koridor tipi çift kabuk cephe, çok katlı çift kabuk cephe olmak üzere 4 farklı sistem olarak incelenebilir.

Kutu Tipi Çift Kabuk Cepheler

Kutu tipi, inşaat endüstrisinde uygulanan ilk çift kabuk cephe tipidir. Sistemin iç kabuğunda açılabilir çift camlı pencere, dış kabuğunda ise genellikle tek camlı bir kaplama bulunur. Her modülün kendi hava giriş ve çıkış açıklıkları vardır ve bu açıklıklar sayesinde hem tampon bölge hem de iç mekân için doğal havalandırma sağlanmaktadır. Sistemin şekli, bina boyunca yatay ve dikey bölmelerle elde edilen kutu biçiminde bağımsız modüllerden oluşur (Hilmarsson, 2008). Kutu biçimli modüller arasında hava etkileşimi gerçekleşmediğinden, her modül ve mekân kendi havalandırma sistemine sahiptir. Bu tür cepheler, her mekân için ayrı havalandırma kontrolü gerektiren durumlarda tercih edilmektedir. Ayrıca, aynı katta bile gürültü ve koku geçirimsizdir ve ısı yönetimini her mekân için ayrı düzenleyebilmektedir. Tablo 2.5’de kutu tipi çift kabuk cephelerin şematik çizimleri verilmektedir.

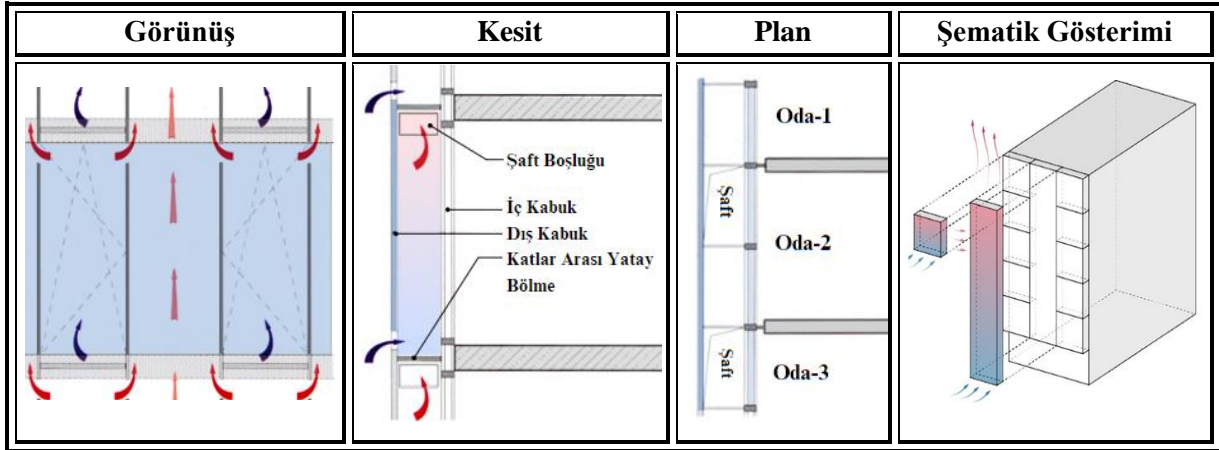
Tablo 2.5: Kutu tipi ÇKC sisteminin teknik çizimleri ve şematik gösterimi (Oesterle, 2001; Naddaf and Baper, 2023).



Şaft Tipi Çift Kabuk Cepheler

Şaft tipi çift kabuk (Tablo 2.6) cepheler, kutu tipi ile aynı yapım prensibinden üretilmektedir. Cepheye bir dizi kutu tipi modül yerleştirilir ve bu modüller, cephede yer alan dikey şaft kapakları vasıtasıyla birbirine bağlanır (Knaack ve Klein, 2007). Bu tip cepheler, maruz kaldığı güneş radyasyonu ile yüksek bir baca etkisi elde eder. Bu etkiyle alt kısımdan alınan taze hava, gerektiğinde açılabilen şaft kapakları sayesinde binanın en üst kotunda bulunan açıklıktan tahliye edilir (Hilmarsson, 2008). Ancak, gürültü denetimi, taze ve kirli havanın karışması ve yangın güvenliği gibi konularda yetersiz kalmaktadır. Yığın etkisi yükseklik ile doğru orantılı arttığından, şaft tipi çift kabuk cephe uygulanacak binanın toplam yüksekliği sınırlandırılmalıdır (Knaack ve Klein, 2007).

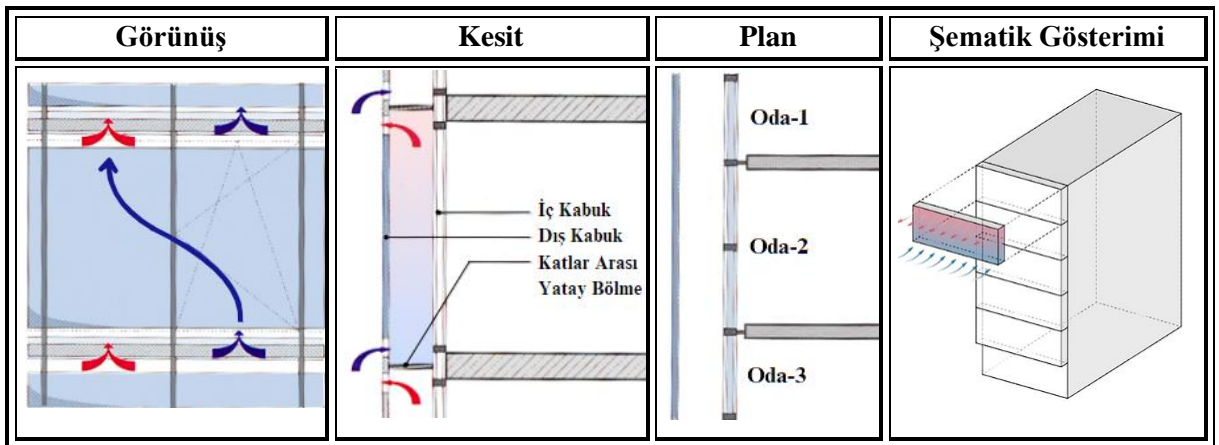
Tablo 2.6: Şaft tipi ÇKC sisteminin teknik çizimleri ve şematik gösterimi (Oesterle, 2001; Naddaf and Baper, 2023).



Koridor Tipi Çift Kabuk Cepheler

Kat yüksekliğinde çift kabuk cepheler olarak da anılan koridor tipi çift kabuk cepheler (Tablo 2.7), tampon bölgenin kat boyunca yatay bölümlenmesi ile elde edilir. Cephe kurgusu, her kattaki tampon bölgeler birbirinin üzerine gelecek şekilde oluşturulur. En fazla tercih edilen çift kabuk tipidir. Temiz havanın girdiği ve kirli havanın çıktığı menfezler, zemin kata yakın duvara ve tavana yerleştirilerek tüm katların ayrı ayrı havalandırılması sağlanır. Cephe yüksekliği, kat hizası ile sınırlı olduğundan, baca etkisi yaşanmaz ve her kat birbirinden bağımsız ısı davranış gösterir. Katların tampon bölge vasıtasıyla birbirine bağlı olması sebebiyle, kat içindeki iç mekânlar arasında gürültü kirliliği meydana gelebilir (Alemdağ ve Beyhan, 2017).

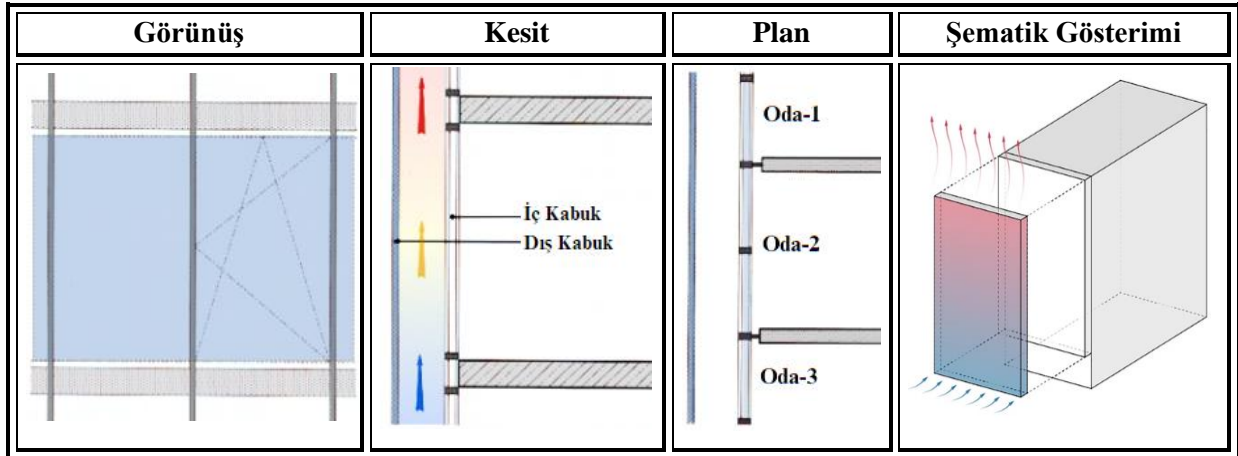
Tablo 2.7: Koridor tipi ÇKC sisteminin teknik çizimleri ve şematik gösterimi (Oesterle, 2001; Naddaf and Baper, 2023).



Çok Katlı Çift Kabuk Cepheler

Bu cephe tipinde, iki kabuk arasında yatayda ve düşeyde herhangi bir bölünme olmadan cephe boyunca sürekli bir hava boşluğuna sahiptir. Dolayısıyla tüm binanın çevresi, hava tabakası ile sarılıdır. Çok katlı çift kabuk cepheler yüksek baca etkisi sebebiyle iç mekân konforunu sabit tutabilmek için genellikle mekanik havalandırma desteğine ihtiyaç duyar. Hava giriş ve çıkış açıklıkları, sistem genelinde yığın efektlerini optimize etmek için en alt ve en üst kotta bulunur. Bina yüksekliğindeki bu tip cephelerde havalandırma modu genellikle dış hava perdesi ve tampon bölge tercih edilir. Kış aylarında, havalandırma açıklıkları kapatılarak binanın çevresinde oluşan sera etkisinden faydalanılarak termal konfor sağlanabilir. Yaz aylarında ise aşırı ısınmayı önlemek için menfezler yaz dönemi boyunca açık kalabilir. Havalandırma açıklıklarının az olması sebebiyle, dışarıdan gelebilecek gürültülere karşı iyi bir ses yalıtımına sahipken, herhangi bir bölüntü olmamasından dolayı hem katlar arasında hem de aynı kat içerisinde gürültü problemi yaşanabilir. Yangın konusu da bu tip cepheler için kritik bir konu olup çeşitli önlemler tasarım aşamasında alınmalıdır (Alemdağ ve Beyhan, 2017; Hilmarsson, 2008; Knaack and Klein, 2007). Tablo 2.8’de çok katlı çift kabuk tipinin şematik çizimleri verilmiştir.

Tablo 2.8: Çok katlı tipi ÇKC sisteminin teknik çizimleri ve şematik gösterimi (Oesterle, 2001; Naddaf and Baper, 2023).



2.4.3.3 Boşluktaki Hava Akış Moduna Göre Çift Kabuk Cepheler

Boşluktaki hava moduna göre çift kabuk cephelerin sınıflandırılması, havanın boşluktaki akış yönü ve giriş-çıkış noktaları ile ilgilidir. Bu sınıflandırmaya göre 5 farklı türde boşlukta hava akış modu bulunmaktadır. Tablo 2.9’da açık sistem, Tablo 2.10’da ise kapalı sistem olmak üzere bu sınıflandırmalara yer verilmiştir.

Tablo 2.9: Açık sistem hava akış modları ve şematik gösterimi (Naddaf and Baper, 2023; Memari et al., 2022).

| Açık Sistem | | |
|--------------------------|---|--|
| Tanım | Hava Tahliyeli | Hava Beslemeli |
| Özellikler | Bu hava akış modunda hava, iç mekândan dış mekâna doğru akar. İç mekânda biriken atık sıcak hava, cepheden fanlar yardımıyla veya yığın etkisiyle dışarı atılır. Cephe havalandırması ve atık havanın tahliyesi gerçekleştirilir. | Dış ortamdaki sağlanan taze hava, iç mekâna doğru akar. Doğal veya mekanik havalandırma sistemleri kullanılabilir. |
| Sistemin Temsili Görseli | | |

Tablo 2.10: Kapalı sistem hava akış modları ve şematik gösterimi (Naddaf and Baper, 2023; Memari et al., 2022).

| Kapalı Sistem | | | |
|--------------------------|--|---|--|
| Tanım | İç Hava Perdeli | Dış Hava Perdeli | Tampon Bölgesi |
| Özellikler | İç ortamdan alınan hava, tampon bölge içinde sirkülasyon sağladıktan sonra tekrar iç ortama döner. Dolayısıyla iç mekân sıcaklığı sabit tutulur. Bu hava akış modu doğal veya mekanik destek ile gerçekleştirilebilir. | Dış ortamdan alınan hava tampon bölgeyi havalandırdıktan sonra tekrar dış ortama salınır. Bu havalandırma modu, cepheyi saran bir hava tabakası ile oluşturulur. Cephe havalandırması sağlanır. | İç ve dış kabuk arasında oluşan tampon bölge hava geçirmezdir. Herhangi bir hava giriş çıkışı sağlanmaz. Tampon bölgenin içinde hapsolan hava, dış ortamın ani sıcaklık değişimine karşı sera etkisi göstererek optimum iç mekân konforu sağlar. |
| Sistemin Temsili Görseli | | | |

2.4.4 Çift Kabuk Cephelerin Enerji Performansına Etkisi

Bu bölümde, çift kabuk cephe sistemlerinin enerji performansına etkisi hakkında yapılan literatür taraması sunulmuştur. Çeşitli araştırmalar, bu cephe sistemlerinin enerji tüketimini azaltma ve bina performansını artırma potansiyelini ortaya koymaktadır.

Liu ve arkadaşları (2024) tarafından Çin'de gerçekleştirilen deneyde, farklı fotovoltaik (PV) oranlarına sahip çift kabuk cepheye entegre fotovoltaik sistemlerinin test edilmesi sonucu, %40 PV uygulamasının soğutma döneminde toplam enerji tüketimini %22,73; ısıtmada ise %16,84 oranında azalttığı belirlenmiştir.

Nanoteknolojik malzemelerin çift kabuk cepheye entegre edilmesi hakkında yapılan bir çalışmada, Kocaeli/Gebze'de bir ofis binası incelenmiş, enerji performansına etkileri DesignBuilder ve EnergyPlus simülasyon programları kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlarda, termokromik cam ve vakum yalıtım panelleri ile ısıtma yükü mevcut duruma göre %70 oranında azaltılmıştır. Doğu-batı cephesinde uygulanan çift kabuk senaryosunda ısıtma yükü mevcut duruma göre yaklaşık %25, soğutma ve birincil enerji talebi ise yaklaşık %20 oranında azaltılmıştır. Nano-çift kabuk senaryosunda ise mevcut duruma göre ısıtma yükünde %20, soğutma yükünde %40 ve birincil enerji tüketimi yaklaşık %30 oranında azalma izlenmiştir (Qurraie and Sertyamaç, 2024).

Çift kabuk cephelerin yaz aylarında aşırı ısınma probleminin çözümlenmesi için yapılan bir çalışmada, venedik panjurlu mekanik olarak havalandırılan çift kabuk cephe ve ışık rafı sistemi (çok katmanlı çift kabuk cephe sistemi) önerildi. Sonuçlarda, ışık rafı sistemine sahip çok katmanlı çift kabuk cephe önerisi, yazın iç mekân sıcaklıklarını 6,9 °C'ye kadar iyileştirdiği ve geleneksel sistemlere kıyasla %49,76'lık bir enerji tasarrufu oranına ulaştığı gözlenmiştir (Zheng et al., 2024).

Riganti ve arkadaşlarının (2024), 5 farklı Avrupa şehir için (Sevilla, Barselona, Torino, Berlin, Helsinki) yaptıkları çalışmada, plazmikromik camların cepheye etkisi simülasyon yoluyla test edilmiştir. Simülasyon sonucunda, çift bantlı elektrokromik camların, enerji tüketimini %27, görsel rahatsızlığı ise yaklaşık %32'ye kadar düşürdüğü izlenmiştir (Riganti et al., 2024).

Gözenekli malzemelerle oluşturulan ÇKC sisteminde madde saflaştırılması incelenmiş olup simülasyon sonuçlarına göre, 1 mm gözenek boyutuna sahip malzemelerin en iyi performansı sergilediğini, 10 µm'den büyük partiküller için maksimum %45 saflaştırma verimliliği ve yıllık ortalama %26,24 verimlilik sağlanmıştır (Li et al., 2024).

Yang ve arkadaşları (2023), havalandırmalı çift kabuk cam cephelerde fototermal dönüşüm ve çift fazlı değişim malzemeleri (DPCM) kullanılarak, en düşük ısı transfer oranı olan 30,03 W'ın elde edildiğini bildirmiştir.

Tropikal iklim koşullarını ele alan Lim ve Ismail'in (2023) çalışmasında, bir ofis binası EnergyPlus yazılımı ile simüle edilmiş, tek kabuk cephe ve çift kabuk cephe sistemlerinin ısıl davranışını ve enerji verimliliği analiz edilmiştir. Bulgular, çift kabuk cephenin enerji tüketimini %40'tan fazla azaltabileceğini göstermiştir.

Andreeva ve arkadaşlarının (2022) çok katmanlı havalandırmalı cepheler ile ilgili yaptıkları çalışmada, yüksek katlı bir ofis binası için argon dolgulu üç katmanlı camdan yapılmış tek kabuk cephe, havalandırmalı çift kabuk cephe ve havalandırmalı üç kabuk cephe olmak üzere üç farklı cephe tasarımı incelenmiş olup enerji modellemesi Green Building Studio yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre, üç kabuk cepheye sahip binaların yıllık enerji tüketimi, tek kabuk cephelere kıyasla %15 oranında azalmıştır.

Attia ve arkadaşlarının (2022) Belçikada yaptıkları çalışmada, dinamik gölgeleme, elektrokromik cam, çift kabuk ve aktif havalandırmalı cephe olmak üzere 4 farklı adaptif cephenin incelenmiş olup dinamik gölgeleme ve elektrokromik cam, toplam yıllık yükleri %26,3 ile %31,3 arasında azaltarak en iyi enerji performansını sağladığı belirlendi. Ilıman iklimler için aktif havalandırmalı çift kabuk cephe sistemi önerildi.

Albatayneh'in (2021) çalışmasında ise Ürdün'ün Amman şehrinin yarı kurak ve sıcak Akdeniz iklim kuşağında tek katlı bir konut binasının yapı kabuğunun parametrelerinin bir optimizasyonu yapılmıştır. Çalışmanın amacı, mekanik sistemlerin kullanımıyla mevcut termal konfor seviyelerinin sürdürülebilirliğini sağlarken, soğutma ve ısıtma yüklerinde azalma elde etmektir. Bu doğrultuda, DesignBuilder simülasyon programı kullanılarak soğutma ve ısıtma yüklerini değerlendirmek için 12 tasarım değişkeninin duyarlılık analizi yapılmıştır.

Çalışmanın sonucunda referans modüle göre soğutma açısından 99,79 kWh/yıl ve ısıtma açısından 193,95 kWh/yıl enerji tüketiminin düşürülebileceği sonucuna varılmıştır.

İran'ın Semnan şehrinde yapılan bir diğer çalışmada ise bir ofis binasının yıllık enerji tüketimi DesignBuilder yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Çalışmada enerji tüketimini azaltmak adına tek camlı pencerelerin düşük emisyonlu çift camlı pencere ile değiştirilmesi, binanın dış duvarına ısı yalıtım levhası yerleştirilmesi ve dış cephede yatay gölgelik kullanılması ve iç gölgeliklerin kaldırılması olmak üzere 3 farklı senaryo geliştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda bu senaryoların enerji tüketiminde sırasıyla %14, %18 ve %13 oranında azalma sağladığı görülmüştür (Fathaliana and Kargarsharifabad, 2018).

Zomorodian ve Tahsildoost (2018), Tahran bulunan bir ofis binası için farklı çift kabuk cephe tasarım alternatiflerini dinamik simülasyon yöntemiyle değerlendirmişlerdir. Simülasyon çalışması sonucu seçilen en uygun model, enerji tüketimini %7,9 ile %14,8 arasında azalmıştır.

Beytekin (2016) hazırladığı tez çalışmasında yapı kabuğunu enerji etkinliği kapsamında değerlendirilmiştir. TS 825 standardı baz alınarak yalnızca yapı kabuğuna müdahale edilmiş ve 2 farklı yapı kabuğu iyileştirme önerisi geliştirilmiştir. Simülasyon programı olarak DesignBuilder'ın kullanıldığı çalışmada sonuç olarak, TS 825 standardı değerlerinin uygulandığı öneride yıllık enerji ihtiyaçlarında %25,4 azalma tespit edilmiş ancak yapı içinde enerji dağılımındaki farklar giderilememiş ve iç ortam konforunun yapının genelinde homojen şekilde sağlanamadığı görülmüştür. Diğer öneride ise yetersiz kalan değerlerin yerine enerji verimliliği açısından daha etkin bir model (güneydoğu yönünde güneş kırıcı tasarımı, ısı yalıtım düzeyinin iyileştirilmesi, kuzey cephesi için yansıtıcı düzeyi düşük cam seçilmesi, çatı kaplaması, cephe cam ve doğramalarının daha yüksek yalıtımlı malzemelerle değiştirilmesi vb.), hazırlanmış ve hesaplamalar sonucu yıllık enerji ihtiyacında %43,4 oranında azalma tespit edilmiştir.

Pomponi ve arkadaşları 2015'te yaptıkları ofis yenileme çalışmalarında, çift kabuk cepheler ile tek kabuk cephelerin yaşam döngüsü analizlerini karşılaştırmışlardır. 128 adet çift kabuk cephe kurgusunun analiz edildiği çalışmanın sonucunda, çift kabuk cephelerin yaşam döngüsü analizlerinde %98 oranında enerji verimli olduğu, %85 oranında ise düşük karbon salımı gerçekleştirdiği izlenmiştir (Pomponi et al., 2015).

Cephe yenileme stratejilerini inceleyen bir çalışmada, Kopenhag'da bulunan mevcut ofis binalarında yenileme için dört strateji IDA ICE programı ile simüle edilmiştir. Sonuçlarda, çift kabuk cephe önerilerinin yıllık %31- %59 arasında enerji tasarrufu potansiyeli bulunmuştur. Dış yalıtım ve giydirme cephe, ısıtma enerji tüketimini azaltmada en iyi sonuçları sağlamıştır (Hannoudi et al., 2015). Tablo 2.11'de çift kabuk cepheler üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş olup ağırlıklı olarak son 5 yılda yayınlanmış çalışmalarına yer verilmiştir.

Tablo 2.11: Çift kabuk cephe sistemleriyle ilgili literatür taraması.

| Ref. / Yazarlar | Çalışmanın çıktısı / konusu | Bina Türü | Bölge / Dönem | Metot | Amaç | Ana Bulgular & Sonuçlar |
|--|--|-------------------------------------|--|--|--|---|
| Zhao X. et al., (2024) | Enerji performansı | - | - | Literatür taraması | Doğal havalandırmalı ÇKC'lerde havalandırma modlarının incelenmesi. | Analiz sonucunda, hibrit, pasif, otomatik, aktif ve manuel sistemlerin sırasıyla %47,9, %36,7, %32,1, %32 ve %27,3 oranında tasarruf sağladığı belirlendi. |
| Firouzaba, M. R. & Astarai, F. R. (2024) | Enerji performansı | Ofis. | İran (4 iklim bölgesi) | Simülasyon (DesignBuilder) | Elektrokromik cam ile ÇKC entegresinin etkileri. | Sıcak-nemli iklimde, ÇKC entegre elektro-kromik cam uygulaması ile elektrik tüketimi %3,5 oranında azaldı. |
| Çabuk Ş. (2024) | Pasif enerji | - | - | Literatür taraması. | İklim duyarlı kinetik cephe tasarım yaklaşımlarının anlaşılması. | Güneşe ve rüzgâra duyarlı kinetik cepheler sınıflandırılarak cephe hareketinin amacı irdelendi. |
| Riganti, M. et al., (2024) | Enerji performansı, iç mekân konforu, gün ışığı kontrolü | Ofis. | Sevilla Barcelona Torino Berlin Helsinki | Simülasyon (EnergyPlus) | Plazmikromik pencerelerin bina kabuğuna etkisinin simülasyon analizi. | Simülasyonlar, çift bantlı elektrokromik camların ısıtma, soğutma ve aydınlatma enerjisini %27, görsel rahatsızlığı ise yaklaşık %32 oranında azalttığını gösterdi. |
| Araji, M. T. et al., (2024) | Isıtma yükü tasarrufu | Mevcut bir binanın giydirme cephesi | Isıtma-soğutma dönemleri | Simülasyon Sinir ağı. Ölçüm. | Isıtma talebinin azaltılmasına yönelik sinir ağı destekli ısıtma modelleri kullanılarak havalandırmalı ÇKC'nin deneysel incelenmesi. | Kışın kapalı ÇKC, tek kabuk cepheye kıyasla ısı kaybını %24,65'e kadar azaltılırken, yaz aylarında mekanik havalandırmalı ÇKC'nin ısı kazanımını %33,7'ye kadar düşürdüğü saptandı. |
| Liu, X. et al., (2024) | Termal performans Enerji performansı | Kamu binası | Çin (Kasgar, Urumçi, Altay, Turpan) | Simülasyon (Rhino Grasshopper, Ladybug, Honeybee, Energy Plus) TOPSIS. | Soğuk iklimde ÇKC uygulaması ile kamu binalarında enerji verimliliğini araştırmak. | Sonuçlar, en yüksek enerji tasarrufu oranının %15,19'a ulaştığı Xinjiang şehirlerinde, güneşe bakan ÇKC yönelimi başarılı oldu. |

Tablo 2.12 (devam)

| | | | | | | |
|-----------------------------------|--|----------------------------------|-----------|--|---|---|
| Li, H. et al., (2024) | Güneş ısısı kazancı Sıfır-enerji Çevre kirliliği | Dış mekân deney tesisi | Çin | Simülasyon (CFD: ANSYS Fluent) | Gözenekli malzemelerle oluşturulan ÇKC sisteminde madde saflaştırılmasının incelenmesi. | 1 mm gözenek boyutuna sahip malzemeler en iyi performansı sergiledi. 10 µm'den büyük partiküller için maksimum %45 saflaştırma verimliliği ve yıllık ortalama %26,24 tasarruf sağlandı. |
| Aruta G. et al., (2023) | Isıtma-soğutma yükleri, enerji performansı | Ofis | İtalya | Simülasyon (DesignBuilder EnergyPlus) | Mevcut bir bina için pasif ve dinamik ÇKC uygulamasıyla cephe iyileştirmesi. (Koridor tipi) | Yıllık birincil enerji tüketiminde %20 oranında azalma izlendi. |
| Khorasgani A. M. et al., (2023) | Termal konfor, enerji performansı | Konut (pasif / net-zero yapılar) | ABD | Literatür taraması, anket, nicel veriler | ÇKC'de, IoT odaklı sistemin enerji tüketimine ve ısı performansına etkisi. | ÇKC'ye entegre IoT sisteminin ısı konfor koşullarını önemli ölçüde arttırabileceği ve enerji tüketimini azaltabileceği görüldü. |
| Zhang, C. et al., (2023) | Termal konfor, pasif enerji performansı | Deney hücresi | - | Ölçüm (Termokupl) | ÇKC ile dağınık tavan havalandırmasının entegre edilmesi. | Sonuçlar, bu entegrasyonun odanın ısı kazancını düşürdüğünü gösterdi. |
| Roberts, F. et al., (2023) | İç mekân görsel konforu, enerji performansı | Ofis | Londra. | Simülasyon (DesignBuilder: DAYSIM, EnergyPlus, Radiance) | ÇKC'lerde Binaya Entegre Fotovoltaik teknolojisinin analizi. | Vaka çalışmasında enerji tüketimini arttırması ve yetersiz gün ışığı faktörü sebebiyle uygun olmadığı belirtildi. |
| Schaffer, M. et al., (2023) | Termal konfor Pasif enerji Tasarım parametreleri | Okul | Danimarka | Ölçüm. Simülasyon. (IDA-ICE) | Dağınık tavan havalandırma ÇKC'nin hava tahliyelili modda çalıştırılması. | Sonuçlar, kuzey hariç diğer tüm yönelimler için olumlu etkileri olduğu gözlemlendi. |
| Lucchino, E. C. & Goia, F. (2023) | İç mekân aydınlatması, hava kalitesi, termal konfor ve enerji performansı. | Vaka çalışma binası | Frankfurt | Simülasyon (IDA-ICE) | ÇKC'lerde çok alanlı model tabanlı kontrol (MBC) algoritması denemesi. | Modelde, enerji ve çevresel performansta tüm alanlar için konfor koşullarının sağladığı ve %70'e varan enerji tasarrufu gözlemlendi. |
| Pelletier, K. et al., (2023) | Havalandırma Termal performans. | - | - | Literatür taraması | 21. yüzyılda çift kabuk cephe araştırmalarının incelenmesi. | ÇKC'lerin popüler bir araştırma alanına şip olduğu ancak uygulanabilirliğinin belli bir standarda dayanmadığı vurgulandı. |
| Jankovic, A. & Goia, F. (2022) | Isıl yükler, mekanik havalandırma ile hava akış hızı | Deney hücresi | - | Deney (iklim simülasyon tesisi), ölçüm | İklim simülasyon tesisinde, mekanik havalandırma ÇKC'ye jaluzi entegre edilerek ısı davranışının ölçülmesi. | ÇKC performans kontrolünün mevsimlere göre değişebileceği ve jaluzilerin ısı yük üzerinde aktif rol oynayabileceği izlendi. |

Tablo 2.13 (devam)

| | | | | | | |
|---------------------------------|---|---------------|-----------------|---|--|--|
| Ahriz A. et al., (2022) | Isıl yükler, enerji performansı | Ofis. | Cezayir | Simülasyon. (Ecotect/Analys is) | Akdeniz ikliminde yüksek katlı ofis binası için biyoklimatik ÇKC modeli geliştirmek. | Sonuç olarak, ısıtma ve soğutma yüklerinde sırasıyla %28 ve %53,5 oranında tasarruf sağlandı. |
| Attia, S. et al., (2022) | Termal Performans Enerji performansı | Ofis | Belçika | Simülasyon (EnergyPlus) | Farklı cephe tasarımlarının incelenmesi. | Dinamik gölgeleme ve elektrokromik cam, toplam yıllık yükleri %26,3 ile %31,3 arasında azaltarak en yüksek enerji performansını gösterdi. Ilıman iklimler için aktif havalandırılmalı ÇKC önerildi. |
| Hou, K. et al., (2021) | Pasif ısıtma-soğutma Enerji performansı | Ofis | Çin | CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği) | Pasif ön ısıtma ve doğal havalandırılmalı ÇKC'lerin analizi. | Pasif ön ısıtma önlemleri ile doğal havalandırılmalı ÇKC'lerin birleştirilmesi binanın ısıtma ve havalandırma gereksinimlerini karşılarken enerji tüketimini azalttığı ifade edildi. |
| Sotelo-Salas, C. et al., (2021) | Pasif soğutma | Deney odası | Meksika | CFD Simülasyonu. (ANSYS/Fluent) | Meksika'da opak ÇKC'de evaporatif sprey soğutma yönteminin uygulanması. | %33,5-%67,4 arasında bir soğutma verimliliği elde edildi. |
| Ascione, F. et al., (2021) | Termal Performans Enerji performansı | Eğitim Binası | Napoli | Simülasyon (DesignBuilder EnergyPlus) | ÇKC uygulanmasında olumlu ve olumsuz etkilerin değerlendirilmesi. | Isıtma ve soğutma enerji taleplerinde sırasıyla %44,4 ve %8,4 oranında azalma sağlandı. Ayrıca, elektrik tüketiminde %11,2'lik bir tasarruf sağlandı. |
| Ioannidis, Z. et al., (2020) | Termal performans Gün ışığı | Deney odası | Kanada | Deney-Ölçüm (Piranometre, Termokupl) Nusselt sayı korelasyonu | Yarı-saydam PV ile ÇKC'lerin entegrasyonunun deneysel olarak araştırılması. | Yapılan deneyler sonucunda, ısı kayıplarının %20 oranında azaldığı ve verimliliğin %25-%75 arasında değiştiği gözlemlendi. |
| Kim, D. D. et al., (2020) | Termal performans Pasif soğutma | Ofis | Suudi Arabistan | CFD Simülasyonu | Sıcak iklimde, ÇKC'lerde boşluk geometrisi ile gölgeleme cihazlarının ilişkisi. | Sonuçlar, ÇKC'lerde boşluk genişliği ile sıcaklık arasında önemli bir ilişki olduğu, gölgelendirme ile bu etkinin azaltılabileceği anlaşıldı. |
| Preet, S. et al., (2020) | Termal performans Pasif soğutma | Deney odası. | Hindistan | Deney. Ölçüm (Piranometre, Sıcaklık verisi toplayıcısı, Isı Akısı Sensörü, termokupl) | ÇKC'ye entegre yarı saydam PV sisteminde, mekanik havalandırmanın binanın toplam enerji tüketimine etkisi. | Sonuçlar, doğal havalandırma ve boşluk genişliğinin 50 mm'den 250 mm'ye artmasıyla SHGC'de %12'lik bir azalma sağladığını ve mekanik havalandırılmada PV panelinin güç üretimi %28,38 daha yüksek olduğunu gösterdi. |
| Radmar d, H. et al., (2020) | Enerji performansı Soğutma performansı | Ofis | İran | Ölçüm Deney | Çift camlı bir pencereye prototip ÇKC entegre edilmesi ve analizi. | Sonuçta, 0,27–0,42 kWh _{th} /m ² /gün tasarruf sağlandı. |

Tablo 2.14 (devam)

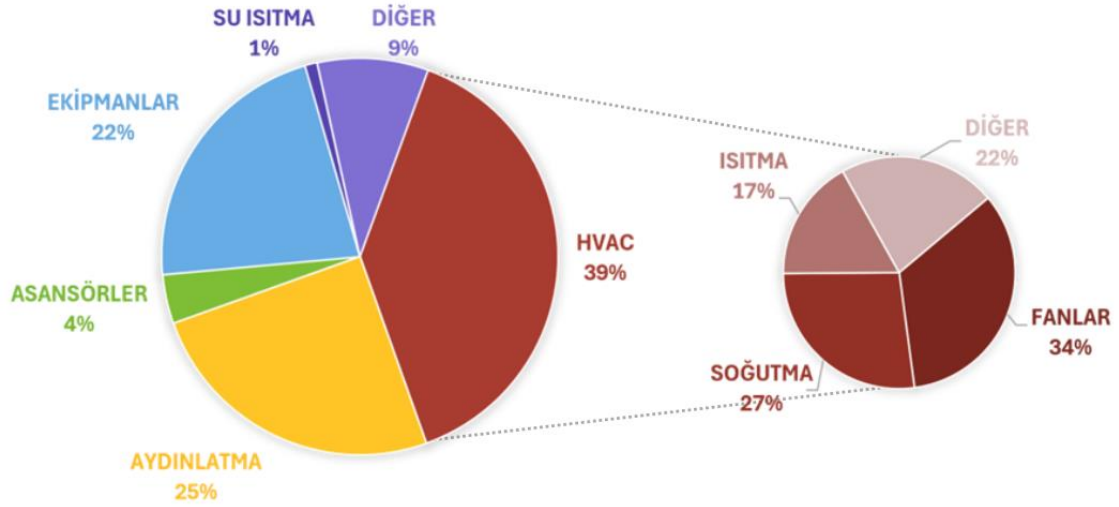
| | | | | | | |
|-----------------------------------|---|------------------|------------|---|---|--|
| Saroglou, T. et al., (2019) | Termal performans Pasif soğutma | Ofis | İsrail | Simülasyon EnergyPlus | Akdeniz ikliminde yüksek bir katlı ofis binasında ÇKC'lerde boşluk geometrisi ile soğutma yüklerinin azaltılması. | Sonuçlar, boşluk genişliklerinin artması ile soğutma yüklerinin azaldığını gösterdi. En iyi sonuç, boşluk genişliği 0,2 m'den 0,5 m'ye (%11) yükseltildiğinde zemin katta meydana geldi. |
| Lee, C. et al., (2019) | Termal performans Enerji performans | Ofis | Çin | Simülasyon. (ESP-r) | PV entegre ÇKC analizi. | ÇKC-PV'nin optimum çalışma açısı kışın 10–20°, yaz ve ara mevsimlerde 30°C olduğunda, soğutma enerji tüketimi yaklaşık %10 oranında azaldı. |
| Catto Lucchino, E. et al., (2019) | BES araçlarının incelenmesi | - | - | Literatür taraması | BES araçları aracılığıyla ÇKC sistemleriyle ilgili farklı konuların ve sınırların kapsamlı ele alınması. | ÇKC'de doğal havalandırmalı tampon bölge yeterli doğrulukla simüle etme olasılığını sınırladığı görüldü. |
| Bielek, B. et al., (2019) | Pasif ısıtma Enerji performansı | Ofis | Slovakya | Simülasyon (CFD, ANSYS Fluent) | Bir ısı geri kazanım ünitesi ile ÇKC'nin entegre edilmesi ve soğuk iklim bağlamında değerlendirilmesi. | Hava akış hızı ile ısı geri kazanımı arasında ters orantı olduğu tespit edildi ve soğuk iklimlerde dar boşluk genişliğine sahip ÇKC sistemi için güneş ışınımının önemi vurgulandı. |
| Sung, U. J. & Kim, S. H. (2019) | Enerji performansı | İş Tesisi | Güney Kore | Simülasyon EnergyPlus Ölçüm Piranometre SAHTC Termometre | ÇKC'lerde dış yüzey ile iç yüzey arasında gerçekleşen ısısal durumun incelenmesi. | Sonuçlar, güneş bacasının ÇKC'ye uygulanması ve yüksekliğinin artmasıyla, nispeten daha yüksek güneş ısı kazancı elde edildiğini gösterdi. |
| Kilaire, A. & Stacey, M. (2017) | Sürdürülebilirlik | Ofis | İngiltere | Simülasyon (CFD) | Hem pasif hem de aktif entegre ÇKC prototipinin geliştirilmesi. | Kademeli ÇKC prototipi ile enerji verimliliği, mekansal verimlilik ve minimum ses geçişi sağlandı. |
| Bueno, B. et al., (2017) | Güneşli faktörü, Enerji tüketimi (HVAC) | Deney Odası | İtalya | Simülasyon Ölçüm | Cepheye entegre havalandırma sistemlerinin analizi ve tasarımı için yeni bir modelleme yaklaşımı önermek. | Sonuçta, havalandırmalı pencere ve kompakt fan coil ünitesine sahip güneş bakan bir cephe için %5 oranında enerji tasarrufu sağlanmıştır. |
| Slavković, B. P. (2017) | Enerji performansı Termal performans | Endüstriyel yapı | Sırbistan | Simülasyon (DesignBuilder EnergyPlus) | Bina enerji performansını iyileştirmek için ÇKC'nin uygulanması. | Yaz aylarında sabit panjurlu ve gece havalandırmalı ÇKC'lerden, en düşük ısıtma ve soğutma enerjisi ve minimum CO2 salımı sağlandı. |

Tablo 2.15 (devam)

| | | | | | | |
|--|---------------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------------------|--|--|
| Khoshbakht, M. et al., (2017) | Enerji performansı | Ofis | İngiltere Avustralya | Simülasyon. (Ecotect) Ölçüm | ÇKC'lerin ılıman iklimde ve subtropikal iklimde enerji tasarruflarının karşılaştırılması. | Sonuçlarda, ÇKC'lerin ılıman iklimlerde neredeyse %51 ve subtropikal iklimlerde %16 enerji tasarrufu sağlayabildiği saptandı. |
| Shen, C. & Li, X. (2016) | Termal performans Pasif soğutma | Deney Odası | Çin | Simülasyon. (CFD) (ANSYS Fluent) | Evaporatif soğutma suyu kullanan cepheye yerleşik borulara sahip ÇKC'nin incelenmesi. | Sonuç olarak, soğutma borularının Kuzey yönü hariç tüm yönlerde ısı kazanımını düşürdüğü ve evaporatif soğutmanın %20 oranında verimli olduğu görüldü. |
| Pomponi, F. & Piroozfar, P. A. E. (2015) | Enerji performansı | Ofis | İngiltere | Eleştirel literatür taraması Ölçüm | Ofisleri yenileme bağlamında uygun ÇKC'nin araştırılması. | Mevcut ofis stokunun yüzde 75'ini temsil etmek için toplamda 22 kriter geliştirilmiştir. |
| Chou, S. K. et al., (2009) | Güneş ısı kazancı | Lab. test hücresi | - | Deney | ÇKC'nin güneş ısı kazanımının Cephe Termal Transfer Değeri (ETTV) üzerindeki etkilerini incelemek. | Sonuçlarda, Doğu ve batı yönlenmesinde en yüksek verim elde edildi ve 0.3'lük pencere duvar oranı, ETTV'de %45'e varan azalma sağladı. |
| Høseggen, R. et al., (2008) | Pasif ısıtma Enerji performansı | Ofis | Norveç | Simülasyon. (ESP-r) | Isıtma talebini azaltmak için doğu cephesine ÇKC uygulaması kararının araştırılması. | Sonuç olarak, ısıtma enerjisi gereksiniminde %20 oranında düşüş gözlemlendi. |
| Gratia, E. & De Herde, A. (2007) | Termal performans | Ofis | Belçika | Simülasyon. (TAS, CFD, CAD) | ÇKC'de gölgeleme cihazlarının konumu ve rengi ile soğutma tüketimi arasındaki ilişkinin araştırılması. | Sonuç olarak, soğutma tüketiminde %23,2'ye kadar azalma hesaplandı. |
| Stec, W. J. & Van Paassen, A. H. C. (2005) | Enerji performansı | Test hücresi | Hollanda | Simülasyon (Simulink) | ÇKC'lerde, farklı bileşen seçimi ile binanın HVAC sistemlerine olan ihtiyacın azaltılması. | ÇKC'de mekanşık havalandırma ile gece soğutması yapılması, soğutma kapasitesinde ve enerjide %40, doğal havalandırmada ise %70 oranında tasarruf sağlandı. |
| Ding, W. et al., (2005) | Doğal havalandırma Enerji performansı | Ofis (Prototip bina) | Japonya Tokyo | Simülasyon (CFD) | ÇKC'lerin doğal ventilasyon performansının incelenmesi. | Güneş bacasının yüksekliğinin artırılması, daha fazla havalandırma oranı sağladı. |

3. ALAN ÇALIŞMASI

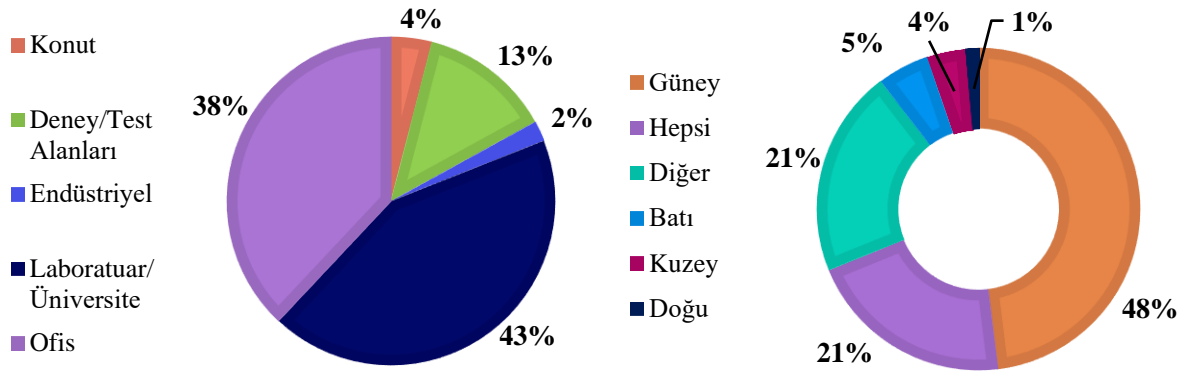
Ofis binaları, birçok ülkede ticari sektörün en büyük alt bileşenini oluşturarak hem toplam inşaat alanı hem de enerji tüketimi bakımından önemli bir konuma sahiptir. Söz konusu yapılarda enerji tüketiminin önemli bir kısmı, HVAC sistemleri ve aydınlatma kaynaklı olup enerji yoğunluğu; iklim koşulları, kullanılan malzemelerin ısı performansını, HVAC sisteminin verimlilik oranı, binanın yönü ve büyüklüğü gibi parametrelere bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Bichiou and Krarti, 2011).



Şekil 3.1: Bir ofis binasındaki tipik enerji tüketimi ve HVAC dağılımı (Department of the Environment and Energy, 2013).

Binaların yaşam döngüsünde, en yüksek enerji tüketimi sırasıyla işletme ve inşaat süreçlerinde gerçekleşmektedir (Fenner et al., 2020). Bu kapsamda ofis binalarının işletimi sırasında tüketilen enerji, başta ısıtma, soğutma ve havalandırma olmak üzere aydınlatma, ofis ekipmanlarının kullanımı ve asansör sistemleri gibi bileşenlere dağılmaktadır (Azari, 2019). Buna ek olarak, artan bilgisayar ve ofis ekipmanı kullanımı doğrudan enerji tüketimini de artırmakta; bilgi teknolojisi ekipmanlarından kaynaklanan sera gazı emisyonlarının her yıl yaklaşık %6 oranında yükseldiği gözlemlenmektedir. Bu ekipmanlar, elektrik tüketimini artırmanın yanı sıra yaydıkları ısı nedeniyle soğutma ve havalandırma ihtiyaçlarının da artmasına yol açmaktadır (Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi, 2009). Bu durum, HVAC sistemlerinin enerji tüketimindeki payı düşünüldüğünde önem kazanmaktadır. Ofis binalarındaki tipik HVAC sistemleri, toplam bina enerji tüketiminin yaklaşık %40'ını ve işletimsel enerji tüketiminin %70'ini oluşturmaktadır. Şekil 3.1'deki verilere göre, bir ofis binasında enerji tüketiminin %39'unun HVAC, %25'inin aydınlatma, %22'sinin ekipman,

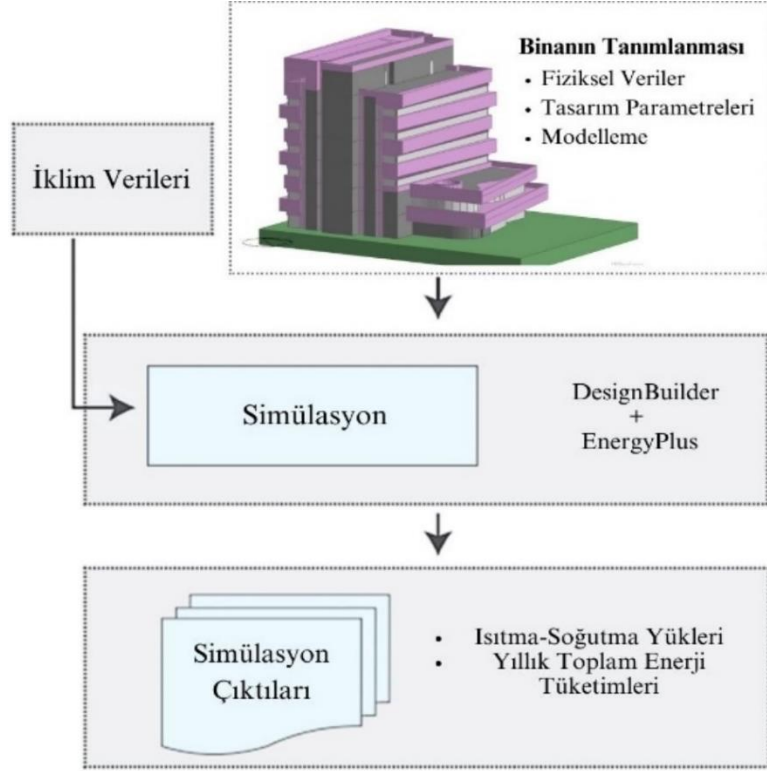
%4'ünün asansör, %1'inin su ısıtma ve %9'unun diğer tüketimlerden kaynaklandığını ortaya koymaktadır. HVAC sistemleri içinde ısıtma %17, soğutma %27, havalandırma (fanlar) %34 ve diğer sistemler %22 oranında enerji tüketmektedir (Department of the Environment and Energy, 2013). Bu dağılım, ısıtma-soğutma sistemlerinin toplam bina enerji tüketiminde belirleyici bir rol oynadığını ve bu sistemlerden kaynaklanan tüketimin iyileştirilmesinin, genel enerji tüketimi üzerinde önemli etkiler yaratacağını göstermektedir. Enerji verimliliğini artırmaya yönelik stratejiler kapsamında, ısıtma ve soğutma yüklerini azaltacak pasif tasarım uygulamaları da ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda, çift kabuk cephe sistemleri; iç ve dış cephe arasında oluşturulan hava boşluğu sayesinde doğal havalandırma ve yalıtım imkânı sunarak hem enerji tüketimini hem de işletme maliyetlerini azaltmaktadır (Naddaf ve Baper, 2023).



Şekil 3.2: Çift kabuk cephe sistemlerinin en yaygın uygulandığı bina türleri ve konumlandırıldığı cepheler (Pelletier et al., 2023).

Pelletier ve diğerlerinin 2023'te yaptıkları çalışmanın ışığında (Şekil 3.2), akademik ve deney çalışmaları kapsamında çift kabuk cephe sistemlerinin en fazla üniversite binalarında uygulandığı (%43) sonucuna varılmıştır. İkinci sırada ise %38 ile ofisler bulunmaktadır. Çift kabuk cephelerin yönelimi açısından, kuzey yarımküre koşullarında yapılan araştırmada Güney yönlenmesi %48 ile en yüksek orana sahip olduğu görülmektedir (Pelletier et al., 2023). Bu iki grafik, çift kabuk cephelerin akademik ve deney çalışmalarında uygulanma tercihlerini bina türleri ve yönlendirme tercihlerini özetlemektedir.

Bu bölümde, örnek ofis binasının ısıtma ve soğutma yüklerinin enerji tüketimine etkisini değerlendirmeye yönelik analiz süreci sunulmaktadır. Uygulamada kullanılan yöntemler ve aşamalar, aşağıdaki gibi sistematik olarak yapılandırılmış olup Şekil 3.3'de simülasyon sürecinin aşamaları şematik biçimde gösterilmektedir.



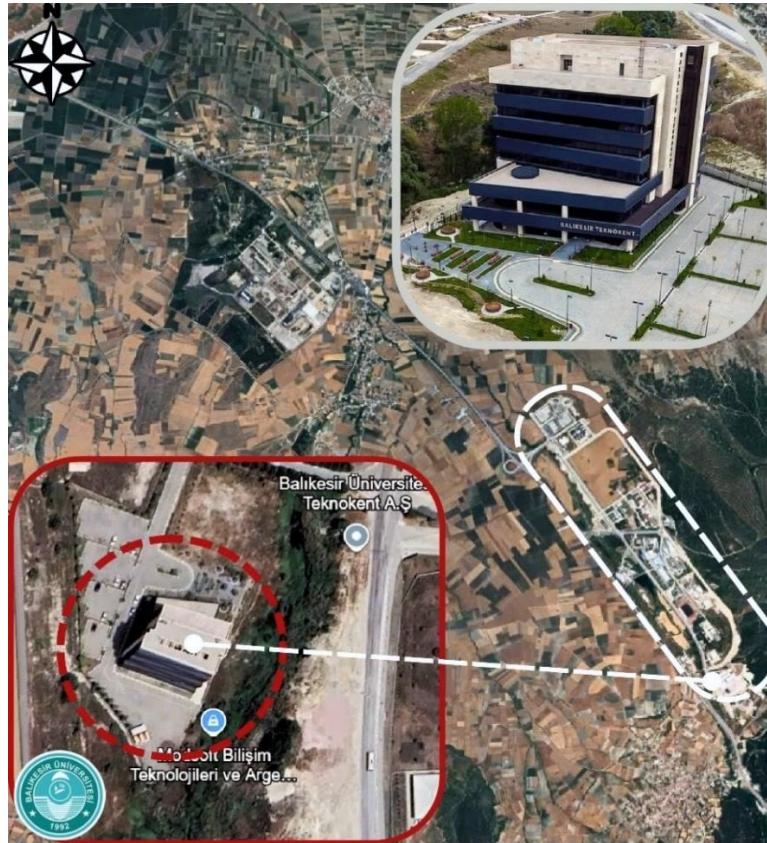
Şekil 3.3: Simülasyon sürecinin işleyiş biçimi (Ulukavak Harputlugil, 2016'dan uyarlanmıştır).

- **Modelleme Süreci:** Örnek ofis binasının üç boyutlu modeli, EnergyPlus altyapısını kullanan DesignBuilder programı aracılığıyla oluşturulmuştur.
- **Yapısal ve İşletimsel Özelliklerin Tanımlanması:** Binanın yapı elemanları ve katmanları, pencere camı ısı ve optik özellikleri, HVAC sistemleri ve yapı kullanım süreleri gibi enerji tüketimini etkileyen temel bileşenler simülasyon programına tanımlanmıştır.
- **İklim Verilerinin Tanımlanması:** Balıkesir ili iklim verileri, EnergyPlus resmi meteoroloji veritabanından indirilmiş ve DesignBuilder programına eklenmiştir.
- **Kalibrasyon Süreci:** Çalışma kapsamında, modele ilişkin güvenin sağlanması adına, simülasyon sonuçları ile gerçek tüketim değerleri MBE ve CV RMSE metrikleri ile kalibre edilmiştir.
- **ÇKC Kuruluşlarının Belirlenmesi:** Mevcut ofis binasında ısıtma-soğutma için tüketilen enerjiyi optimize etmek amacıyla, enerji etkin çift kabuk cephe kuruluşları geliştirilmiştir. ÇKC kuruluşları, boşluk genişliği, havalandırma türü, yönlenme ve cam türü olmak üzere 4 farklı parametre bağlamında oluşturulmuştur. Çift kabuk cephe tipi kutu tipi olarak belirlenmiştir ve sabit parametredir. Diğer değişkenler bu temel geometri üzerinde kombine edilmiştir.

- **Bulguların Değerlendirilmesi ve Sonuçların Sunumu:** Mevcut duruma ait veriler ile çift kabuk kuruluşlarından elde edilen bulgular karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sonuçta, örnek ofis binasında yıllık ısıtma-soğutma enerji tüketimindeen düşük değeri sağlayan tasarım, en etkin ÇKC kuruluşu olarak belirlenmiştir.

3.1 Alan Çalışmasında İncelenen Mevcut Binaya İlişkin Veriler

Tez kapsamında, çift kabuk cephe sisteminin ısıtma ve soğutma enerji yükleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsü'nde yer alan bir ofis binası 'örnek bina' olarak seçilmiştir. Yapı, araştırma, geliştirme (Ar-Ge), inovasyon ve teknoloji odaklı girişimcilik faaliyetlerine ev sahipliği yapmaktadır. 2019 yılında inşaatı tamamlanan bina 11.908 m² arazi üzerinde kurulmuş olup 8.333 m² kapalı alana sahiptir (URL-18). Örnek ofis binasında bulunan 69 ofis birimi (68 ofis + 1 ön kuluçka merkezi), farklı sektörlerde faaliyet gösteren firmalara kiralanabilir alanlar sunmaktadır. Buna ek olarak, 6 adet idari ofis ile binanın toplam ofis mekânı sayısı 75'e ulaşmaktadır.



Şekil 3.4: Örnek ofis binasının Balıkesir ilindeki konumu (URL-18).



Şekil 3.5: BAÜN Çağış yerleşke krokisi ve örnek ofis binasının konumu (URL-19).

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te görüldüğü üzere, bina kuzeybatı-güneydoğu doğrultusunda konumlandırılmış olup ana girişi kuzeybatı cephesinde yer almaktadır. İki bodrum, altı normal ve bir teras katından oluşan yapının en üst kotu 32,79 m'de bulunurken, ofis mekanları kuzeybatı ve güneybatı yönlerindedir ve kapalı plan tipinde düzenlenmiştir. Tablo 3.1, örnek binaya ait teknik ve mekanik özellikleri içermektedir. Tablodaki bilgiler, simülasyon sürecinde dikkate alınan verilerdir.

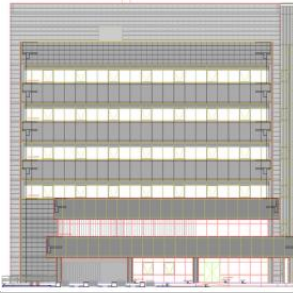
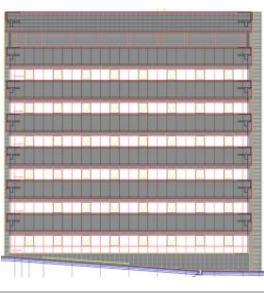






Tablo 3.1: Örnek ofis binasına ait temel veriler.

| | | |
|------------------------------|---|---|
| İKLİM VERİLERİ | Binanın konumu | Balıkesir, Çağış, Altıeylül |
| | Binanın bulunduğu Balıkesir ilinin iklim türü | Ilıman-Nemli (TS 825'e göre 2. Bölge) |
| BİNAYA AİT GENEL BİLGİLER | Binanın işlevi | Ofis |
| | Binanın yönleneşmesi | KB-GD |
| | Binanın formu | Dikdörtgen |
| | Yapı kullanım saatleri | 08:00-18.00 |
| | Binanın kat sayısı | 9 (2 Bodrum, 6 normal ve bir teras kat) |
| | Binanın ofis plan tipi | Kapalı plan |
| | Binanın toplam kapalı alanı | 8.333 m ² |
| | Binanın yapıım sistemi | Betonarme |
| BİNANIN KABUĞUNA AİT VERİLER | Opak bileşeni oluşturan yapı elemanı | Gazbeton/AAC (200x600x250mm) |
| | Saydam bileşeni oluşturan yapı elemanları | Alüminyum doğrama giydirme cam cephe |
| | Gölgelendirme elemanları | Alüminyum kutu profil |
| | Pencere-Duvar oranı | %38 |
| MEKANİK VERİLER | Isıtma/ Soğutma enerji türü | Elektrik |

Pencere/duvar oranı, binalarda enerji kayıp/kazançlarını önemli ölçüde etkileyen bir faktördür; iklim, yönleneşme ve camın termo-optik özellikleri gibi etkenlere bağlı olarak değışkenlik gösterir. Özellikle güney cephede bu oranın artması, ısıtma ihtiyacını azaltırken, soğutma

yükünü artırma eğilimindedir (Yıldız, Göksal Özbalta ve Durmuş Arsan, 2011). Örnek binaya ait mimari projede, gün ışığından optimum yararlanma hedefi doğrultusunda, saydam yüzeylerin çalışma mekanlarında (kuzeybatı-güneydoğu) yoğunlaştığı görülmektedir. Bu kapsamda, bina cephelerinde pencere/duvar oranı olarak da adlandırılan opak/saydam yüzey oranları Tablo 3.2’de sunulmuş olup binanın geneli yaklaşık %38 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3.2: Örnek binaya ilişkin cephe pencere/duvar oranları.

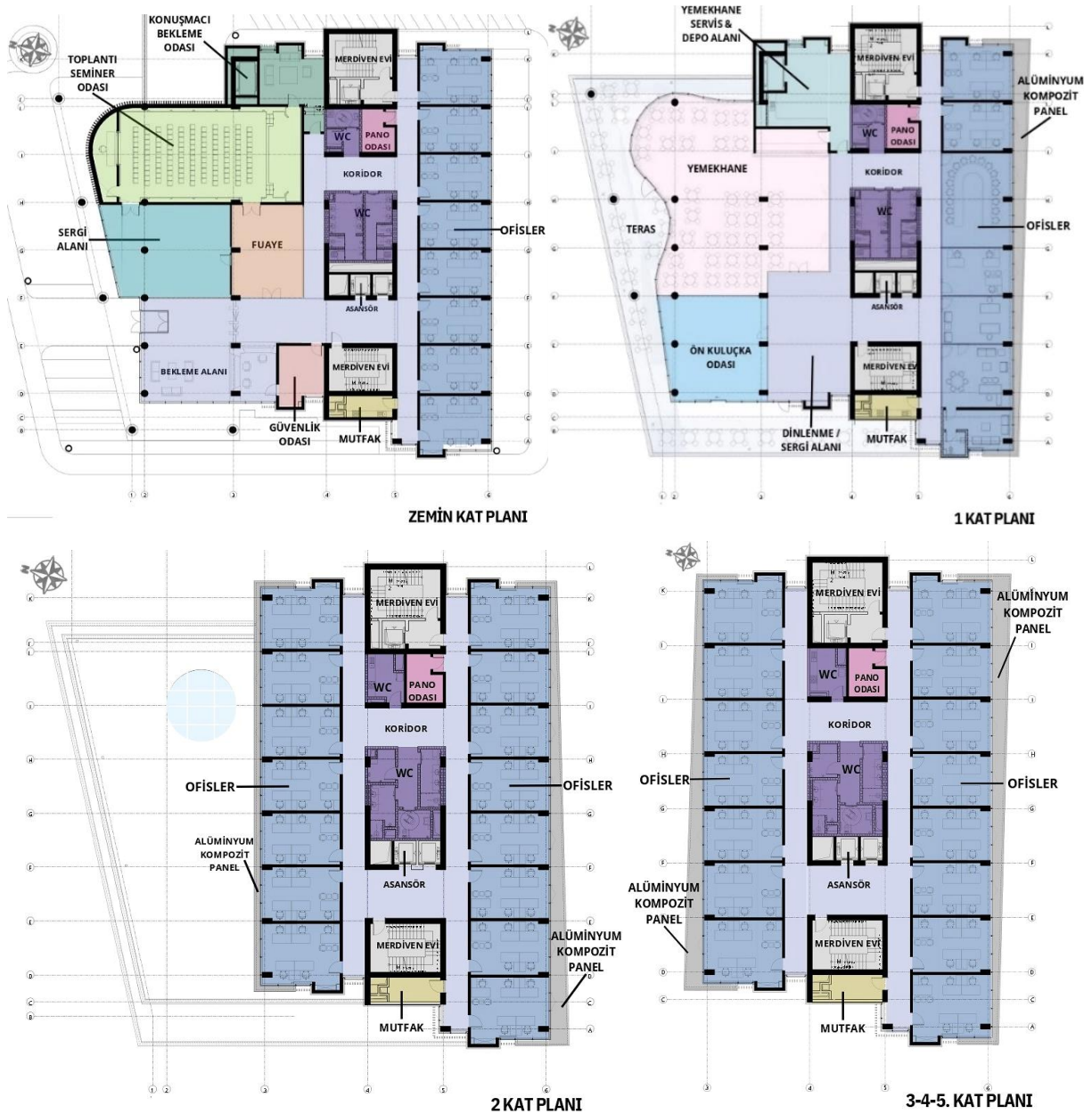
| PENCERE/DUVAR ORANI | | | |
|---|---|--|---|
| Kuzeybatı Cephesi | Güneydoğu Cephesi | Güneybatı Cephesi | Kuzeydoğu Cephesi |
| %58,8 | %36,4 | %32,5 | %24,6 |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

Binanın kat organizasyonu aşağıda özetlenmiştir ve Şekil 3.6’da kat planları sunulmuştur.

- **Zemin kat;** girişe hizmet eden mekanları içermektedir. Ayrıca ofisler, fuaye ve sergi alanı, toplantı/konferans salonu, mutfak ve teknik odaları içerir. ± 0.00 kotunda yer almaktadır ve toplam $946,80 \text{ m}^2$ olup 4.5 m kat yüksekliğine sahiptir.
- **1. katta;** idari ofisler, ön kuluçka merkezi, yemekhane/kafeterya, mutfak, teras, servis ve depo alanı, teknik odalar, dinlenme ve sergi alanı mevcuttur. Bu kat fonksiyonel olarak personel yemek alanı ve ofislerin bulunduğu, sosyal alanlar ile işlevsel ofisler arasında geçiş katı niteliğindedir. Alanı $960,9 \text{ m}^2$ ve kat yüksekliği 4.5 m ’dir.
- **2-3-4-5. katta;** ofisler, pano odaları, mutfak, zayıf akım odası gibi birimler mevcuttur. Bu katlar birbirini tekrar etmekte olup yoğun çalışma alanları ile iç mekân işlevlerine

yönelik teknik alanları içermektedir. Kat yükseklikleri 4.5 m olup 2. katın alanı 745,9 m²; 3. ve 5. katların 761,65 m², 4. katın ise 761,6 m²'dir.

- **6. kat/teraz katı;** açık teras ve teknik birimlerin yer aldığı, 4,5 m yüksekliğindedir.
- **1. Bodrum katı;** kapalı otopark, depo, personel servis alanları ve teknik birimlere ayrılmıştır. Tamamen toprak temaslı duvarlara sahiptir ve doğal aydınlatma yalnızca üç odada kuranglez ile sağlanmaktadır. Kat yüksekliği 3.5 m'dir.
- **2. Bodrum katı;** yapının teknik altyapısının yoğun olduğu kattır. Tamamen toprak temaslı alanlara sahip olup kat yüksekliği 3.5 m'dir.



Şekil 3.6: Örnek binaya ait kat planları.



Şekil 3.7: Ofis mekânı ve kat koridoru (URL-18).

DesignBuilder yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen enerji analizi kapsamında, mevcut ofis binası ısı bölgelere ayrılmış ve her bir bölge; kullanım alanlarının fonksiyonel özellikleri (kullanım amacı, enerji tüketim profilleri, termostat değerleri, iç mekân konfor gereksinimleri, çalışma saatleri, ekipman kullanımı vb.) dikkate alınarak detaylı bir şekilde modellenmiştir. Bu bölgeleme stratejisi, HVAC sistemlerinin ve yapı elemanlarının mevcut durumla uyumlu şekilde tanımlanmasını mümkün kılmış; böylece simülasyonun gerçekçi sonuçlar üretmesi hedeflenmiştir. Programa tanımlanan söz konusu özellikler Tablo 3.3’da değerleri ile beraber görülmektedir.

Tablo 3.3: Binanın işletimsel ve HVAC sisteminin özellikleri.

| Ofis Fonksiyonlarına Ait Girdiler | | Model HVAC Girdileri | | |
|-----------------------------------|------------------------------|----------------------|--------------------------|----------|
| Kullanıcı Yoğunluğu | 0.066 kişi/m ² | Isıtma | Termostat ayar sıcaklığı | 22°C |
| Kişi metabolizma hızı | 0.9 (birimsiz) | | Mevsimsel CoP | 2,5 |
| Ekipmanlardan iç kazanım | 11,77 W/m ² | | Yakıt | Elektrik |
| Yapı Kullanım Saatleri | Pazartesi-Cuma 8.00-18.00 | Soğutma | Termostat ayar sıcaklığı | 24°C |
| Aydınlatma güç yoğunluğu | 5 W/m ² -100lux | | Mevsimsel EER | 3 |
| Aydınlatma seviyesi | 400 lux | | Yakıt | Elektrik |
| Giysi yalıtım değerleri | Yaz | 0,5 clo | Havalandırma Türü | Hibrit |
| | Kış | 1 clo | | |

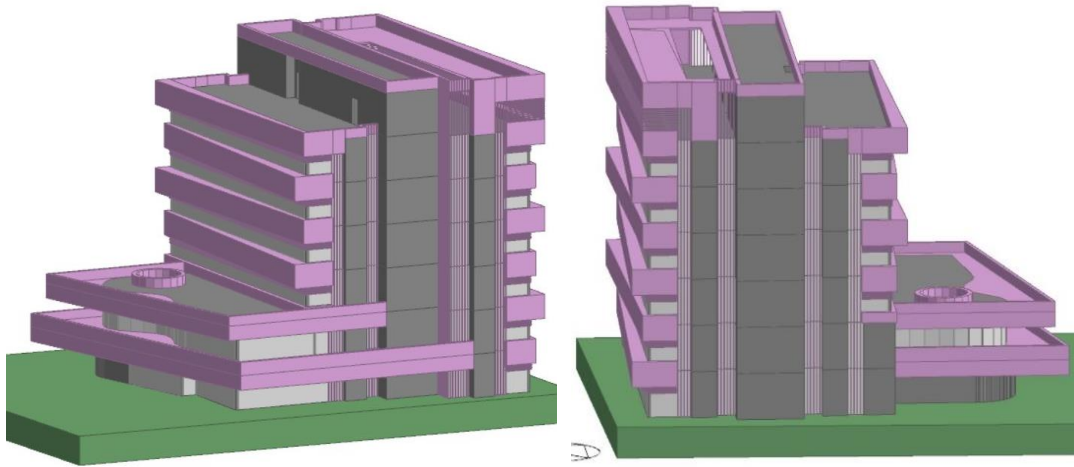
Tablodaki bazı veriler (metabolizma hızı, ekipman iç kazanım vb.), mevcut binaya ait özellikler ile birebir olması kaydıyla benzetim programının veri kütüphanesinde tanımlı kategorilerden seçilerek elde edilmiştir. ASHRAE-55 Standartı (2010), kullanıcıların ısı

konforunu sağlamak amacıyla önerilen sıcaklık aralıklarını tanımlamıştır. Bu doğrultuda, simülasyonda kullanılan ısıtma ve soğutma sistemlerinin çalışma sıcaklıkları, yaz ve kış mevsimleri için belirlenen sınır değerlere dayanmaktadır. Bu bilgilere ek olarak, ortam sıcaklığının 24°C'nin üzerine çıktığı durumlarda doğal havalandırma yapılması öngörülmektedir.

Modelleme sürecinde, her ısıl bölgenin işlevsel özellikleri ve kullanım gereksinimleri dikkate alınmış; benzer ısıl karaktere sahip mekânlar, modelin sadeleştirilmesi amacıyla bir araya getirilmiştir. Bu doğrultuda, zemin kat, birinci kat ve 2–5. katlara ait ısıl bölgelemeler Şekil 3.8'de sunulmuştur. Şekil 3.9'da ise DesignBuilder programında modellenen örnek binanın mevcut durumu görülmektedir.



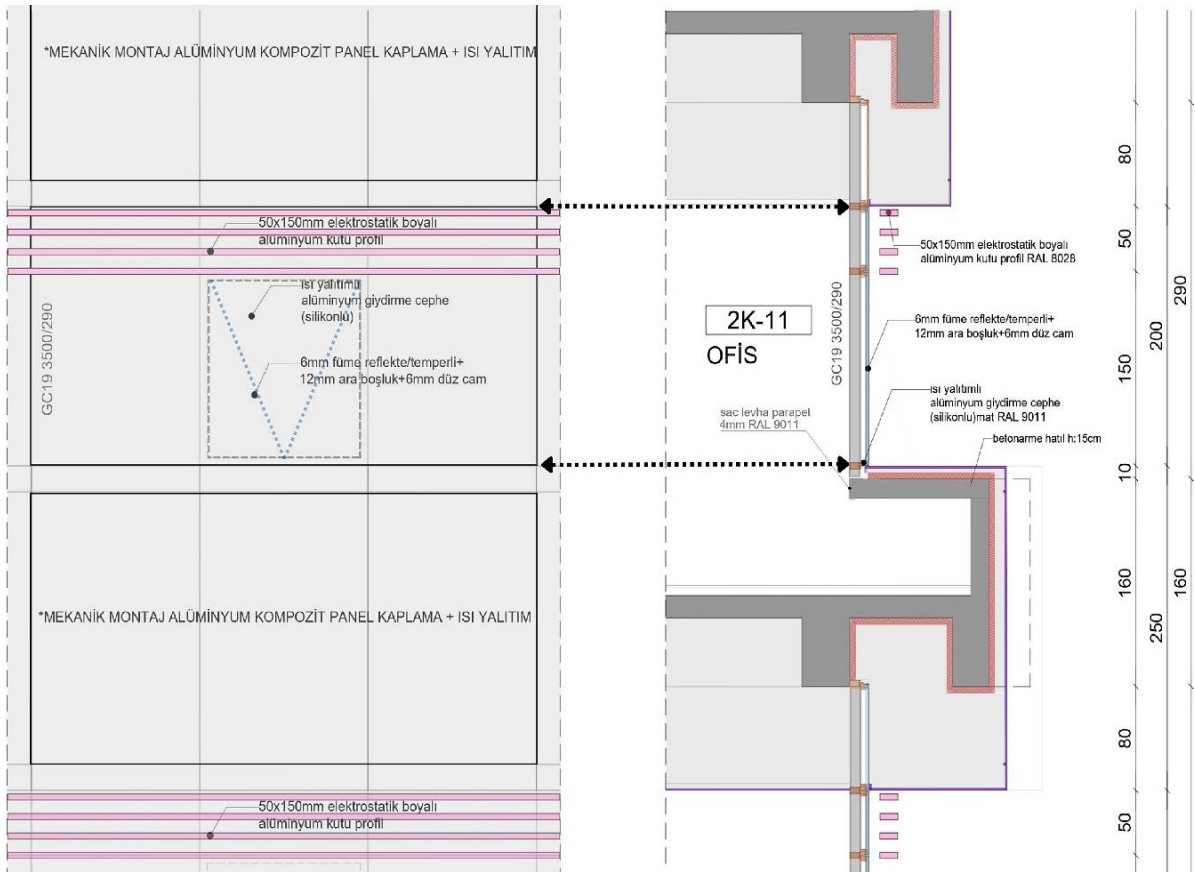
Şekil 3.8: Benzetim programında çizilen kat planları ve ısıl bölgelemeler.



Şekil 3.9: DesignBuilder programında çizilen mevcut binanın üç boyutlu simülasyon modelleri.

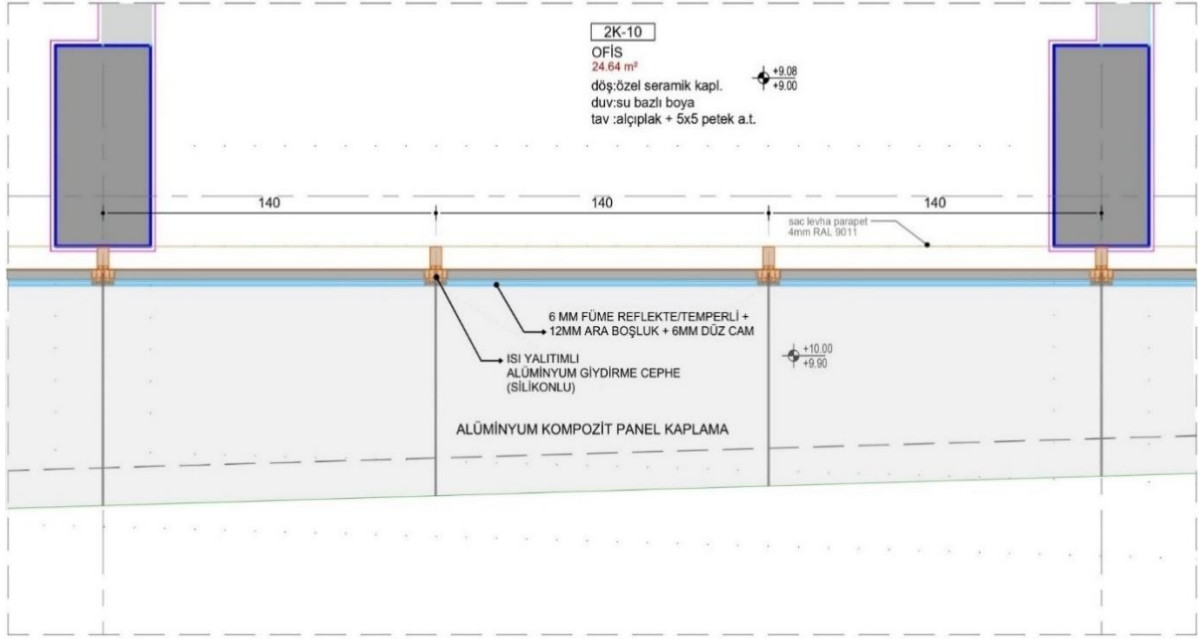
3.2 Örnek Binaya ait Cephe Tasarımı ve Detayları

Uygulama çalışmasının yürütüldüğü örnek binanın paralel cepheleri aynı olacak biçimde birbirinden farklı malzeme ve sistemler ile donatılmıştır. Binanın kuzeybatı ve güneydoğu cephelerinde, her katta 2,5 m yüksekliğinde alüminyum kompozit panel kaplama (ACP) ve 2 m yüksekliğinde ısı yalıtımlı alüminyum doğramaya sahip giydirme cephe bulunmaktadır. Alüminyum kompozit paneller cephede asimetrik bir ritim oluşturmaktadır. Cephede yer alan geniş cam yüzeyler, ofis ve toplantı salonu gibi işlevsel alanlara hizalanarak bu mekânlarda doğal aydınlatma imkânı sunmaktadır. Ofis binası, cephe boyunca düzenlenmiş yatay gölgelendirme elemanlarına sahiptir. Gölgelendirme elemanları, her katta geniş cam yüzeylerin bulunduğu yerlerde sürekli olarak konumlandırılmıştır. Bu elemanlar, alüminyum kutu profillerden oluşmakta olup cephelerdeki saydam yüzeylerin üst kısımlarına monte edilmiştir ve 50 cm'lik alan kaplayacak şekilde toplam dört adettir. Şekil 3.10'da ağırlıklı olarak kuzeybatı–güneydoğu cephelerinde konumlandırılan ACP sistemine ait kısmi görünüş ve kesit sunulmaktadır.

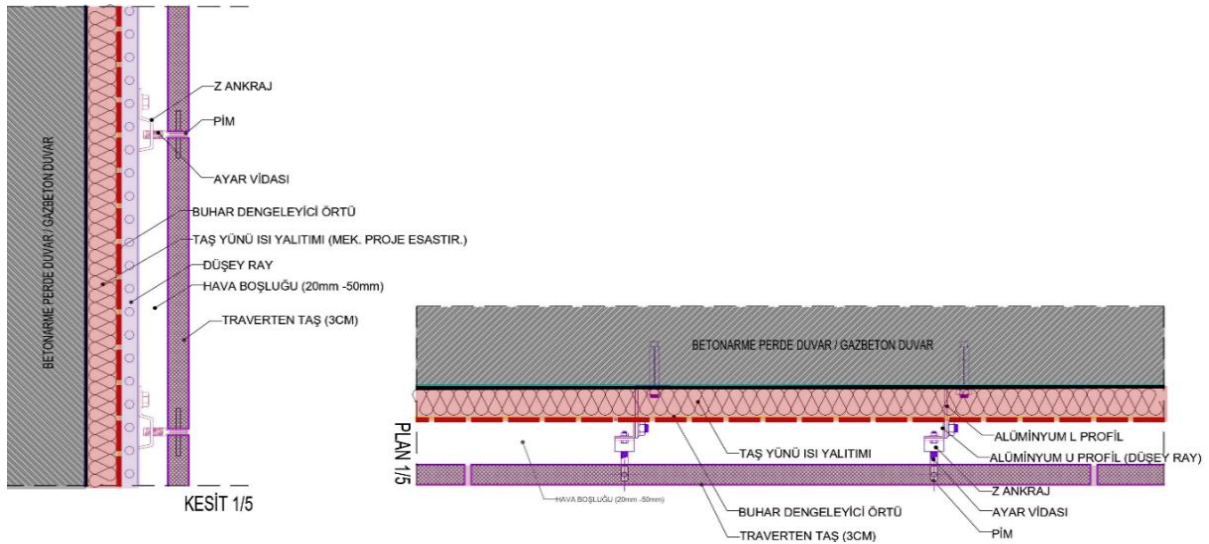


Şekil 3.10: Örnek binanın alüminyum giydirme cephesine ait görünüş ve kesiti.

Şekil 3.11’de cephe sistemine ait detay planı yer almaktadır. Bu plana göre, alüminyum giydirme cephe, silikon bağlantılar aracılığıyla birleştirilmiş olup paneller 140 cm genişliğinde modüler bir yapıda yerleştirilmiştir. Ofis binasında ağırlıklı olarak kuzeydoğu ve güneybatı cephelerinde kullanılan traverten kaplama sistemine ait 1/5 nokta detayları Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.11: Örnek binanın cephe sistem detay planı.



Şekil 3.12: Mekanik montaj traverten kaplama nokta detayı 1/5.

Mevcut binanın yapı malzemeleri ve fiziksel özellikleri, U-değerleri ile birlikte Tablo 3.4’de listelenmektedir. Örnek binanın mimari projesine göre yapı konstrüksiyonu, DesignBuilder programında birebir tanımlanmıştır. Binanın enerji performansını doğru bir şekilde simüle edebilmek için bu adım gereklidir. Her bir yapı elemanının (duvar, pencere, çatı, zemin, vb.) katmanları, malzeme türleri, fiziksel ve ısı özellikleri ile birlikte U-değerleri dikkate alınarak programa girilmiştir.

Tablo 3.4: Örnek ofis binasına ait yapı malzemelerinin fiziksel özellikleri.

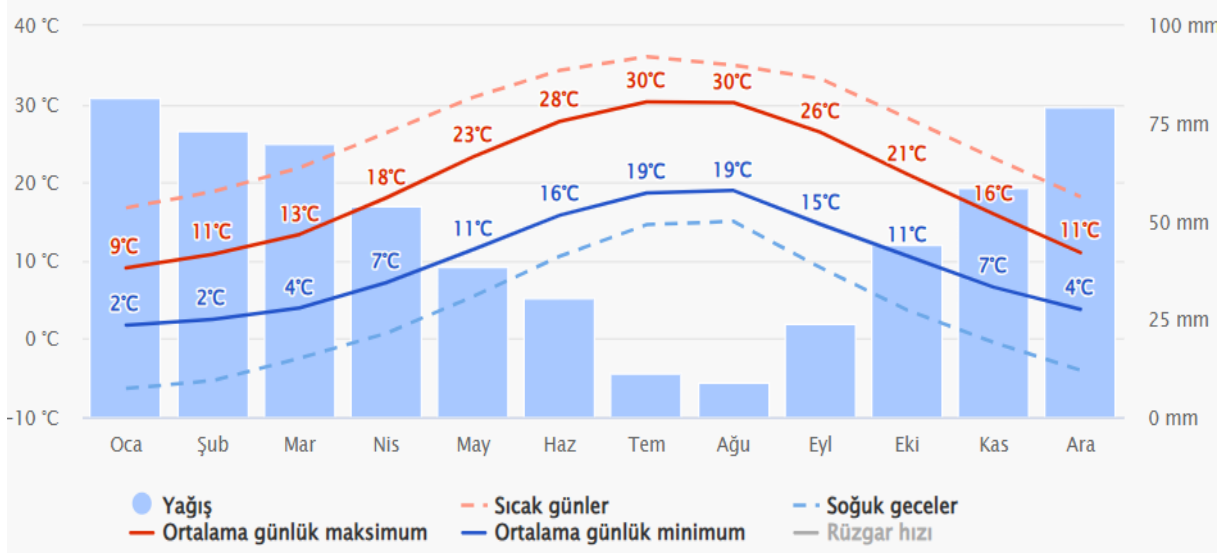
| Yapı Elemanları | Malzeme Bileşenleri (Dıştan içe) | Kalınlık (mm) | Isıl İletkenlik ($\lambda = W/mK$) | U-Değeri (W/m^2K) |
|--------------------------------------|---|---------------|--------------------------------------|-----------------------|
| Kuzeybatı-Güneydoğu Dış Duvar | Alüminyum Kompozit Panel Kaplama (Mekanik Montaj) | 4 | 0,033 | 0,543 |
| | Taş Yünü | 50 | 0,040 | |
| | Betonarme Parapet h: 75 | 150 | 2,50 | |
| | Alüminyum Giydirme Cephe | 6+12+6 | 0,075 | |
| Kuzeydoğu-Güneybatı Dış Duvar | Traverten Taş Kaplama (Mekanik Montaj) | 30 | 2,3 | 0,300 |
| | Kaba Sıva (kireç+çimento) | 30 | 1,4 | |
| | Buhar Dengeleyici Örtü | 1 | - | |
| | Taş Yünü | 50 | 0,040 | |
| | Gazbeton Duvar | 200 | 0,11 | |
| | Kaba Alçı Sıva | 20 | 0,81 | |
| Toprak Temaslı Dış Duvar | Saten Alçı | 20 | 0,51 | 0,574 |
| | Tuğla duvar | 85 | 0,33 | |
| | Taş yünü | 45 | 0,040 | |
| | 3 kat sürme su yalıtımı | 5 | 0,17 | |
| İç Duvar | Betonarme perde duvar | 400 | 2,50 | 0,616 |
| | Alçı sıva + boya | 20 | 0,35 | |
| | Gazbeton duvar | 200 | 0,11 | |
| Ara Kat Döşemesi | Alçı sıva + boya | 20 | 0,35 | 1,488 |
| | 60x60 özel seramik kaplama | 20 | 1,2 | |
| | Yapıştırma harcı | 5 | 1 | |
| | Tesviye betonu | 60 | 1,65 | |
| | Betonarme döşeme | 170 | 2,50 | |
| 1. Kat Yürünebilir Teras | Betonarme perde duvar | 400 | 2,50 | 0,284 |
| | 5x5 petek + alçıplak asma tavan | 12,5 | 0,21 | |
| | Deck kaplama | 20 | - | |
| | Yükseltilmiş döşeme | 80 | - | |
| | Eğim betonu | 80 | 1,4 | |
| | Geotekstil örtü | 10 | 0,14 | |
| | XPS ısı yalıtımı | 40 | 0,034 | |
| | Çimento esaslı sürme su yalıtımı | 10 | 0,17 | |
| | 200 doz tesviye betonu | 50 | 1,65 | |
| | Betonarme döşeme | 170 | 2,50 | |
| 2. Kat Yürünemeyen Teras | Taş yünü | 50 | 0,040 | 0,611 |
| | Cam elyaf şilte kaplama levha (40x40 kutu profil) | 12,5 | 0,035 | |
| | Yıkanmış kum-çakıl kaplama | 100 | 2 | |
| 2. Kat Yürünemeyen Teras | Geotekstil örtü | 10 | 0,14 | 0,611 |
| | XPS ısı yalıtımı | 40 | 0,034 | |

Tablo 3.5 (devam)

| | | | | |
|--|----------------------------------|------|---------------------|--------------|
| | Çimento esaslı sürme su yalıtımı | 10 | 0,17 | |
| | Eğim betonu | 100 | 1,4 | |
| | Betonarme döşeme | 170 | 2,50 | |
| | 60x60 Kaymaz seramik kaplama | 20 | 1,2 | |
| | Yapıştırma harcı | 5 | 1 | |
| | Eğim betonu | 100 | 1,4 | |
| | Geotekstil örtü | 10 | 0,14 | |
| | XPS ısı yalıtımı | 40 | 0,034 | 0,549 |
| | Çimento esaslı sürme su yalıtımı | 10 | 0,17 | |
| | 200 doz tesviye betonu | 50 | 1,65 | |
| | Betonarme döşeme | 170 | 2,50 | |
| | Alçıplak + 5x5 petek asma tavan | 12,5 | 0,21 | |
| | Yıkanmış kum-çakıl kaplama | 100 | 2 | |
| | Koruma betonu | 50 | 1,4 | |
| | Çimento esaslı sürme su yalıtımı | 10 | 0,17 | 2,359 |
| | Eğim betonu | 100 | 1,4 | |
| | Betonarme döşeme | 170 | 2,50 | |
| | 40x40 seramik kaplama | 20 | 1,2 | |
| | Yapıştırma harcı | 5 | 1- | |
| | Tesviye betonu | 60 | 1,4 | |
| | Donatılı beton döşeme | 150 | 2,5 | |
| | Stabilize dolgu | 250 | 0,52 | |
| | Geotekstil keçe | 5 | 0,19 | |
| | Taş yünü | 50 | 0,040 | 0,356 |
| | Radye temel | 1000 | 2,5 | |
| | Izolasyon koruma betonu | 100 | 1,4 | |
| | Bitüm esaslı serme su yalıtımı | 15 | 0,23 | |
| | Grobeton | 100 | 0,8 | |
| | Kum-çakıl serim | 100 | 2 | |
| | Cam | 6 | SHGC: 0.225 | |
| | Hava Boşluğu | 12 | Işık İletimi: 0.118 | 2,4 |
| | Cam | 6 | | |

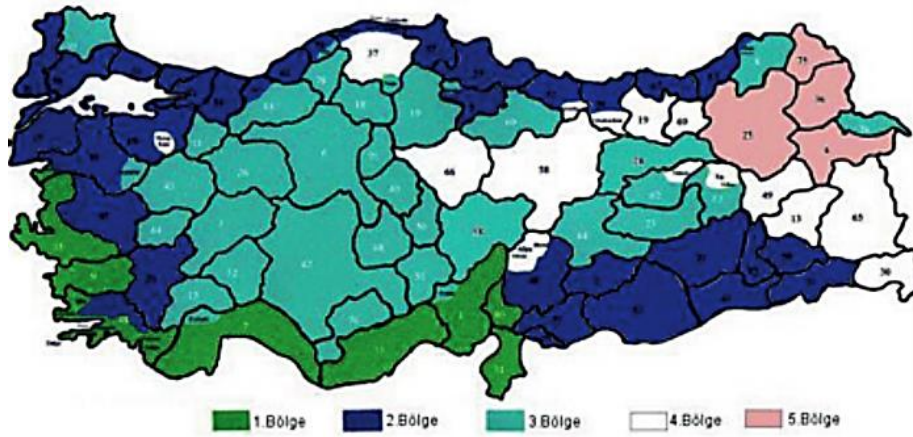
3.3 Balıkesir İli İklim Koşulları

Alan çalışmasının yürütüldüğü Balıkesir ili (39.536265 E, 28.011154 B), yazları sıcak ve kurak, kışları ise serin ve yağışlı bir iklime sahiptir. Balıkesir'de Ege kıyılarında Akdeniz iklimi, kuzeyde Marmara iklimi ve iç kesimlerde karasal iklim özellikleri bir arada görülür. Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre Csa iklim kuşağında, sıcak ve kuru yazlara sahip Akdeniz iklimi bölgesinde yer almaktadır. Kıyı bölgelerinde yaz ve kış sıcaklıkları arasındaki fark düşük kalırken, iç kesimlerde bu fark daha belirgindir. Doğuda bulunan dağlık alanlarda ise kışlar sert, yazlar serin geçer. Yıllık yağış miktarı 540-740 mm arasında değişmektedir, bu da yerel bitki örtüsü ve tarımsal faaliyetler üzerinde etkili olmaktadır (URL-20; URL-21). Balıkesir iline ait 30 yıllık iklimsel veriler, meteorolojik modellemeler sunan Meteoblue platformundan temin edilmiştir (Şekil 3.13). Ocak ve şubat aylarında en düşük sıcaklıklar görülürken, en yüksek sıcaklık 30°C olarak temmuz ayında kaydedilmiştir.



Şekil 3.13: Balıkesir iline ait son 30 yıllık ortalama iklimsel veriler (URL-22).

Türkiye'de binalarda net ısıtma enerjisi ihtiyacını hesaplamak ve izin verilen en yüksek ısıtma enerjisini belirlemek amacıyla TS 825 “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları” standardı uygulanmaktadır. Bu standart, binaların enerji verimliliğini artırmak ve daha çevre dostu yapılar oluşturmak için belirlenmiştir (BEP, 2008). Şekil 3.14’te Türkiye’nin TS 825’in güncellenmiş halinde, derece gün bölgelerine göre illerimiz verilmiş olup alan çalışmasının gerçekleştirildiği Balıkesir ili haritaya göre 2. Bölgede yer almaktadır.



Şekil 3.14: TS 825'e göre derece gün bölgeleri (Atmaca, 2016).

TS 825 standardına göre, ülkemizin ayrıldığı 5 ayrı bölge için duvar, çatı, zemin ve pencere U-değerleri Tablo 3.6’de verilmiştir.

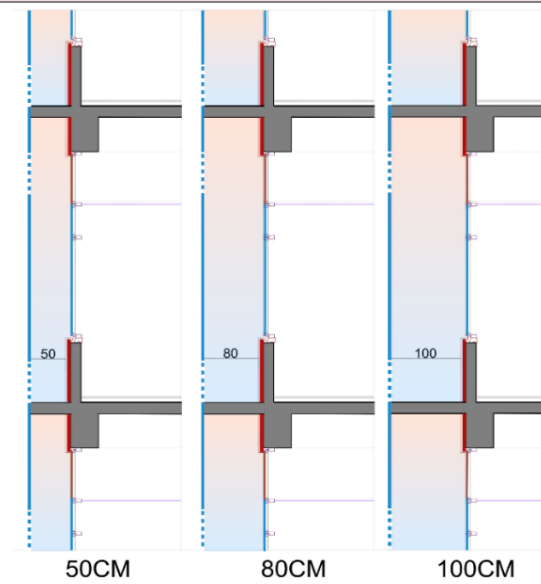
Tablo 3.6: TS 825'e göre U-değeri gereksinimleri (Atmaca, 2016).

| TS 825 İklim Bölgesi | Duvar [W/ (m ² .K)] | Çatı [W/ (m ² .K)] | Zemin [W/ (m ² .K)] | Pencere [W/ (m ² .K)] |
|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 1. Bölge | 0,66 | 0,43 | 0,66 | 1,8 |
| 2. Bölge | 0,57 | 0,38 | 0,57 | 1,8 |
| 3. Bölge | 0,48 | 0,28 | 0,43 | 1,8 |
| 4. Bölge | 0,38 | 0,23 | 0,38 | 1,8 |
| 5. Bölge | 0,36 | 0,21 | 0,36 | 1,8 |

3.4 Çift Kabuk Cephe Kuruluşu Tasarımlarının Belirlenmesi

Çift kabuk cephelerin enerji performansı, çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Bunlar, çift kabuk cephe tipi ve tasarımı, iklim koşulları, konum, malzeme türü gibi değişkenlerin yanı sıra havalandırma stratejileri, kullanıcı davranışları ve enerji sistemleriyle entegrasyon gibi unsurları da kapsar (Al-awag and Wahab, 2022). Dolayısıyla, çift kabuk cephe tasarımında bu faktörlerin bütüncül bir şekilde değerlendirilmesi, cephe sisteminin performans potansiyelini yerine getirmesinde etkilidir. Bu tez çalışması, mevcut tek kabuk cephe sistemi ile belirli parametreler kullanılarak oluşturulan çift kabuk cephe tasarımlarının karşılaştırılmasını ele almaktadır. Parametreler, çift kabuk cephelerin enerji performansını etkileyen faktörler temel alınarak belirlenmiş olup Tablo 3.7'de gösterilmektedir.

Tablo 3.7: Çift kabuk cephe kuruluşları cephe tasarım parametreleri.

| Boşluk Genişlikleri: | ÇKC Tipi: | Kutu Tipi |
|---|---------------------------|------------------------------|
|  | Cam Türü: | Low-e |
| | | Elektrokromik |
| | | Termokromik |
| | | Reflektif Cam |
| | Yönlenme: | Doğu-Batı |
| | | Kuzey-Güney |
| | | Kuzeybatı-Güneydoğu (Mevcut) |
| | Havalandırma Türü: | Doğal Havalandırma |
| | | Mekanik Havalandırma |
| | | Hibrit Havalandırma |

Çalışma kapsamında modellenen ÇKC kuruluşlarını tanımlamak için tasarım kodları oluşturulmuştur. Bu kodlar, her bir ÇKC kuruluşunu temsil eden parametreleri sistematik bir şekilde ifade etmektedir. Tablo 3.8’de bu kodlara yer verilmiştir. Örneğin, 50 cm genişliğinde tampon bölgeye sahip, low-e cam kaplamalı, doğu-batı yönlenmeli ve doğal havalandırma türüne sahip bir ÇKC kuruluşu için tasarım kodu: 50-LOW-DB-DH olacaktır ve 50-LOW-DB-DH ÇKC kuruluşu olarak tanımlanacaktır.

Tablo 3.8: Çalışma kapsamında oluşturulan ÇKC kuruluşlarının kodlanması.

| PARAMETRELER | VERİ | MODEL TASARIM KODU |
|-------------------|----------------------|--------------------|
| BOŞLUK GENİŞLİĞİ | 50 cm | 50 |
| | 80 cm | 80 |
| | 100 cm | 100 |
| CAM TÜRÜ | Low-e | LOW |
| | Elektrokromik | EC |
| | Termokromik | TC |
| | Reflekte Çift Cam | REF |
| YÖNLENME | Doğu-Batı | DB |
| | Kuzey-Güney | KG |
| | Mevcut (KB-GD) | M |
| HAVALANDIRMA TÜRÜ | Doğal Havalandırma | DH |
| | Mekanik Havalandırma | MH |
| | Hibrit Havalandırma | HH |

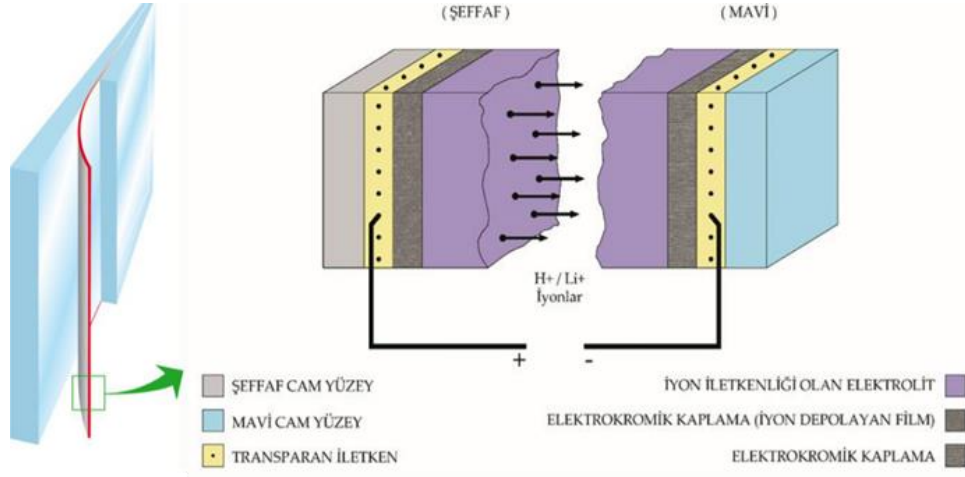
Çift kabuk cephe kuruluşları oluşturulurken, kutu tipi ÇKC’nin sabit parametre olarak belirlenmesinin temel nedeni; düşük yangın riski, ses ve koku izolasyonu gibi birçok olumlu yönlerin yanı sıra, modüler cephe geometrisine sahip olması sayesinde hava akışının homojen dağılımını sağlaması ve ısı kayıp/kazançları üzerinde etkili ÇKC tipi olarak öne çıkmasıdır. Ayrıca, yapısal olarak kutu tipinin geometrisi, enerji modellemesi süreçlerinde yüksek hassasiyet ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine olanak tanıdığından seçilmiştir. Mevcut yönlenmenin dışında, kuzey-güney ve doğu-batı yönlenmelerinin seçilmesi, ofis mekânlarının yoğunlukla bulunduğu cephelerin doğal ışık erişimi ve iç mekân kullanım dinamikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Tüm havalandırma yöntemlerinin test edilmesi ise, enerji tüketimi ile ısı konfor arasındaki dengeyi farklı stratejiler üzerinden analiz etmek amacıyla

gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, mekanik havalandırma, doğal havalandırma ve hibrit sistemler gibi yöntemlerin performansı karşılaştırmalı olarak incelenerek, optimum çözümlerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Son olarak, kuruluşlarda kullanılan farklı cam türlerinin seçilmesinin sebepleri, literatür taraması ile desteklenerek aşağıda sunulmuştur.

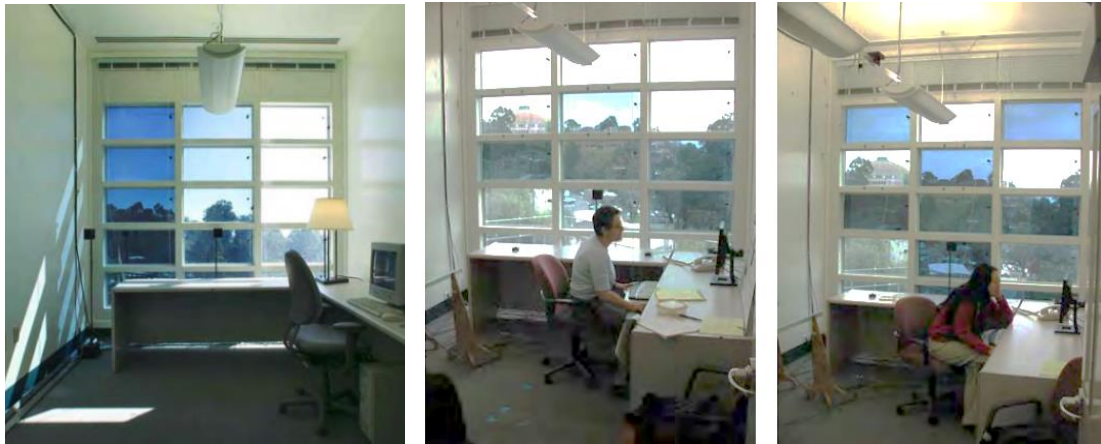
Çift kabuk cephe sistemleri, enerji performansını optimize etmek ve iç mekân konforunu artırmak amacıyla gelişen akıllı malzeme teknolojileriyle entegre dinamik çözümler sunmaktadır. Bu bağlamda, tez çalışmasında cam türü parametresi olarak belirlenen elektrokromik (EC), termokromik (TC), reflektif (REF) ve low-e (LOW) camların tercih edilme gerekçesi, bu malzemelerin cephe davranışını etkileyen kritik fonksiyonları bünyesinde barındırmalarıdır.

Elektrokromik (EC) camlar, uygulanan düşük voltajlı elektriksel uyarımlarla anlık olarak ışık geçirgenlik seviyelerini modüle edebilen adaptif bir yapı sunmaktadır (Compagno, 2002). Bu dinamik kontrol mekanizması, güneş ışınımına bağlı ısı kazançlarını sınırlandırarak soğutma yüklerinde azalma sağlamak ve doğal aydınlatma dengesini koruyarak yapay aydınlatma ihtiyacını minimize etmektedir (Casini, 2018). Elektrokromik camların kullanımıyla, uygun tasarım ve kontrol stratejileri benimsenerek bazı iklim koşullarında enerji tüketimi %50'ye varan oranlarda azaltılabilirken, çoğu iklimde %20-30 arasında tasarruf sağlanabilmektedir (Schwartz, 2008). Özellikle mevsimsel sıcaklık farklarının yoğun olduğu coğrafyalarda ÇKC'lerle entegre EC cam katmanları, yapı kabuğunu "canlı bir organizma" gibi işlevsel kılar. Özellikle mevsimsel sıcaklık farklarının yoğun olduğu coğrafyalarda, çift kabuk cephe sistemleriyle entegre edilen EC cam katmanları, yapı kabuğunu adeta "canlı bir organizma" gibi işlevsel kılmaktadır (Granqvist, 2016; Bai et al., 2023). Firouzabad ve Astarai (2024), sıcak-nemli havalarda çift cidarlı cephede elektro-kromik cam kullanarak elektrik tüketiminde %3,5'e kadar azalma elde edildiğini rapor ederken, Khalifa, Nour ve Elghamry (2023) ise optimum tasarlanmış ve kontrol edilen elektrokromik cam ile yıllık enerji tüketimini %14 oranında azaltabildiğini göstermiştir. Şekil 3.15'te elektrokromik cam sisteminin katmanlı yapısı sunulmuştur. Şekil 3.16'da ise, Lawrence Berkeley Ulusal Laboratuvarı (LBNL) öncülüğünde Lee ve arkadaşlarının 2006 yılında yaptıkları çalışma kapsamında incelenen EC camın, renk geçiş dinamikleri (şeffaflık seviyesinin sağdan sola kademeli olarak azalması) saha testleri kapsamında deneysel olarak gösterilmiştir. Kullanıcılar, görsel konfor (parlama kontrolü), görüş kalitesi ve mahremiyet gereksinimlerine bağlı olarak, elektrokromik camların

şeffaflık seviyelerini dinamik bir şekilde ayarlayabilmektedir. Dolayısıyla, bu cam türü hem kullanıcı odaklı tasarımın uygulanmasını desteklemekte hem de enerji verimliliğini artırarak sürdürülebilir bina performansına katkıda bulunmaktadır.



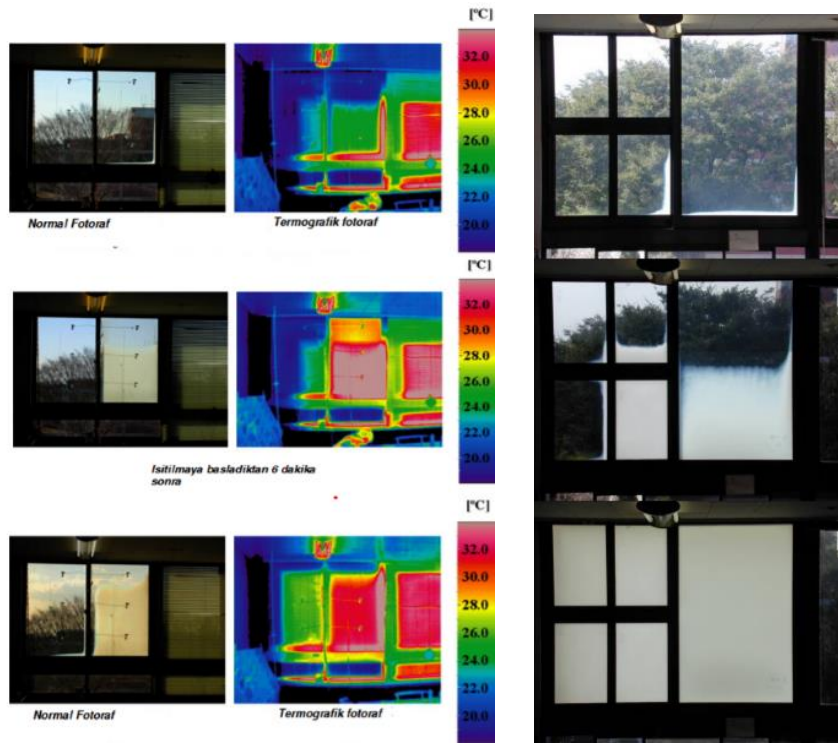
Şekil 3.15: Elektrokromik cam katmanları (Erkol ve Sayın, 2021).



Şekil 3.16: Elektrokromik camın üç farklı durumdaki saydamlık düzeyleri ve kullanıcı gereksinimlerine göre modüllerdeki değişim (Lee et al., 2006).

Pasif akıllı cam grubunda yer alan termokromik ise enerji girdisine ihtiyaç duymadan ortam koşullarına tepki verir. Termokromik camlar, belirli bir eşik sıcaklığının aşılması durumunda optik özelliklerini değiştirerek güneş enerjisi geçirgenliğini otomatik olarak düşürür (Tahmasbi et al., 2025). Reflektif kaplamalı camlar ve Low-E camlar ise akıllı malzeme sınıflandırmasının dışında kalsa da ısı yalıtımı ile görünür ışık spektrumunu seçici filtreleme yetenekleri nedeniyle ÇKC'lerde sıklıkla kullanılır. Yansıtıcı yüzeyler, güneş radyasyonunun önemli bir kısmını dış kabukta uzaklaştırarak iç hacme ulaşan enerjiyi sınırlarken; low-e kaplamalar, uzun dalga

infrared ışınımı yüzeyde tutarak kış koşullarında ısı kayıplarını azaltır. Giuseppe ve arkadaşları (2025), ılıman okyanus iklim koşullarında mekân ısıtma/soğutma enerji talebini azaltmak amacıyla, çift kabuk cephe sistemine entegre edilen farklı cam türleri ve tampon bölge havalandırma oranının etkilerini incelemiştir. Design Builder programı kullanılarak gerçekleştirilen enerji modellemesinde, low-e çift camların kış mevsiminde 26,7 kWhT/m², reflekte çift camların ise yaz mevsiminde 4,7 kWhT/m²'ye kadar enerji tasarrufu sağladığı belirlenmiştir. Inoue, Ichinose ve Ichikawa (2008), termokromik cam panellerin performansını deneysel ve simülasyonel yöntemlerle analiz etmiş; bu malzemenin sıcaklık değişimine bağlı olarak şeffaflık modülasyonu yeteneğini ortaya koymuştur. Çalışma kapsamında, termokromik camın belirli bir sıcaklık eşliğinde geçirgenlik seviyesindeki dinamik değişim Şekil 3.17'de sunulmuştur. Bu bulgular, termokromik camların pasif ısı kontrol ve enerji verimliliği bağlamında potansiyelini kanıtlamaktadır.



Şekil 3.17: Termokromik camın ısıtılmadan önce ve ısıtıldıktan sonra normal ve termografik görüntüleri ile farklı şeffaflık düzeyleri (Kazanasmaz ve Diler, 2011; Inoue, Ichinose and Ichikawa, 2008).

Tez kapsamında bu dört cam türünün simülasyon parametresi olarak seçilmesi, hem aktif-pasif sistemlerin hem de geleneksel-ileri teknolojilerin ÇKC performansına ve enerji tüketimine etkilerinin karşılaştırmalı analizine olanak tanımaktadır. DesignBuilder programında, ÇKC

kuruluşlarının modellenmesi sürecinde seçilen cam türlerine ait termo-optik özellikleri Tablo 3.9’da sunulmuştur.

Tablo 3.9: Simülasyonlarda kullanılan cam türlerinin termo-optik özellikleri.

| Cam Türü | Girdi | Çıktı | U-değeri (W/m ² K) | SHGC | Işık Geçirgenliği |
|--|----------|-----------------------------------|----------------------------------|-------|----------------------|
| Mevcut Durum (Reflekte/Temperli/Füme) | - | - | 2,4 | 0,225 | 0,118 |
| Termokromik | Sıcaklık | Şeffaflık oranının değişimi | 2,13 | 0,569 | 0,578 |
| Elektrokromik | Elektrik | | 1,83 | 0,427 | 0,6 |
| Low-e | - | - | 1,77 | 0,571 | 0,745 |
| Reflektif | - | - | 2,23 | 0,13 | 0,07 |

3.5 Bina Simülasyon Modelinin Kalibrasyonu

Tez çalışması kapsamında, mevcut bina özellikleri tanımlandıktan sonra DesignBuilder programında oluşturulan simülasyon modeli, güvenilirliğinin tespiti için kalibre edilmiştir. Bu süreçte, örnek ofis binasında bulunan 69 ofis birimi (68 ofis + 1 ön kuluçka merkezi), farklı firmalarca kiralanabilir durumda olduğundan, her birimdeki çalışan grupları bağımsız olarak faaliyetlerini sürdürmektedir. Dolayısıyla, gizlilik nedeniyle mahallerin kullanım süreleri ve enerji tüketim profilleri hakkında veri erişimi sınırlı olup; tüketim davranışları ise tamamen kiracıların tercihlerine bağlı olarak değişmektedir. Bu kapsamda, kiralanabilir her bir ofis birimine ait yıllık toplam klima ve elektrik tüketimini yansıtan faturalara ulaşılmıştır. İncelenen veriler ve örnek binada gerçekleştirilen gözlemler doğrultusunda, birçok ofisin yarı zamanlı veya seyrek kullanım nedeniyle metrekare başına düşük enerji tüketimi sergilediği belirlenmiştir. Ancak, 69 farklı ofis mekanının kullanım sürelerine dair net bir veriye erişilememesinden dolayı kalibrasyonun sağlanması bağlamında model için bir kabul gerçekleştirilmiştir. Temel alınan referans tüketim değeri, aylık 20 iş günü boyunca tam doluluk sağlayan ve en yüksek yıllık enerji tüketimine sahip ofis biriminin verilerine dayandırılmıştır. Buna göre; 4. Kat 08 nolu ofis, yıllık toplam tüketim değeri 5.894,6 kWh ile tüm ofis mahalleri içerisinde en yüksek tüketimi göstermiş olup referans ofis olarak seçilmiştir. Yıllık toplam enerji tüketimi, referans ofise oranla %10’un (589,4 kWh/yıl) altında kalan mahallerin boş olduğu varsayılmıştır ve simülasyonlarda “ısıtılmayan alan” olarak işaretlenerek enerji çıktılarına dahil edilmemiştir. Belirlenen eşik değerinin altında kalan ofis sayısı 23 olup buna

karşılık gelen alan ise 617 m²'dir. Ek olarak, düşük kullanım yoğunluğu ve referans değerini karşılayamayan fuaye/sergi alanı, seminer salonu, konuşmacı odası, server odası ve ön kuluçka merkezinin de tüketim değerleri ve metrekaresi toplam ısıtılan alan ve yıllık toplam elektrik tüketimine dahil edilmemiştir. Tablo 3.10'da örnek ofis binasının enerji tüketimleri değerlendirilirken baz alınan net ısıtılan alan görülmektedir. Gerçek verilerden sapılmaması ve bu kabulün yıllık toplam tüketim değerleri bakımından düşük düzeylere karşılık gelmesi sebebiyle %10 oranı kabul edilmiştir. Sonuç olarak, kullanımı süreklilik arz etmeyen alanların boş olarak nitelendirilmesi ile enerji modelinin gerçekçi sınırlar içinde kalması sağlanmış ve simülasyon sonuçlarının doğrulanabilirliği artırılmıştır.

Özetle, enerji modellemesinin kabulü;

- Referans Değer: En yüksek yıllık toplam tüketimi gerçekleştiren ve tam doluluk sağlayan ofis (5.894,6 kWh/yıl).
- Eşik Değer: 589,4 kWh/yıl (Referans değerinin %10'u).

Tablo 3.10: Yapılan kabule göre net ısıtılan alan.

| Mevcut Binada Isıtılan Alan | Kabule Göre Isıtılmayan Alanlar | Net Isıtılan Alan |
|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 3840,4 m ² | 1.044,84 m ² | 2795,56 m² |

Tüm bu süreçlerin sonunda, modellemenin doğruluğunu test etmek için MBE (Mean Bias Error) ve CVRMSE (Coefficient of Variation of the Root Mean Squared Error) metrikleri kullanılmıştır. Bina enerji modellemesinde kalibrasyon, gerçek (ölçülen) verilerin simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılması ve ASHRAE Kılavuzu 14 (ASHRAE, 2014) ile IMPVP (IMPVP, 2010) tarafından sunulan kabul kriterlerinin sağlanmasıyla gerçekleştirilir. Tablo 3.11'de bu referanslar kapsamında model kalibrasyonu için sınır değerler belirtilmiştir.

Tablo 3.11: Bina enerji simülasyon modellerinin kalibrasyonu için \pm sınır değerleri (Zuhaib et al., 2019).

| Kalibrasyon Türü | Metrik | ASHRAE Guide 14 | IMPVP |
|------------------|-----------|-----------------|-------|
| Aylık | MBE | %5 | %20 |
| | CV (RMSE) | %15 | - |
| Saatlik | MBE | %10 | %5 |
| | CV (RMSE) | %30 | %20 |

Kalibrasyon sürecinin ilk aşamasında ortalama sapma hatası (MBE) hesaplanmıştır. MBE, modelin sistematik sapmalarını ortaya koyan bir hata ölçüsüdür. Saatlik veya aylık olarak gerçekte ölçülen ile simülasyon sonucu elde edilen veriler arasındaki ortalama farkı ifade eder. MBE aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$MBE (\%) = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} (m_i - s_i)}{\sum_{i=1}^{N_p} (m_i)} \quad (3.1)$$

m_i : ölçülen gerçek değer

s_i : simüle edilmiş değer

N_p : “p” aralığındaki verilerin sayısıdır (N aylık=12).

İkinci aşamada ise, gerçekte ölçülen değerler ile simülasyon sonuçları arasındaki mutlak hata büyüklüğünü ifade eden RMSE (hata karelerinin ortalamasının kökü) değeri hesaplanmıştır. Bunun için, her bir saatlik/aylık eşleştirilmiş veri noktalarındaki hata (fark) bulunur. Tüm farkların karesi alınarak ilgili dönemdeki veri sayısına (aylık veya toplam periyot) bölünür. Son olarak, bu değerlerin karekökü alınır ve RMSE değeri elde edilir. CV standart sapmanın ortalamaya oranıdır. Bu doğrultuda CVRMSE (hata karelerinin ortalamasının kökü değişim katsayısı), bulunan RMSE değerinin, ölçülen gerçek verilerin ortalamasına bölünmesiyle elde edilir (ASHRAE, 2014). CVRMSE aşağıdaki gibi formüle edilmektedir:

$$CVRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_p} ((m_i - s_i)^2 / N_p)}}{\bar{M}_p} \quad (3.2)$$

m_i : ölçülen gerçek değer

s_i : simüle edilmiş değer

N_p : “p” aralığındaki verilerin sayısıdır (N aylık=12).

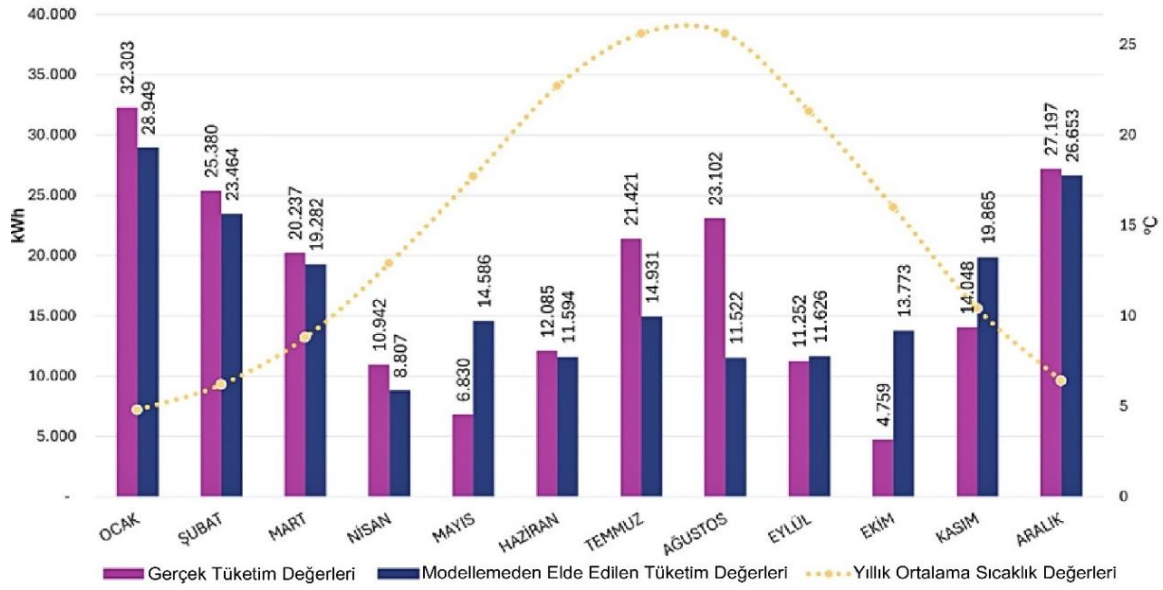
M_p : ölçülen gerçek değerlerin ortalamasıdır.

\bar{M}_p değeri de aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

$$\bar{M}_p = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} m_i}{N_p} \quad (3.3)$$

m_i : ölçülen gerçek değer

N_p : “p” aralığındaki verilerin sayısıdır (N aylık=12).



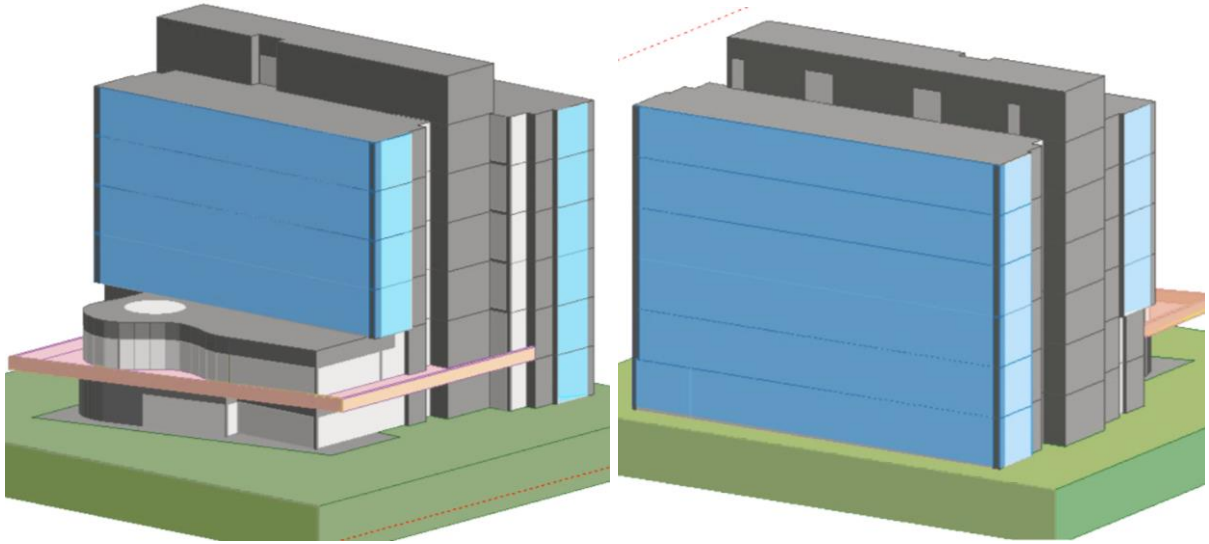
Şekil 3.18: Örnek ofis binasına ait 2024 yılı gerçek ve simülasyon enerji tüketimleri.

Örnek ofis binasının kalibrasyonu için oluşturulan modelin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucu elde edilen aylık enerji tüketim verileri ve 2024 yılına ait gerçek tüketim değerleri Şekil 3.18’de karşılaştırılmıştır. Modelin geçerliliğini kontrol etmek için MBE ve CV RMSE değerleri hesaplanmıştır (bkz. Denklemler (3.1)-(3.3)). Yapılan hesaplamalar sonucunda; MBE değeri %-2,19; CV RMSE değeri ise %7,6 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada, ASHRAE Kılavuzu 14 Tablo 3.11: Bina enerji simülasyon modellerinin kalibrasyonu için \pm sınır değerleri (Zuhaib et al., 2019). Tablo 3.11’da belirtilen kabul edilebilir sınırlara göre, MBE aylık=%-2,19<%5 ve CVRMSE aylık=%7,6<%15 olduğundan enerji tüketimi için model geçerli ve güvenilirdir.

$$-\%5 \leq MBE_{aylık} \leq \%5 \text{ ve } CVRMSE_{aylık} \leq \%15 \quad (3.4)$$

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Tez çalışması kapsamında, Balıkesir ili iklim koşullarında bulunan bir ofis binasının mevcut tek kabuk cephe sisteminin çift kabuk cephe (ÇKC) sistemi ile değiştirilmesi durumu ele alınmıştır. DesignBuilder simülasyon programı kullanılarak çift kabuk cephe kuruluşlarının enerji performansı analiz edilmiştir. Çalışmada kutu tipi seçilmiş olup çift kabuk, ofis mekanlarının yoğunlukta bulunduğu kuzeybatı ve güneydoğu cephelerinde uygulanmıştır. Cam türü, yönlenme, havalandırma türü ve boşluk genişliği parametrelerinin ısıtma ve soğutma yükleri üzerindeki etkileri çeşitli ÇKC kuruluşları bağlamında incelenmiş; en düşük tüketim değerini sağlayan tasarım belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda, örnek ofis binası için Balıkesir iklim koşullarında en yüksek enerji tasarruf potansiyeline sahip ÇKC kuruluşu analiz edilmiştir. Şekil 4.1’te yer alan üç boyutlu modellemede, mevcut binada çift kabuk cephe uygulanan cepheler görülmektedir.

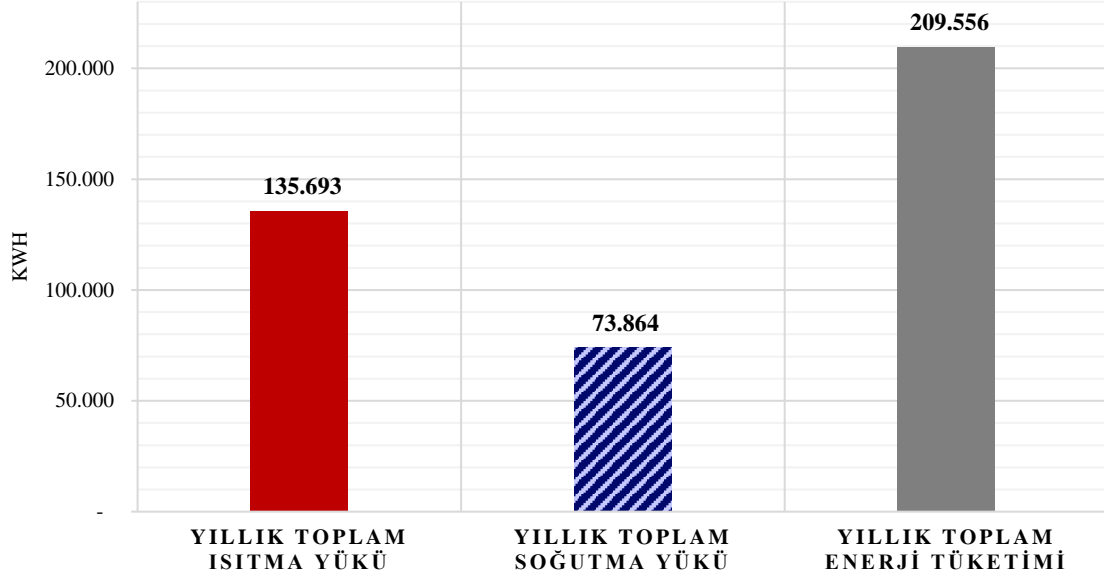


Şekil 4.1: Örnek binada çift kabuk cephe uygulanan yüzeyler.

4.1 Mevcut Binanın Yıllık Isıtma ve Soğutma Yüklerinin Hesaplanması

Mevcut binanın enerji performansını detaylı bir şekilde değerlendirmek amacıyla, ısıtma ve soğutma yüklerinin hesaplanmasına yönelik simülasyon çalışması yürütülmüştür. Bu doğrultuda mevcut ofis binasının metrekare başına düşen ısıtma/soğutma enerji tüketimi 74,96 kWh/m² olarak belirlenmiştir. Buna göre, Şekil 4.2’de görüldüğü üzere binanın yıllık ısıtma enerjisi tüketimi toplamda 135.693 kWh olup metrekare başına düşen ısıtma enerjisi 48,54

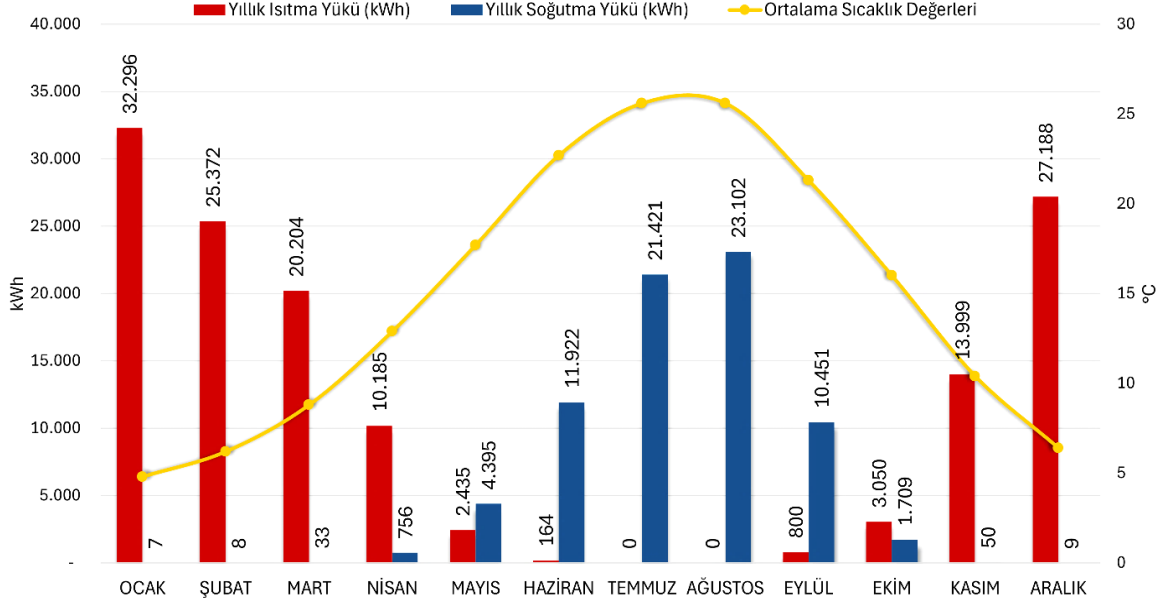
kWh/m²; soğutma için ise yıllık toplam tüketim 73.864 kWh iken metrekare başına düşen soğutma yükü 26,42 kWh/m² olarak bulunmuştur.



Şekil 4.2: Örnek ofis binasının yıllık toplam ısıtma/soğutma yükleri.

Şekil 4.3'te örnek ofis binasına ait yıllık ısıtma/soğutma yüklerinin kWh cinsinden ay bazında dağılımı sunulmuştur. Isıtma yükleri açısından en belirgin artış, 32.296 kWh ile ocak ayında gözlemlenmiş; bunu sırasıyla şubat (25.372 kWh) ve aralık (27.188 kWh) ayları takip etmiştir. Mart ayından itibaren ise bu değerlerin kademeli olarak düştüğü anlaşılmaktadır. Soğutma yüklerinde ise temmuz (21.421 kWh) ve ağustos (23.102 kWh) ayları en yüksek tüketim dönemlerini oluştururken, enerji gereksinimi mayıstan eylül sonuna kadar süregelen bir artış eğilimi sergilemiştir. Geçiş dönemleri olan nisan ve ekim aylarında hem ısıtma hem de soğutma gereksinimleri önemli ölçüde azalmakta; bu durum, dış ortam sıcaklıklarının iç-dış mekân arasındaki ısıl dengenin korunduğu ılıman bir seyir izlediğine işaret etmektedir.

Elde edilen sonuçlar, enerji tüketiminin mevsimsel hava koşullarıyla doğrudan ilişkili olduğunu ve cephe tasarımının binanın enerji performansını doğrudan etkileyerek tüketim değerlerinde belirleyici bir rol oynayacağını ortaya koymaktadır (Mahdavinejad et al., 2023). Bu nedenle, enerji etkinliğini artırma hedefiyle mevcut bina modelinin cephesine çeşitli çift kabuk cephe kuruluşları uygulanarak modellemeler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.3: Örnek ofis binasının bir yıllık ısıtma/soğutma yüklerinin aylara dağılımı.

Bu çalışmada, örnek binanın enerji tüketimini analiz etmek üzere referans ofis birimi baz alınarak bir kabul yapılmış ve modellemenin doğruluğu sağlanmıştır. Söz konusu ofis, aylık 20 iş günü boyunca sürekli kullanıldığı gözlemlenen ve gerçek tüketim değerlerine göre en yüksek yıllık enerji tüketimine sahip birimdir; tüm ofislerin tam doluluk durumu göz önünde bulundurularak enerji tüketimi tahmini yapıldığında:

- Referans ofisin yıllık toplam enerji tüketim değeri (5.894,6 kWh), yalnızca kiralanabilir ofis mekanlarının (68 ofis) toplam alanına (1.829 m²) uygulandığında, 400.832,8 kWh/yıl düzeyinde enerji tüketimi elde edileceği hesaplanmıştır. Bu değer, tüm ofislerin sürekli ve tam kapasite kullanıldığı durumu temsil etmektedir.
- Ofis alanlarında metrekare başına düşen toplam enerji tüketimi ise 219,15 kWh/m²'dir.

Türkiye genelinde ticari ve hizmet binalarının ortalama spesifik enerji tüketimi (SET) değeri 2023 yılı raporunda 155 kWh/m²·yıl olarak belirlenmiş olup iş merkezleri (ofis vb.) yapılar için bu değer ortalama 140 kWh/m²·yıl olarak hesaplanmıştır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024). Gerçek tüketim verileri ve simülasyon çıktıları temel alındığında, örnek ofis binasındaki metrekare başına düşen enerji miktarının bu sınır değerinin altında kaldığı görülmektedir. Buna karşın, enerji modellemesinde referans alınarak yapılan tahmini hesaplamaya göre, toplam 3840 m² ısıtılan alandan yalnızca ofis birimlerine ait 1829 m²'ye düşen enerji tüketimi,

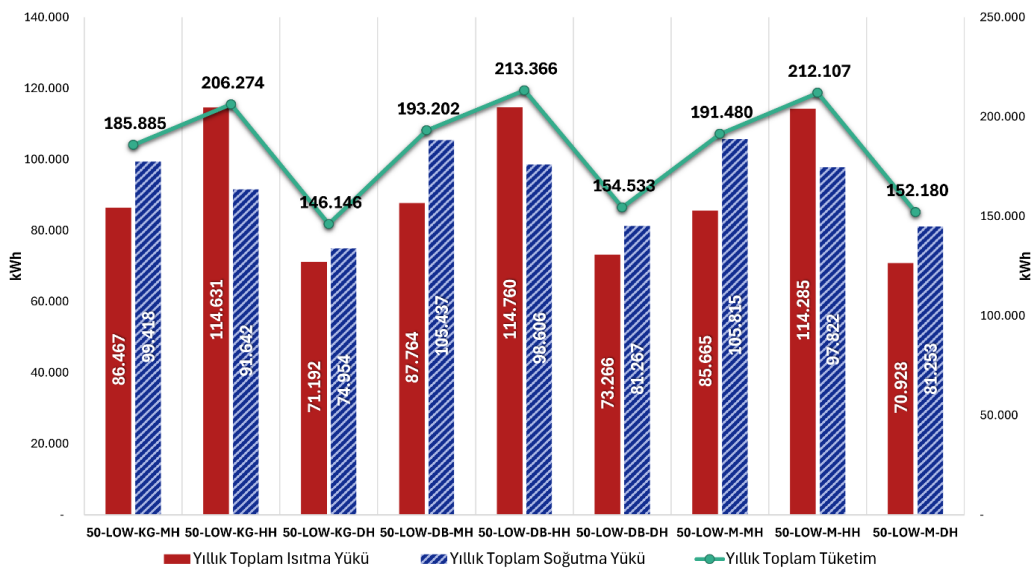
metrekare başına 219,15 kWh olarak belirlenmiştir. Bu değer, ilgili binalar için belirlenen ortalama SET değerinin oldukça üzerinde seyretmektedir.

4.2 Çift Kabuk Cephe Tasarım Parametrelerinin Isıtma ve Soğutma Yükleri Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, çift kabuk cephe sistemine ait tasarım parametreleri kapsamında gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarıyla ısıtma ve soğutma yükleri detaylı olarak incelenmiş; ısı yükleri üzerindeki etkisi karşılaştırmalı bir yaklaşımla ele alınarak enerji etkin cephe tasarımına yönelik çıkarımlar ortaya koyulmuştur. Tüm çift kabuk cephe kuruluşlarında kutu tipi çift kabuk cephe tercih edilmiştir.

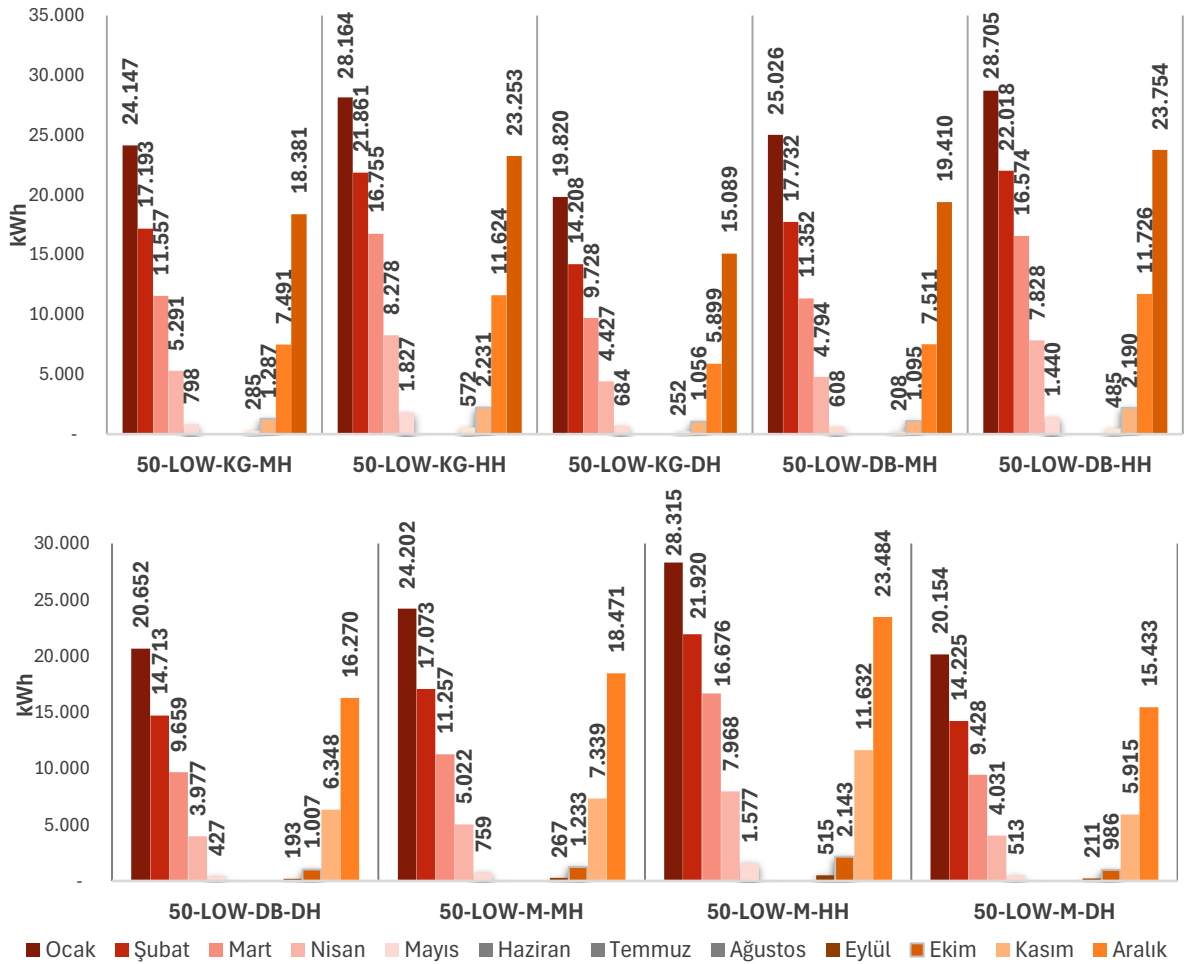
4.2.1 50 cm Boşluk Genişliğine Sahip Çift Kabuk Cephe Kuruluşlarının Analizi

50 cm boşluk genişliği ve low-e cam ortak parametrelerine sahip ÇKC kuruluşlarının ısı yükleri, farklı havalandırma türleri ve yönlenmeler bağlamında analiz edilmiştir. Şekil 4.4'te, söz konusu sabit parametreler altında gerçekleştirilen simülasyon çalışmasının sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafiğe göre, en düşük yıllık toplam enerji tüketimi 146.146 kWh ile 50-LOW-KG-DH ÇKC kuruluşundan elde edilmiş olup metrekare başına düşen ısıtma/soğutma yükü 52,28 kwh/m².yıl olarak hesaplanmıştır. Bu bağlamda, 50-LOW-KG-DH ÇKC kuruluşunun yıllık toplam enerji tüketimi, en yüksek değere sahip 50-LOW-DB-HH ile mevcut duruma (209.556 kWh/yıl) göre sırasıyla %31,5 ve %30,25 oranında azalma gözlenmiştir.



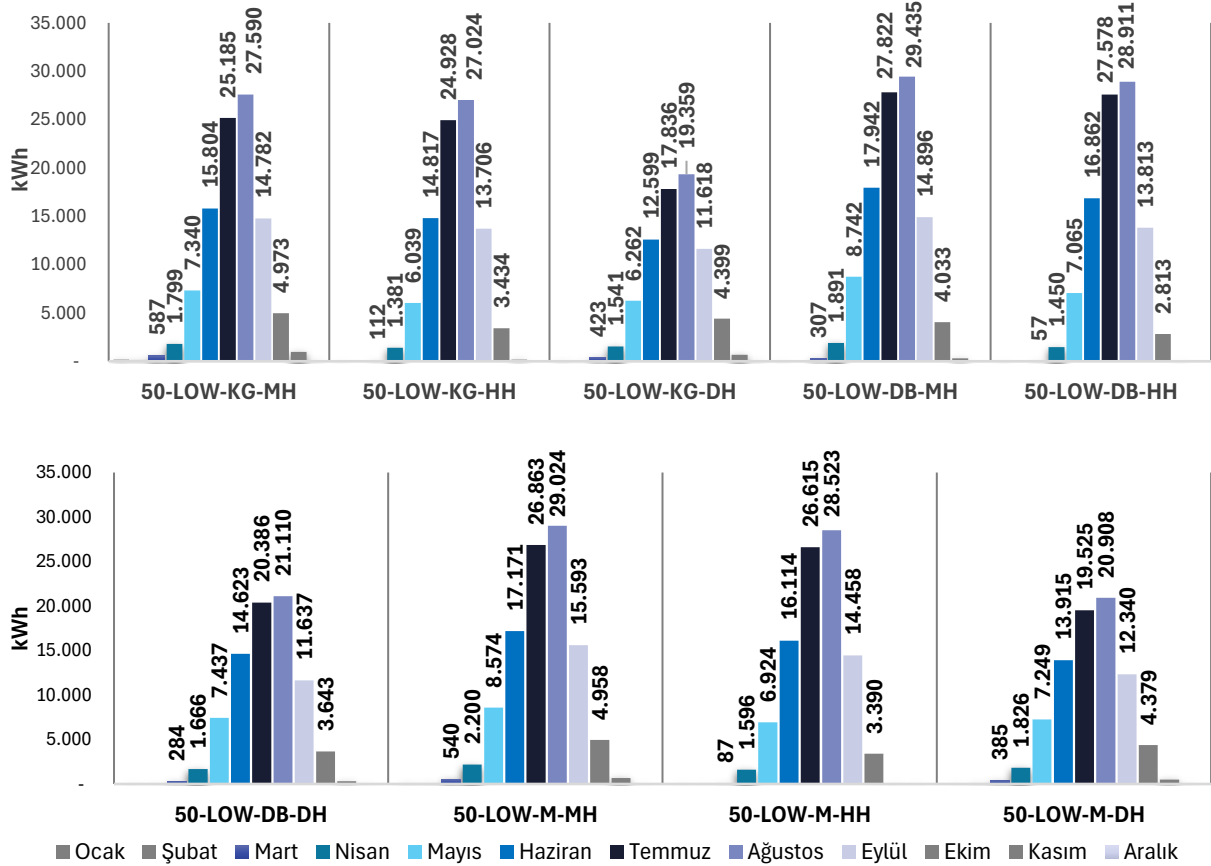
Şekil 4.4: 50-LOW ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri.

En düşük yıllık ısıtma yükü 70.928 kWh ile low-e cam (LOW), mevcut yönlenme (KB-GD) ve doğal havalandırma (DH) parametrelerini içeren 50-LOW-M-DH ÇKC kuruluşundan elde edilmiştir. Bu sonucu izleyen 50-LOW-KG-DH ise, yalnızca kuzey-güney yönlenme (KG) açısından farklılık göstererek benzer bir performans sergilemiştir. Dolayısıyla, 50-LOW ile mevcut yönlenme ve doğal havalandırma parametrelerinin tercih edilmesi ısıtma yüklerini azaltmada etkili olmuştur. Buna karşılık, en yüksek ısıtma yükü 114.760 kWh ile 50-LOW-DB-HH ÇKC kuruluşunda kaydedilmiştir. Bu sonuç, 50-LOW parametrelerinin, doğu-batı yönlenme ve hibrit havalandırma ile birlikte uygulanmasının ısıtma enerjisi tüketimini artırıp sistemin enerji performansını olumsuz etkilediğini göstermiştir. Şekil 4.5'te 50 cm boşluk genişliği ve low-e cam ile farklı yönlenme ve havalandırma parametrelerine sahip ÇKC kuruluşlarının aylık ısıtma yükleri (kWh) karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.



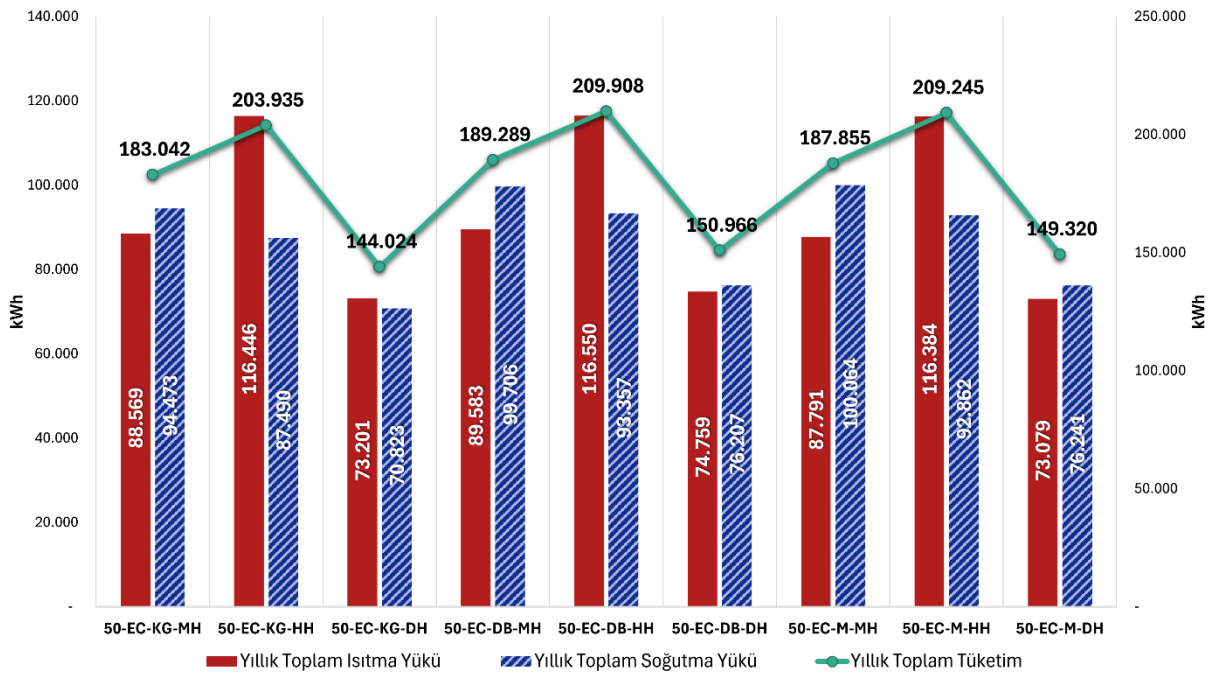
Şekil 4.5: 50-LOW sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı.

En düşük yıllık soğutma yükü, 50-LOW-KG-DH ÇKC kuruluşunda 74.954 kWh değerinde hesaplanmış; en yakın ikinci değer ise 50-LOW-M-DH ile 81.253 kWh olarak belirlenmiştir. 50-LOW-KG-DH, en yüksek soğutma gereksinimi duyulan ağustos ayında, diğer ÇKC kuruluşlarına kıyasla düşük (19.359 kWh) enerji tüketimi gerçekleştirmiştir. İki kuruluş karşılaştırıldığında, soğutma yükünde tasarruf sağlamak amacıyla kuzey-güney yöneliminin daha elverişli seçenek olduğunu görülmektedir. Öte yandan, en yüksek yıllık soğutma yükü, 50-LOW-M-MH ÇKC kuruluşunda 105.815 kWh olarak saptanmış olup bu durumda mevcut yönlenme ile mekanik havalandırma parametrelerinin birlikte kullanımı etkili olmuştur. Elde edilen bulgular, soğutma yüklerinin belirlenmesinde yönlenme ve havalandırma türü seçimlerinin kritik önem taşıdığını göstermektedir. Şekil 4.6’da 50 cm boşluk genişliği ve low-e cam türü sabit parametreleri altında, farklı yönlenme ve havalandırma türüne sahip ÇKC kuruluşlarının soğutma yükleri aylara göre sunulmuştur. Her iki grafiğin (bknz. Şekil 4.5-Şekil 4.6) değerlendirilmesi sonucunda, doğal havalandırma parametresine sahip kuruluşların düşük enerji tüketimi gösterdiği saptanmıştır.



Şekil 4.6: 50-LOW sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşunun soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı.

Şekil 4.7’de 50 cm boşluk genişliği ve elektrokromik cam (EC) kullanılan ve değişkenleri yönlenme ve havalandırma türü olan ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam ısıtma/soğutma yükü ve toplam enerji tüketimi değerleri sunulmaktadır. En düşük yıllık toplam tüketim doğal havalandırma ve kuzey-güney yönlenmeye sahip 50-EC-KG-DH (144.024 kWh) ile elde edilmiştir. Bu değeri izleyen diğer ÇKC kuruluşu 149.320 kWh ile 50-EC-M-DH olmuştur. En yüksek toplam tüketimi ise hibrit havalandırma ve doğu-batı yönlenme parametrelerine sahip 50-EC-DB-HH ÇKC kuruluşu göstermiştir. En düşük (50-EC-KG-DH) ve en yüksek (50-EC-DB-HH) yıllık toplam tüketim değerlerinin hesaplandığı ÇKC kuruluşları arasında %31,3 oranında fark saptanmıştır. Mevcut durum ile en düşük tüketimi sağlayan ÇKC kuruluşu kıyaslandığında ise %31,2 oranında azalma hesaplanmıştır.



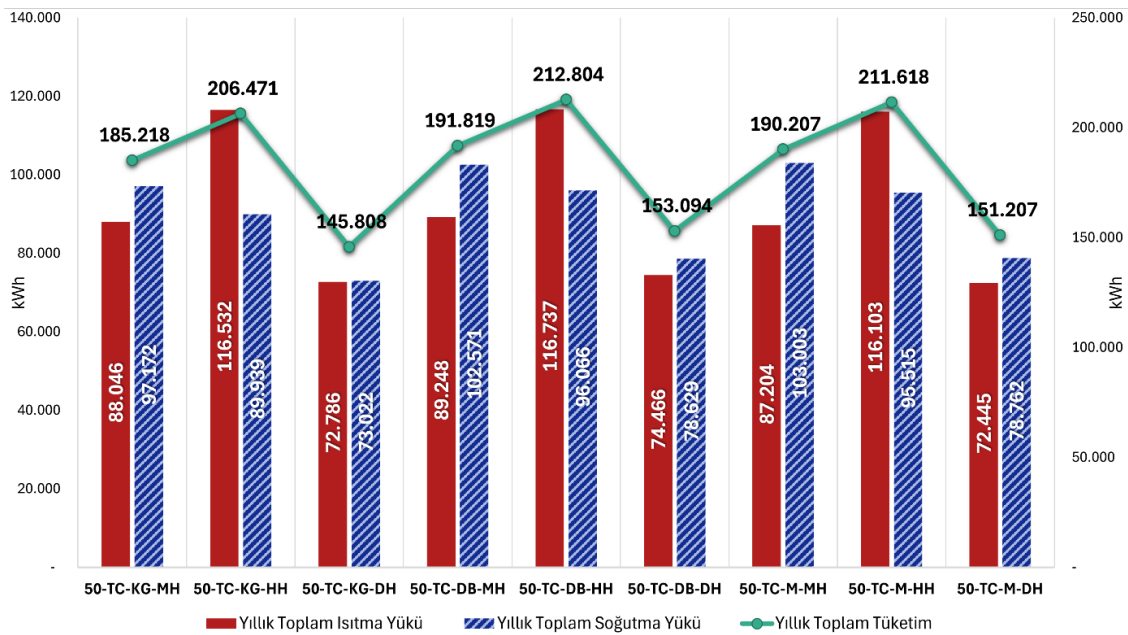
Şekil 4.7: 50-EC ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri.

50-EC sabit parametresine sahip farklı ÇKC kuruluşlarının yıllık ısıtma/soğutma yükleri ay bazında Ek A’da verilmiştir.

Yıllık ısıtma yükleri açısından, 73.079 kWh değeriyle 50-EC-M-DH kuruluşu en düşük değere sahiptir. Bu bulgu, kuzeybatı-güneydoğu (M) yönlenmesinin ısıtma yüklerini azaltmada etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Soğutma yükleri incelendiğinde en düşük değer, 70.823 kWh ile 50-EC-KG-DH kuruluşunda hesaplanmış olup kuzey-güney (KG) yönlenme ve doğal havalandırmanın (DH) birleşimi sayesinde soğutma ihtiyacının önemli ölçüde düştüğü gözlenmiştir. Bununla birlikte, doğal havalandırmanın (DH), 50-EC sabit parametreleri kapsamında enerji tüketimini düşürdüğü tespit edilmiştir. Elektrokromik camın (EC) dinamik ışık kontrol özelliği ile doğal havalandırma türüne sahip tüm yönlenmelerde, ısıtma ve soğutma yükleri arasında daha dengeli bir dağılım sağlandığı anlaşılmıştır.

50 cm boşluk genişliği ile termokromik cam sabit parametreleri altında farklı yönlenme ve havalandırma stratejilerine sahip ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketimleri Şekil 4.8’de verilmiştir. Buna göre, en düşük yıllık toplam enerji tüketimi 145.808 kWh ile 50-TC-KG-DH ÇKC kuruluşunda gerçekleşmiştir. Ayrıca, yıllık toplam ısıtma ve soğutma yükünde sırasıyla 72.786 kWh ve 73.022 kWh ile dengeli bir dağılım sergilemiştir. Bu durum, 50 cm boşluk genişliği ve termokromik camın, kuzey-güney yönlenme ve doğal havalandırma ile birlikte kullanılmasının enerji talebini azaltmada etkili olduğunu göstermektedir. En yüksek yıllık toplam tüketim ise 212.804 kWh ile doğu-batı yönlenme ve hibrit havalandırmanın bir arada uygulandığı 50-TC-DB-HH ÇKC kuruluşunda hesaplanmış; yıl boyunca ihtiyaç duyulan enerjinin bu kuruluş ile dengelenemediği saptanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, 50-TC-KG-DH ÇKC kuruluşu, mevcut duruma kıyasla %30,4 oranında azalma sağlamıştır.



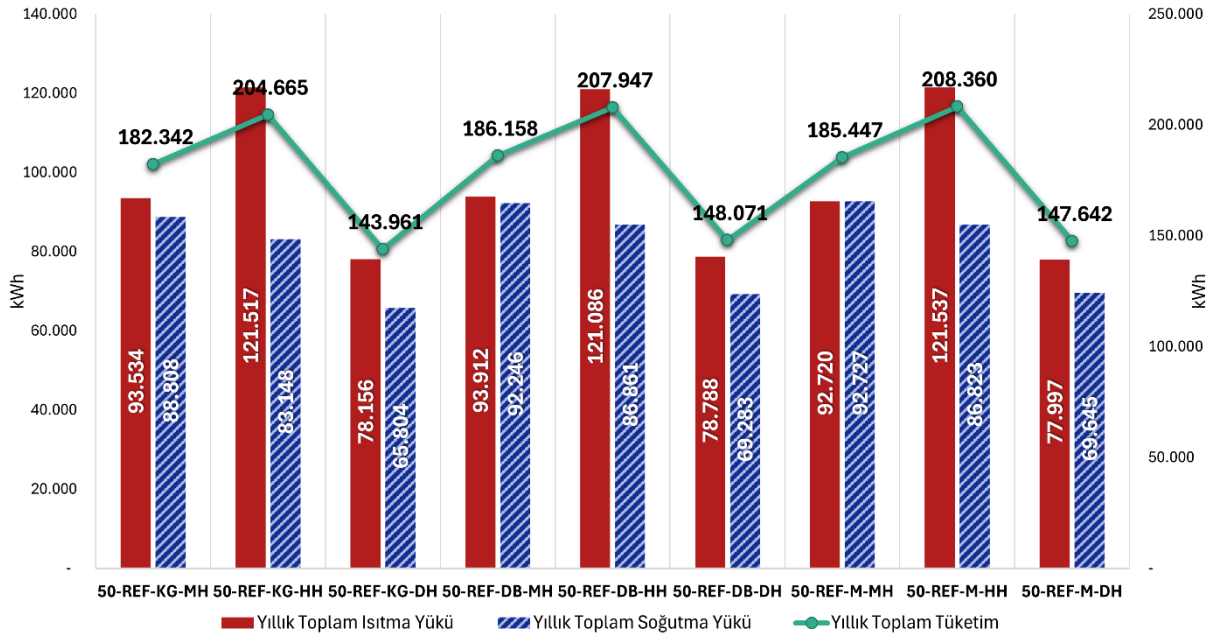
Şekil 4.8: 50-TC ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri.

50-TC sabit parametresine sahip farklı KC kuruluşlarının yıllık ısıtma/soğutma yükleri ay bazında Ek B’de verilmiştir.

En düşük yıllık ısıtma yükü, 50 cm boşluk genişliği, termokromik cam, kuzeybatı-güneydoğu (M) yönlenme ve doğal havalandırma parametrelerinden oluşan 50-TC-M-DH KC kuruluşunda 72.445 kWh olarak hesaplanmıştır. Aynı sabit parametreler kapsamında, yalnızca yönlenme farkıyla kuzey-güney doğrultusunda konumlanan 50-TC-KG-DH KC kuruluşu da benzer şekilde düşük ısıtma tüketimi (72.786 kWh) göstermiştir. En yüksek ısıtma yükü ise 116.737 kWh ile 50-TC-DB-HH KC kuruluşunda saptanmıştır. Bu sonuç, 50-TC parametrelerinin hibrit havalandırma ve doğu-batı yönlenme ile birlikte kullanılmasının ısıtma yükünü artırdığını göstermektedir.

Soğutma yükleri açısından ise, en düşük yıllık soğutma yükü, 50-TC-KG-DH KC kuruluşunda 73.022 kWh olarak elde edilmiştir; bu bulgu, soğutma enerjisi ihtiyacı bakımından kuzey-güney yönlenme ve doğal havalandırma türünün bu sonuca ulaşılmasında etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşılık, en yüksek soğutma yükü 102.571 kWh ile 50-TC-DB-MH kuruluşunda hesaplanmış olup mekanik havalandırma, soğutma yüklerini artıran bir parametre olarak dikkat çekmektedir. 50-TC-KG-DH KC kuruluşuna ait veriler incelendiğinde hem ısıtma hem de soğutma yükleri açısından dengeli bir performans sergilediği görülmektedir.

Şekil 4.9’da 50 cm boşluk genişliği ile reflektif cam sabitlerine dayalı farklı yönlenme ve havalandırma stratejilerine sahip KC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketimleri sunulmaktadır. İncelenen verilere göre, en düşük yıllık toplam enerji tüketiminin 143.961 kWh ile 50-REF-KG-DH KC kuruluşu ile sağlanmıştır. Buna karşılık, 50-REF-M-HH KC kuruluşunda elde edilen 208.360 kWh değeri, yıllık toplam enerji yükleri arasında en yüksek tüketimi temsil etmektedir. Bu kapsamda, en düşük (50-REF-KG-DH) ve en yüksek (50-REF-M-HH) yıllık toplam enerji tüketimine sahip KC kuruluşları arasında %30,9 oranında fark saptanmıştır. Mevcut durum ile karşılaştırıldığında ise en düşük değeri sağlayan 50-REF-KG-DH KC kuruluşu %31,3 oranında düşük tüketim sağlamıştır.



Şekil 4.9: 50-REF ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri.

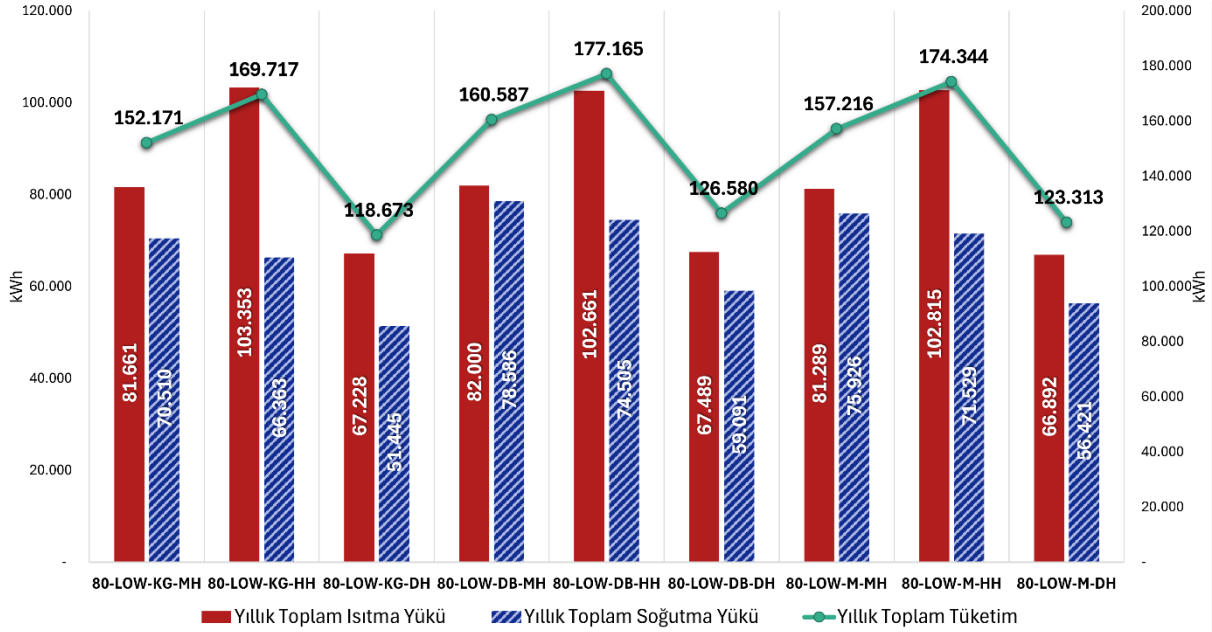
50-REF sabit parametresine sahip farklı ÇKC kuruluşlarının yıllık ısıtma/soğutma yükleri ay bazında Ek C’de verilmiştir.

Isıtma yüklerine ilişkin analizlerde, en düşük değer 50-REF-M-DH ÇKC kuruluşu ile 77.997 kWh olarak kaydedilmiştir. Bu durum, 50-REF parametresinin kuzeybatı-güneydoğu (M) yönlenmesi ve doğal havalandırma ile birlikte kullanılmasının ısıtma talebini azaltmada etkili olduğunu göstermektedir. En yüksek ısıtma tüketimi ise 50-REF-M-HH ÇKC kuruluşunda hesaplanmış olup hibrit havalandırma, kuzeybatı-güneydoğu yönlenmesi ve reflekte çift cam parametrelerinin bir araya gelmesi, yıllık ısıtma enerjisi tüketimini 121.537 kWh'ye yükselterek ısıtma yüklerinde artışa neden olmuştur.

Yıllık soğutma yükleri açısından, en düşük değer 65.804 kWh ile 30-REF-KG-DH ÇKC kuruluşundan elde edilmiştir. En yüksek soğutma yükü ise 92.722 kWh ile 50-REF-M-MH ÇKC kuruluşunda hesaplanmış olup mekanik havalandırma ile birleşen kuzeybatı-güneydoğu yönlenmesinin ısı yükleri artırdığı belirlenmiştir. Genel itibarıyla, reflektif cam, tüm ÇKC kuruluşlarında, düşük UV geçirgenliği sayesinde güneş ısı kazancını sınırlandırarak soğutma enerjisi tüketimini belirgin biçimde engellemiştir.

4.2.2 80 cm Boşluk Genişliğine Sahip Çift Kabuk Cephe Kuruluşlarının Analizi

80 cm boşluk genişliği ve low-e cam kullanılarak yapılandırılan çift kabuk cephe kuruluşlarının yıllık ısıtma/soğutma ve toplam tüketim değerleri, farklı havalandırma türleri ve yönlenmeler bağlamında Şekil 4.10'da karşılaştırılmıştır.



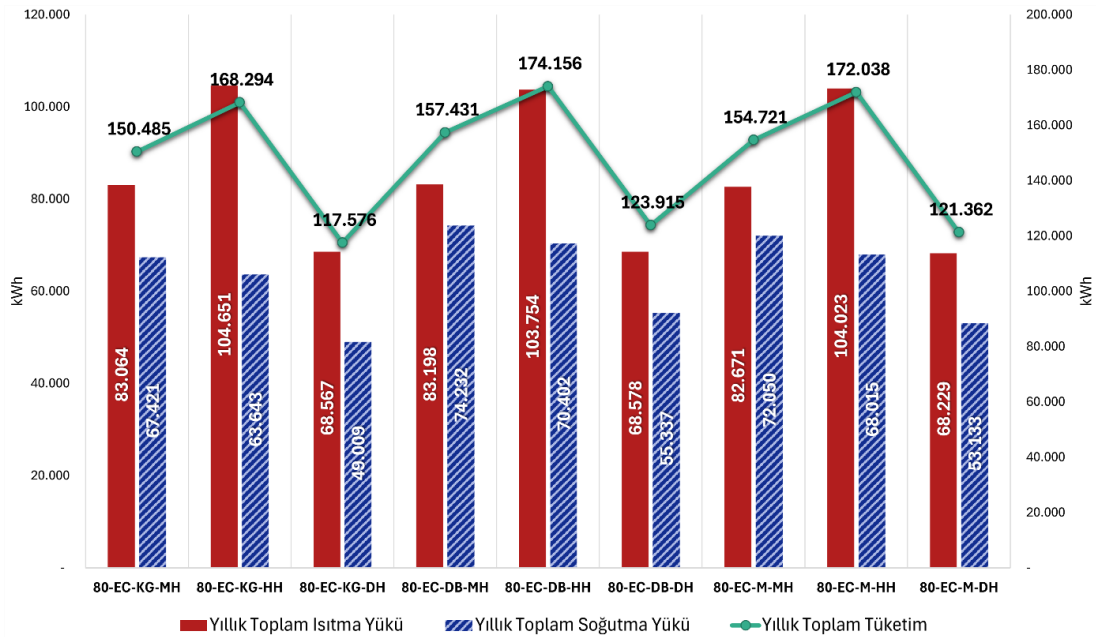
Şekil 4.10: 80-LOW ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri.

80-LOW sabit parametresine sahip farklı ÇKC kuruluşlarının yıllık ısıtma/soğutma yükleri ay bazında Ek D'de verilmiştir.

En düşük yıllık toplam tüketimin 80-LOW-KG-DH ÇKC kuruluşunda 118.673 kWh düzeyinde gerçekleştiği görülmektedir. 80-LOW ile kuzey-güney yönlenme ve doğal havalandırma parametrelerinin birlikte kullanılması, yıllık toplam enerji talebinde azalma sağlamıştır. 80-LOW-DB-HH ÇKC kuruluşu, doğu-batı yönlenmenin kışın sağladığı ısı kazancına rağmen, 80 cm boşluk ve hibrit havalandırma uygulamasının ısı kayıplarını artırması sonucu, yıllık 177.165 kWh ile en yüksek enerji tüketimine sahiptir. 80-LOW-KG-DH ÇKC kuruluşunun yıllık toplam tüketimi, mevcut duruma göre %43,3 ve en yüksek tüketimi gösteren 80-LOW-DB-HH'ye göre %33 oranında düşüktür. Dolayısıyla low-e camın düşük geçirgenlik özelliği ve 80 cm boşluk genişliğinin ısıl tampon etkisi, kuzey-güney yönlenme ve doğal havalandırma parametreleri ile birleştiğinde, yıl boyunca düşük ve dengeli tüketim gerçekleşmiştir. Mekanik ve hibrit havalandırma türlerinde yıllık toplam ısıtma/soğutma yüklerinin, doğal havalandırmaya kıyasla daha yüksek ve birbirine yakın değerlere ulaşması bu sonucu desteklemektedir.

80-LOW ÇKC kuruluşlarının soğutma yükleri değerlendirildiğinde, en düşük yıllık soğutma talebi 51.445 kWh ile 80-LOW-KG-DH ÇKC kuruluşunda hesaplanmıştır. En yüksek soğutma yükü ise 80-LOW-DB-MH tasarımında 78.586 kWh olarak bulunmuştur. Bu durum, doğu-batı yönelme nedeniyle yaz aylarında uzun süre güneş ışınımına maruz kalınması ve mekanik sistemlerden kaynaklanan ek ısı yükü ile açıklanabilir.

Sabit parametreleri 80 cm boşluk genişliği ve elektrokromik cam olarak belirlenen ÇKC kuruluşlarına dair yıllık ısıtma/soğutma ve toplam tüketim değerleri Şekil 4.11'de verilmiştir. En düşük yıllık toplam tüketim değeri, 117.576 kWh ile 80-EC-KG-DH ÇKC kuruluşundan elde edilmiş olup bu değer elde edilmesinde; elektrokromik camın dinamik güneş kontrolü, ek enerji gerektirmeden iç ortam konforu sağlayan doğal havalandırma, 80 cm boşluk genişliğinin hava akışını destekleyerek ısı geçirimini azaltması ve kuzey-güney yönelmenin güneş ışınımına maruz kalma sürelerinin birbirini dengelemesi etkili olmuştur. En yüksek (80-EC-DB-HH) ve en düşük (80-EC-KG-DH) yıllık toplam tüketim değerleri arasında %32,4 oranında fark saptanmıştır. Mevcut durum ile kıyaslandığında, 80-EC-KG-DH ÇKC kuruluşu %43,9 oranında daha etkindir.

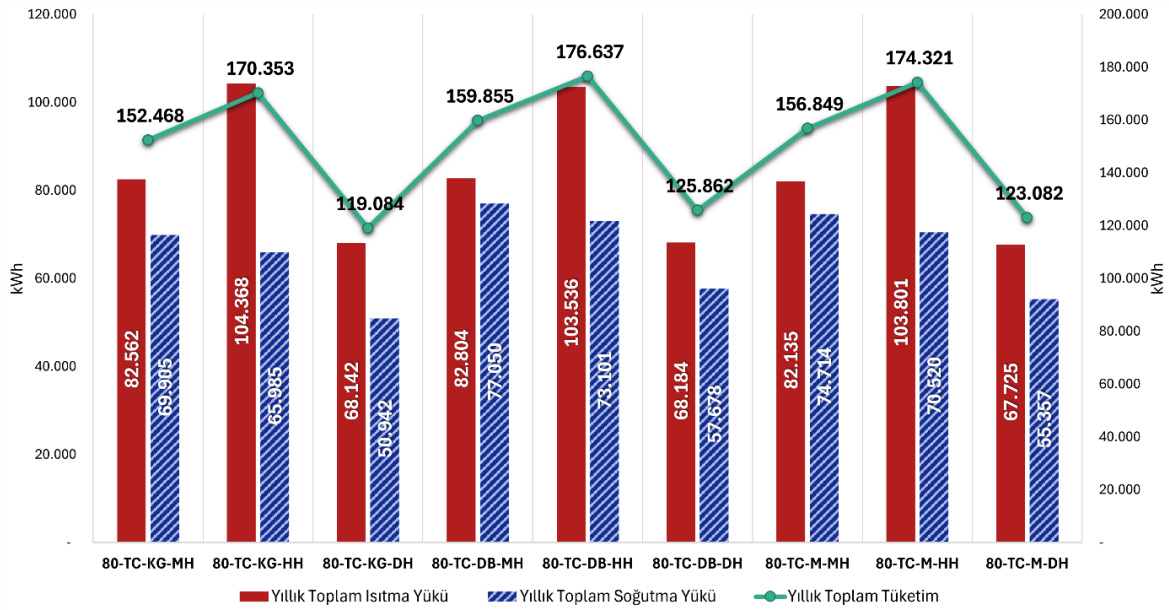


Şekil 4.11: 80-EC ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri.

80-EC sabit parametresine sahip farklı ÇKC kuruluşlarının yıllık ısıtma/soğutma yükleri ay bazında Ek E'de verilmiştir.

En düşük yıllık ısıtma yükü 68.229 kWh ile 80-EC-M-DH ÇKC kuruluşunda hesaplanmıştır. En yüksek değer ise 80-EC-KG-HH’de 104.651 kWh olarak belirlenmiştir. 80-EC-M-DH ÇKC kuruluşu, 49.009 kWh değeri ile en düşük yıllık soğutma enerjisi tüketimine sahiptir. En yüksek yıllık soğutma yükü ise, 80-EC-DB-MH kuruluşunda 96.465 kWh olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, 80 cm boşluk genişliği ve elektrokromik cam parametrelerinin doğal havalandırma ile birlikte enerji tüketimde azalma sağladığını ortaya koymaktadır

80 cm boşluk genişliği ve termokromik cam parametrelerine sahip ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri Şekil 4.12’de karşılaştırılmıştır. Grafikten de görüldüğü üzere, en düşük yıllık toplam enerji tüketimi değeri 119.084 kWh ile 80-TC-KG-DH ÇKC kuruluşunda tespit edilmiştir. 80-TC sabit parametrelerinin, kuzey-güney yönlenme ve doğal havalandırma ile birlikte kullanımı sonucunda bu değer elde edilmiştir. En yüksek enerji talebi ise 80-EC-DB-HH kuruluşunda (176.637 kWh) hesaplanmış ve doğu-batı yönlenme ile hibrit havalandırma türünün diğer tasarımlara kıyasla sisteme ek enerji yükü getirdiği tespit edilmiştir. Bu bağlamda en etkin sonucu veren 80-TC-KG-DH ÇKC kuruluşu, mevcut duruma kıyasla %43,17 oranında azalma sağlamıştır.

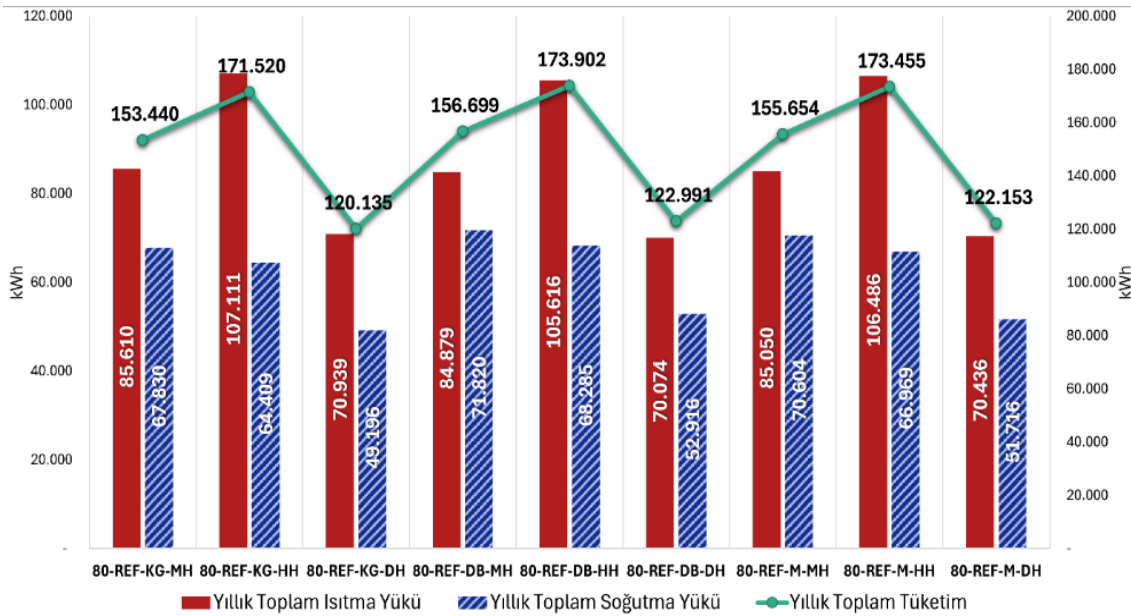


Şekil 4.12: 80-TC ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri.

80-TC sabit parametresine sahip farklı ÇKC kuruluşlarının yıllık ısıtma/soğutma yükleri ay bazında Ek F’de verilmiştir.

En düşük yıllık ısıtma yükü, 80-TC-KG-DH ÇKC kuruluşunda 68.142 kWh değerinde hesaplanmıştır. Yıllık ısıtma yükünün en yüksek düzeye ulaştığı 80-TC-M-HH tasarımında ise bu değer 103.801 kWh olarak hesaplanmıştır. Soğutma yükü açısından en düşük yıllık enerji talebi, 80-TC-KG-DH ÇKC kuruluşunda 50.942 kWh değerindedir; en yüksek değer ise 80-TC-DB-HH tasarımında 77.101 kWh olarak tespit edilmiştir. Bu veriler, 80-TC sabit parametrelerinin, doğal havalandırma türü ile ısıtma/soğutma enerji tüketimini anlamlı ölçüde düşürdüğünü göstermektedir.

80 cm boşluk genişliği ve reflektif cam türü kullanılan çift kabuk cephe kuruluşlarına ait yıllık toplam ısıtma/soğutma ve toplam enerji tüketim değerleri Şekil 4.13'te sunulmaktadır. En düşük yıllık toplam tüketim değeri, doğal havalandırma ve kuzey-güney yönlenmeye sahip 80-REF-KG-DH ÇKC kuruluşunda hesaplanmıştır (120.135 kWh). Bu değeri izleyen ÇKC kuruluşu, kuzeybatı-güneydoğu yönlenmesine sahip 122.153 kWh ile 80-REF-M-DH'dır. En yüksek yıllık toplam tüketim değeri ise hibrit havalandırma ve doğu-batı yönlenme parametreleri ile elde edilen 80-REF-DB-HH ÇKC kuruluşunda 173.902 kWh olarak hesaplanmıştır. 80-REF-KG-DH, en yüksek tüketim değerlerine sahip 80-REF-DB-HH kuruluşuna oranla %30,9, mevcut duruma göre %42,67 azalma sağlamıştır.



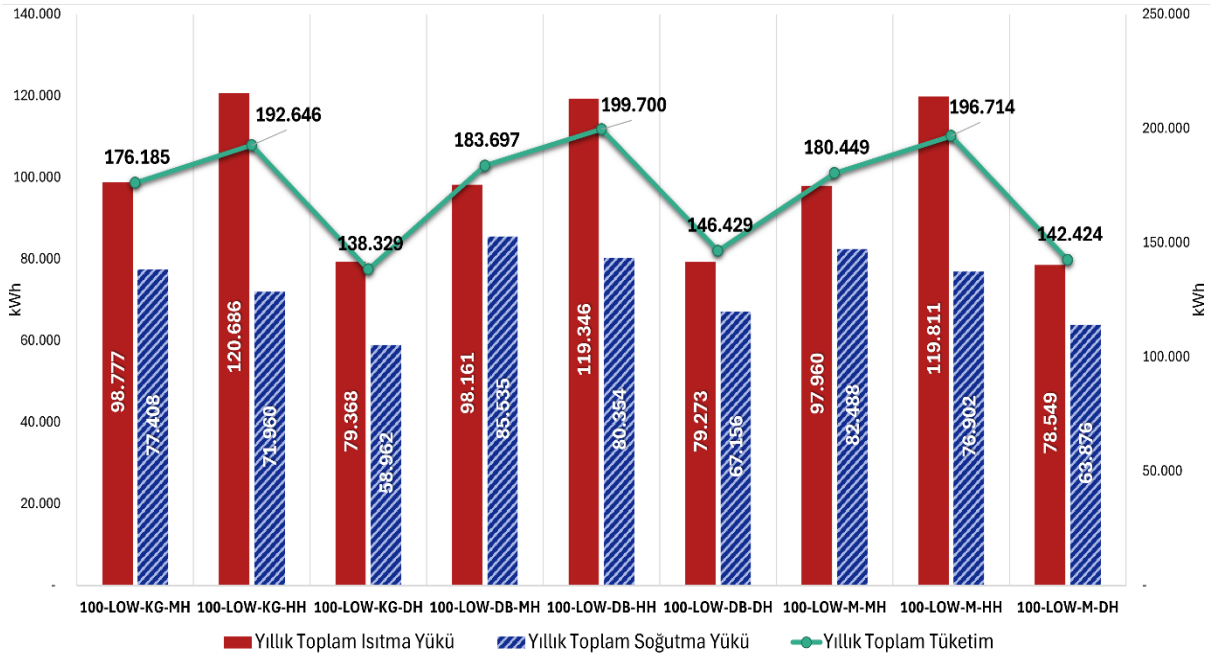
Şekil 4.13: 80-REF ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri.

80-REF sabit parametresine sahip farklı ÇKC kuruluşlarının yıllık ısıtma/soğutma yükleri ay bazında Ek G'de verilmiştir.

En düşük ısıtma yükü 80-REF-DB-DH ÇKC kuruluşunda 70.0774 kWh olarak hesaplanırken, en yüksek ısıtma yükü 80-REF-KG-HH ile 149.596 kWh'a ulaşmıştır. Bu değerler, yönlenme ve havalandırma parametrelerinin etkisini ortaya koymaktadır. 80-REF parametreleri, ısıtma yükü açısından doğu-batı yönlenme ile en düşük değerleri sağlarken, kuzey-güney yönelimi ile düşük güneş ısısı kazancı nedeniyle yüksek enerji tüketimine yol açmıştır. En düşük soğutma yükü, 80-REF-KG-DH ÇKC kuruluşunda 49.196 kWh olarak belirlenmiş; en yüksek soğutma yükü ise 80-REF-DB-MH ile 71.820 kWh olarak saptanmıştır. Soğutma yüklerinde en düşük değerler kuzey-güney yönlenme ve doğal havalandırma parametrelerinin bir arada uygulanmasıyla sağlanmıştır. Genel itibarıyla, 80 cm boşluk genişliği ile reflektif cam, ısıtma yüklerini artırırken, soğutma yüklerinde daha etkin sonuçlar sunmuştur.

4.2.4 100 cm Boşluk Genişliğine Sahip Çift Kabuk Cephe Kuruluşlarının Analizi

Bu bölümde, 100 cm boşluk genişliğine sahip çift kabuk cephe kuruluşlarının, farklı cam türleri, havalandırma ve yönlenme parametreleri binanın ısıl davranışı üzerindeki etkileri bağlamında irdelenmiştir. Şekil 4.14, söz konusu inceleme için oluşturulmuş 100-LOW sabit parametrelili tasarımların yıllık ısıtma/soğutma yüklerini sunmaktadır.



Şekil 4.14: 100-LOW ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri.

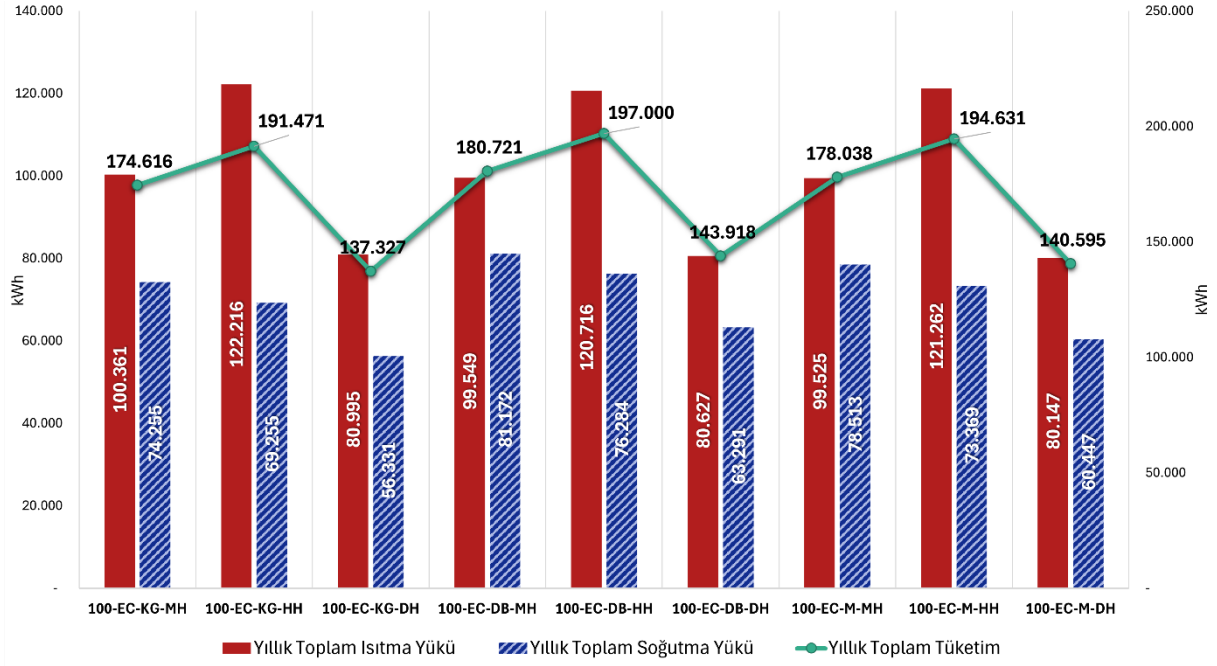
100-LOW sabit parametresine sahip farklı ÇKC kuruluşlarının yıllık ısıtma/soğutma yükleri ay bazında Ek H’de verilmiştir.

En düşük yıllık toplam tüketim değeri, doğal havalandırma ve kuzey-güney yönlenmeye sahip 100-LOW-KG-DH ÇKC kuruluşunda 138.329 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu değeri izleyen diğer ÇKC kuruluşu, kuzeybatı-güneydoğu yönlenmesine sahip 142.424 kWh ile 100-LOW-M-DH olmuştur. En yüksek toplam tüketim ise hibrit havalandırma ve doğu-batı yönlenme parametrelerinden oluşan 100-LOW-DB-HH ÇKC kuruluşunda 199.700 kWh olarak saptanmıştır. En yüksek değere sahip ÇKC kuruluşu ile en düşük değer arasında %30,73 oranında fark hesaplanmıştır. En düşük yıllık tüketim değerine sahip 100-LOW-KG-DH ÇKC kuruluşu, mevcut duruma kıyasla %33,39 oranında azalma sağlamıştır.

En düşük yıllık ısıtma yükü 100-LOW-M-DH ÇKC kuruluşunda 78.549 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, kuzeybatı-güneydoğu yönlenmesinin sabah ve öğleden sonra dengeli güneş ışınımı sağlayarak ısıtma yüklerini azaltmaya katkı sağladığını göstermektedir. En yüksek yıllık ısıtma yükü ise 100-LOW-KG-HH ÇKC kuruluşunda 120.686 kWh olarak belirlenmiştir. Soğutma yükleri incelendiğinde, en düşük değer 100-LOW-KG-DH ÇKC kuruluşunda 58.962 kWh olarak öne çıkarken, en yüksek yıllık soğutma yükü 100-LOW-DB-MH ÇKC kuruluşunda 85.835 kWh’a ulaşmıştır.

Şekil 4.15’te 100-EC sabit parametresine sahip dokuz farklı ÇKC kuruluşunun yıllık toplam enerji tüketim değerleri görülmektedir. En düşük yıllık toplam enerji tüketimi 137.327 kWh değeri ile 100-EC-KG-DH tasarımında, en yüksek tüketime ilişkin değer 197.000 kWh ile 100-EC-DB-HH ÇKC kuruluşunda tespit edilmiştir. Bu bağlamda 100-EC-KG-DH, en yüksek yıllık enerji tüketimine sahip kuruluşa göre yılda %30,2, mevcut duruma göre ise %34,46 düzeyinde azalma sağlamıştır.

100-EC sabit parametresine sahip farklı ÇKC kuruluşlarının yıllık ısıtma/soğutma yükleri ay bazında Ek J’de verilmiştir.

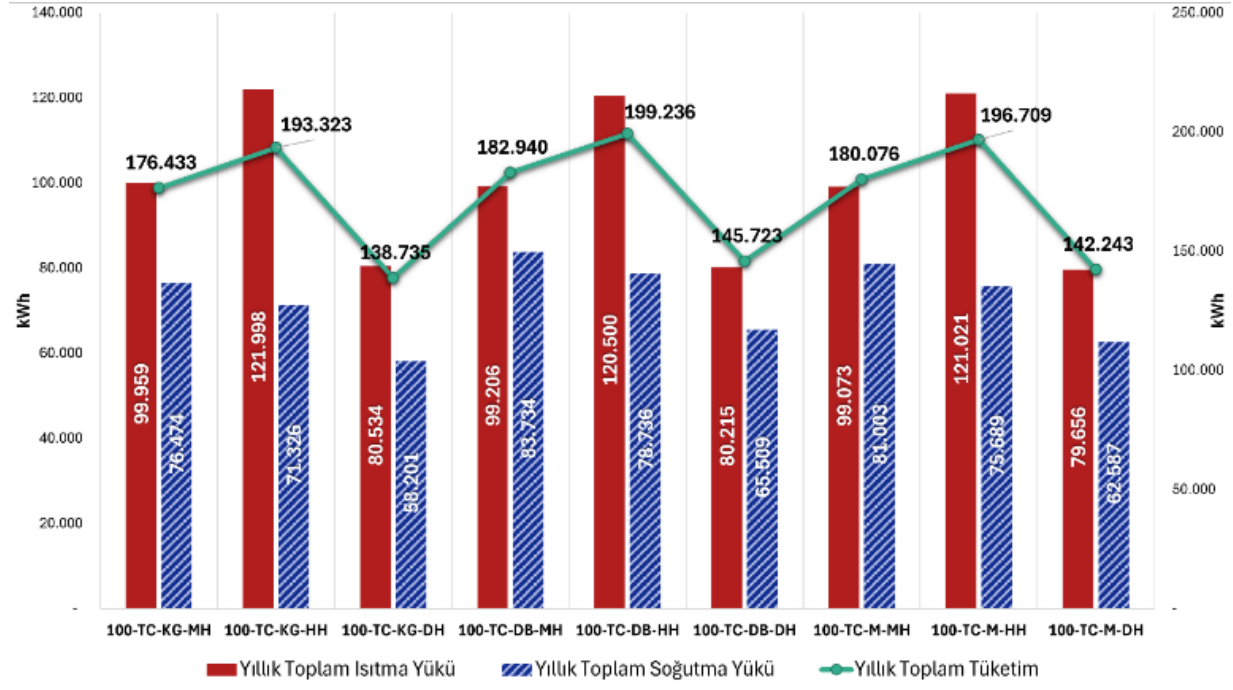


Şekil 4.15: 100-EC ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri.

En düşük yıllık ısıtma yükü, 100-EC-M-DH ÇKC kuruluşunda 80.147 kWh olarak hesaplanmış olup elektrokromik camların adaptif özellikleri sayesinde iç mekânda etkili bir ısı yönetimi sağlandığı görülmektedir. Buna karşın, en yüksek yıllık ısıtma yükü 100-EC-KG-HH ÇKC kuruluşunda 122.216 kWh düzeyindedir. Soğutma yükleri açısından değerlendirildiğinde, en düşük yıllık soğutma yükü 100-EC-KG-DH ÇKC kuruluşunda 56.331 kWh olarak elde edilmiştir; bu değeri takip eden ikinci en düşük soğutma talebi, 100-EC-M-DH ÇKC kuruluşunda gözlenmiştir. Bu kapsamda, elektrokromik camın şeffaflığını çevre koşullarına göre ayarlaması, kuzey-güney yönelmenin düşük güneş ışığı ve ısısı kazancı etkisiyle birleşerek soğutma gereksinimini belirgin şekilde azaltmıştır. En yüksek yıllık soğutma yükü ise 100-EC-DB-MH ÇKC kuruluşunda 81.172 kWh olarak hesaplanmıştır.

Modellemeler sonucunda elde edilen, 100-TC sabit parametrelili ÇKC kuruluşlarının yıllık ısıtma/soğutma ve toplam tüketim değerleri Şekil 4.16'da sunulmuştur. En düşük yıllık toplam tüketim değeri (138.735 kWh) incelendiğinde, doğal havalandırma ve kuzey-güney yönelmeye sahip 100-TC-KG-DH ÇKC kuruluşunda hesaplanmış olup bu değeri izleyen diğer tasarım ise kuzeybatı-güneydoğu yönelmesine sahip 142.243 kWh ile 100-TC-M-DH olmuştur. En yüksek toplam tüketim ise hibrit havalandırma ve doğu-batı yönelme parametrelerine sahip 100-TC-DB-HH ÇKC kuruluşunda 199.236 kWh olarak tespit edilmiştir. Sonuç itibarıyla, en yüksek (100-TC-DB-HH) ve en düşük (100-TC-KG-DH) yıllık enerji

tüketimi gerçekleştiren ÇKC kuruluşları arasında %30,36 oranında fark saptanmıştır. Ayrıca, 100-TC-KG-DH ÇKC kuruluşu mevcut duruma kıyasla enerji yüklerinde %33,79 oranında azalma sağlamıştır.



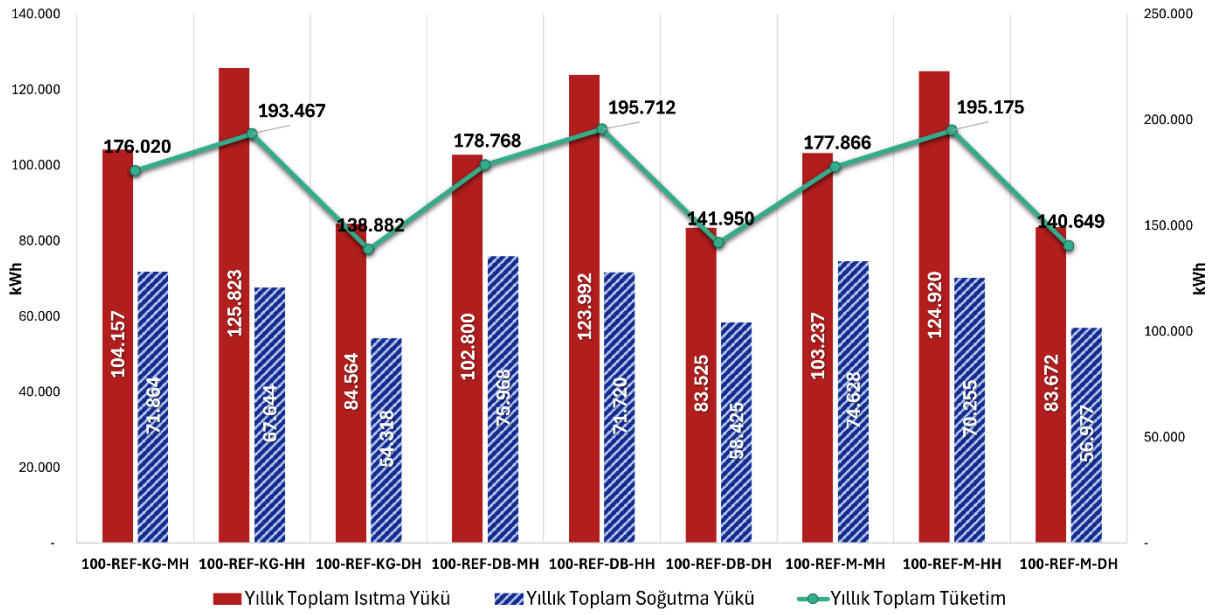
Şekil 4.16: 100-TC ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri.

100-TC sabit parametresine sahip farklı ÇKC kuruluşlarının yıllık ısıtma/soğutma yükleri ay bazında Ek K’da verilmiştir.

En düşük yıllık ısıtma yükü, 79.656 kWh ile 100-TC-M-DH ÇKC kuruluşunda saptanmıştır. Buna karşılık, en yüksek yıllık ısıtma yükü 121.998 kWh ile 100-TC-KG-HH kuruluşunda hesaplanmıştır. Soğutma yükleri incelendiğinde, en düşük değer 58.201 kWh ile 100-TC-KG-DH kuruluşunda görülürken, en yüksek yıllık soğutma yükü 100-TC-DB-MH (83.734 kWh) ile kaydedilmiştir.

Şekil 4.17’de 100-REF sabit parametreleri kapsamında oluşturulan ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketimleri karşılaştırılmıştır. Buna göre, en düşük enerji tüketimi 138.882 kWh ile 100-REF-KG-DH kuruluşunda gerçekleşmiştir. Buna karşılık, 100-REF-DB-HH ÇKC kuruluşunda elde edilen 195.712 kWh değeri, yıllık toplam enerji yükleri arasında en yüksek değere ulaşmıştır. Sonuç olarak, 100-REF-KG-DH ÇKC kuruluşu, en yüksek tüketimi gerçekleştiren değere oranla yıllık toplam ısıtma yükleri bakımından %29,03 oranında enerji

tasarrufu sağladığı belirlenmiştir. Mevcut duruma göre ise %50,88 oranında daha düşük enerji tüketmiştir.



Şekil 4.17: 100-REF ÇKC kuruluşlarının yıllık toplam enerji tüketim değerleri.

100-REF sabit parametresine sahip farklı ÇKC kuruluşlarının yıllık ısıtma/soğutma yükleri ay bazında Ek L’de verilmiştir.

Modelleme sonuçlarına göre, en düşük yıllık ısıtma yükü 100-REF-DB-DH ÇKC kuruluşunda 83.525 kWh olarak hesaplanmıştır. Buna karşın, en yüksek yıllık ısıtma yükü 100-REF-KG-HH ÇKC kuruluşunda 125.823 kWh olarak belirlenmiş olup kuzey-güney yönlenmenin daha sınırlı güneş ısısı kazancı sağlaması nedeniyle ısıtma enerjisi gereksiniminin artış gösterdiği saptanmıştır.

Soğutma yükleri açısından değerlendirildiğinde en düşük yıllık enerji tüketimi 100-REF-KG-DH ÇKC kuruluşunda 54.318 kWh olarak saptanmıştır. Bu durum, doğal havalandırmanın etkili biçimde kullanılmasıyla iç mekânda aşırı ısınmanın önüne geçildiğini göstermektedir. En yüksek yıllık soğutma yükü ise 100-REF-DB-MH ÇKC kuruluşunda 75.968 kWh olarak hesaplanmıştır. Genel itibarıyla, reflektif camların özellikle soğutma yüklerini düşürme konusunda etkili olduğu ancak düşük güneş ışığı geçirgenliği sebebiyle ısıtma yüklerini artırıcı bir etki yarattığı anlaşılmıştır.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, enerji etkin cephe sistemlerinden biri olan ve kullanımını ofis binalarında yaygınlaşan çift kabuk cephe sistemleri, ısıtma/soğutma yükleri bağlamında ele alınmıştır. Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsü'nde yer alan bir ofis binası alan çalışması olarak seçilmiştir. Örnek bina modelinin mevcut tek kabuk cephe sistemi üzerine uygulanan çift kabuk cephe kuruluşları, enerji performansı kapsamında analiz edilmiştir. Modellemelerde dört farklı tasarım parametresi, cam türü, boşluk genişliği, yönlenme ve havalandırma türü, dikkate alınmıştır. 108 farklı ÇKC kuruluşu, DesignBuilder programı ve EnergyPlus eklentisi ile simüle edilmiştir. Elde edilen bulgular, ısıtma ve soğutma yükleri kapsamında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş; en etkin ÇKC kuruluşu, parametreleri bazında irdelenmiştir. Tablo 5.1'de yıllık toplam ısıtma yükleri, en düşükten en yükseğe doğru sıralanmış değerler arasından ilk 15 ve son 15 ÇKC kuruluşu sunulmuştur.

Tablo 5.1: Yıllık toplam ısıtma yüküne göre en düşük ve en yüksek değerleri sağlayan kuruluşlar.

| Sıralamada ilk 15 simülasyon sonucu | | Sıralamada son 15 simülasyon sonucu | |
|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Tasarım Kodu | Yıllık Toplam Isıtma Yüğü (kWh) | Tasarım Kodu | Yıllık Toplam Isıtma Yüğü (kWh) |
| 80-LOW-M-DH | 66.892 | 100-LOW-DB-HH | 119.346 |
| 80-LOW-KG-DH | 67.228 | 100-LOW-M-HH | 119.811 |
| 80-LOW-DB-DH | 67.489 | 100-TC-DB-HH | 120.500 |
| 80-TC-M-DH | 67.725 | 100-LOW-KG-HH | 120.686 |
| 80-TC-KG-DH | 68.142 | 100-EC-DB-HH | 120.716 |
| 80-TC-DB-DH | 68.184 | 100-TC-M-HH | 121.021 |
| 80-EC-M-DH | 68.229 | 50-REF-DB-HH | 121.086 |
| 80-EC-KG-DH | 68.567 | 100-EC-M-HH | 121.262 |
| 80-EC-DB-DH | 68.578 | 50-REF-KG-HH | 121.517 |
| 80-REF-DB-DH | 70.074 | 50-REF-M-HH | 121.537 |
| 80-REF-M-DH | 70.436 | 100-TC-KG-HH | 121.998 |
| 50-LOW-M-DH | 70.928 | 100-EC-KG-HH | 122.216 |
| 80-REF-KG-DH | 70.939 | 100-REF-DB-HH | 123.992 |
| 50-LOW-KG-DH | 71.192 | 100-REF-M-HH | 124.920 |
| 50-TC-M-DH | 72.445 | 100-REF-KG-HH | 125.823 |

Tabloda yer alan cephe tasarımları incelendiğinde, yıllık toplam ısıtma yükü 66.892 kWh ile 80-LOW-M-DH ÇKC kuruluşunda en düşük değer saptanmıştır. Bu kuruluş, 80 cm boşluk + low-e cam + kuzeybatı-güneydoğu (mevcut) yönlenme + doğal havalandırma parametrelerinden oluşmaktadır.

Parametre bazında değerlendirildiğinde; tampon bölge genişliği, doğal taşınım ve hava hareketi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bu kapsamda, 80 cm boşluk, havanın dengeli akışını sağlayarak ısı kaybını azaltmakta; 50 cm'e kıyasla daha geniş bir yalıtım katmanı oluşturmakta ve 100 cm'den küçük olması nedeniyle büyük hacimden kaynaklanan soğuk hava birikimi riskini engellemektedir. Ayrıca, kutu tipi çift kabuk cephe parametresi, dikeyde ve yatayda ısı transferini sınırladığı için tek bir ofis mahalinin boyutlarına göre değerlendirildiğinde, iç mekânda daha homojen bir ısı dağılımının sağlanmasına olanak tanımaktadır. Bir diğer etkili parametre olan low-e cam, düşük emisivite kaplaması sayesinde kızılötesi ışınımı yansıtarak ısı tutulumunu artırmakta ve dolayısıyla iç mekânda ısı kaybını önlemektedir (Taher, Abdelkader and Fahim, 2022). Doğal havalandırma yöntemi ise, mekanik sistemlerin neden olduğu ek enerji tüketiminden bağımsız bir çalışma prensibi sunarak, enerji tüketiminde azalma sağlamaktadır. Son olarak, binanın mevcut yönlenmesi (kuzeybatı-güneydoğu) incelendiğinde, güneydoğu cephesi sabah saatlerinde yoğun güneş ışınımına maruz kalırken, kuzeybatı cephesinde ise akşam saatlerinde benzer etki görülür. Dolayısıyla, cephelerin güneşlenme süreleri dengelidir ve ÇKC kuruluşunda enerji verimliliği sağlamaktadır.

Isıtma yükleri açısından en düşük ilk on beş değer incelendiğinde, 80 cm boşluk genişliği ve doğal havalandırma parametrelerinin diğer değişkenlere kıyasla daha etkili olduğu saptanmıştır. 80 cm ara boşluğun, 50 ve 100 cm'e kıyasla incelenen bina ve iklim koşulları için en uygun genişlik olduğu ve yeterli ısı yalıtımı sağlayarak ısı kaybını dengelediği görülmektedir. En düşük ısıtma enerjisi tüketimine sahip ÇKC kuruluşlarında, 80 cm boşluk genişliği ve doğal havalandırma parametrelerinin sabit olması diğer parametrelerin bu temel üzerine inşa edildiğini ispat etmektedir. Reflekte cam hariç tüm cam türleri ile yönlenmeler, ısıtma yüklerini azaltıcı bir etkiye sahip olduğundan, bu parametreler performans farklılıklarını belirleyen ikincil bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Değerler temel alınarak bir sıralama yapıldığında, ısıtma yüklerini azaltma açısından en etkili cam türü low-e olup bunu sırasıyla

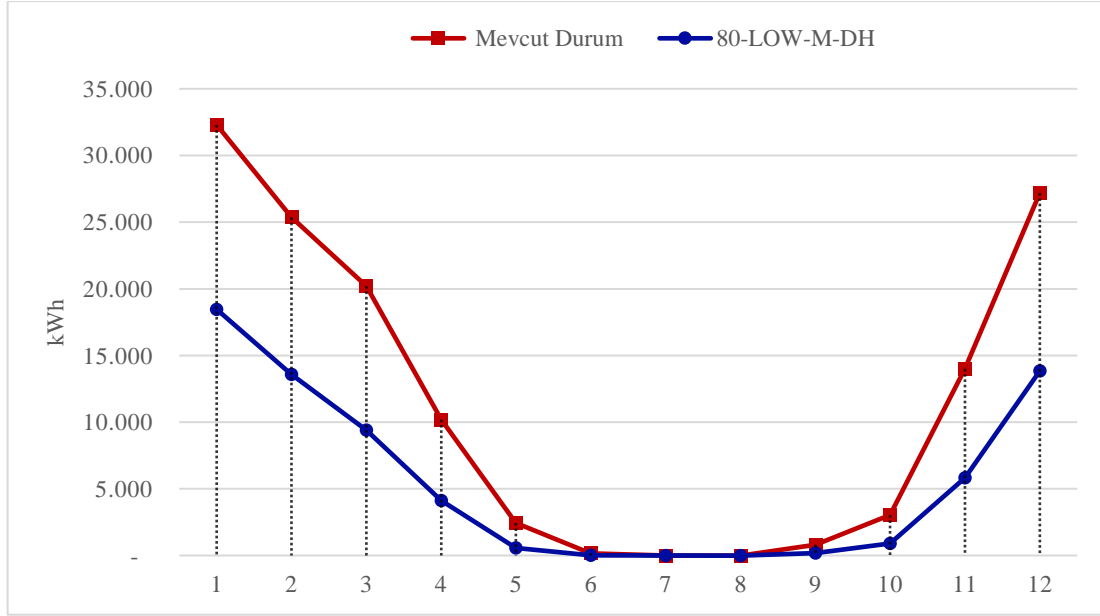
termokromik (TC), elektrokromik (EC) ve reflekte (REF) camlar takip etmektedir. Karşılaştırmalar sonucu, ısıtma yükü için 80 cm'den sonra en verimli boşluk genişliği 50 cm'dir

Genel itibarıyla, örnek binanın mevcut yönelmesi değiştirilmeden 80 cm boşluk genişliğine sahip, doğal havalandırılmalı ve low-e cam türüne sahip kutu tipi çift kabuk cephe, ısıtma yükü tasarrufu için en uygun cephe tasarımıdır.

En yüksek yıllık ısıtma yükleri incelendiğinde, 125.823 kWh değeri ile 100-REF-KG-HH ÇKC kuruluşu son sırada yer almaktadır. Bu değer, 100 cm boşluk genişliğinin beklenen ısıl tamponlama etkisini sağlayamaması ve reflekte camın ısı kazançlarını sınırlandırmasının sonucudur. Yansıtıcı cam ile geniş tampon bölgenin birleşimi; kış aylarında pasif ısı kazanımını engellemekte, hava sirkülasyonunu artırarak ısı geçirim direncini düşürmekte ve bu nedenle ısı kayıplarının artmasına yol açmaktadır. Ayrıca, hibrit havalandırma stratejisinin, doğal havalandırmaya kıyasla daha fazla enerji talebine yol açtığı anlaşılmaktadır. Genel itibarıyla, yüksek oranda ısıtma tüketimi gereksinimi duyulan ÇKC kuruluşlarının ortak parametresi, hibrit havalandırma parametresidir.

Sonuç olarak, ısıtma talebini etkileyen birincil parametreler boşluk genişliği ile havalandırma türü olarak saptanmıştır.

Şekil 5.1'de, yıllık ısıtma enerjisi tüketimi açısından en düşük değere sahip 80-LOW-M-DH ÇKC kuruluşunun aylara göre ısıtma yükü dağılımı sunulmuş ve mevcut durum ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, 80-LOW-M-DH ÇKC kuruluşu ısıtma talebini %50,7 oranında azaltmış olup metrekare başına yıllık ısıtma yükü 22,48 kWh/m² olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.1: 80-LOW-M-DH ÇKC kuruluşu ile mevcut durumun yıllık ısıtma yükü değerleri karşılaştırması.

Soğutma yükü bakımından en düşüğe en yükseğe doğru sıralanmış değerler arasında ilk 15 ve son 15 ÇKC kuruluşu Tablo 5.2’de sunulmuştur. Tablonun sol tarafında listelenen ilk 15’de yıllık soğutma ihtiyacı diğer ÇKC kuruluşlarına kıyasla düşük düzeydedir. Dolayısıyla, bu tasarımlar yaz döneminde binanın iç mekânını daha serin tutarak soğutma talebini azaltan bir yapı sergilemiştir.

En düşük yıllık toplam soğutma tüketimi 80-EC-KG-DH ÇKC kuruluşu ile 49.009 kWh olarak hesaplanmıştır. Kutu tipi çift kabuk cephenin uygulandığı tüm kuruluşlarda olduğu gibi, bu kuruluşta da havalandırma modüller arası gerçekleştiğinden hava akışı belirli kanallar boyunca yönlendirilerek kontrollü bir şekilde gerçekleşmektedir.

80-EC-KG-DH ÇKC kuruluşu parametreleri bazında değerlendirildiğinde; 80 cm boşluk genişliği, sera etkisini azaltacak kadar geniş ancak kontrolsüz havalandırmaya neden olacak kadar büyük olmayan dengeli bir tampon bölge oluşturmuştur. Ayrıca, bu boşluk genişliği, yaz döneminde havanın doğal konveksiyon ile yükselerek baca etkisi oluşturmasına izin vermektedir. Dolayısıyla, iç ortam sıcaklık dalgalanmalarını önlemektedir. Diğer bir etkili parametre cam türüdür. Elektrokromik cam, dinamik geçirgenlik özelliği ile mevsimsel ve anlık güneş ışınımına adapte olabilen bir malzemedir (Granqvist, 2016). Bu kapsamda EC cam türü, yaz aylarında güneş ışınımına karşı cam opaklığını değiştirmesi ile soğutma yükleri üzerinde

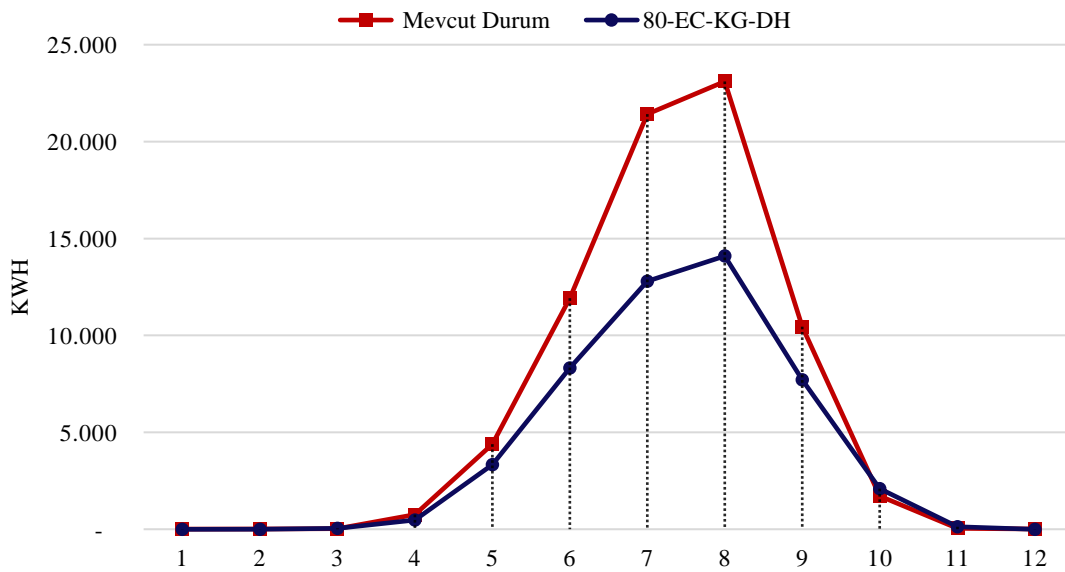
etkili olmuştur. Kuzey–güney yönlenme parametresinin etkisi ise, kuzey cephedeki ofislerin yıl boyunca en az güneş kazanımına sahip olması ve güney cephesinin daha yoğun güneş radyasyonuna maruz kalmasıyla açıklanmaktadır. İki uç durumun birbirini dengelemesi, yıllık soğutma yükünün anlamlı oranda azalmasına yol açmıştır. Son olarak doğal havalandırma türü, soğutma tüketiminde de en etkili parametre olarak öne çıkmaktadır. İkinci en düşük değeri gösteren ÇKC kuruluşunda (80-REF-KG-DH), tek fark olarak reflekte camın kullanılması ile ısı kazanımları önlenmiş ve bu parametre, diğer parametrelerle uyumlu bir şekilde çalışarak dengeli bir sonuç elde edilmesine katkıda bulunmuştur. Genel itibarıyla, elde edilen düşük soğutma yükü değerleri, parametrelerin doğru etkileşimi sağlandığında enerji etkin çift kabuk cephe düzenlemesinin gerçekleştirilebileceğini kanıtlamaktadır.

Tablo 5.2: Yıllık toplam soğutma yüküne göre en düşük ve en yüksek değerleri sağlayan kuruluşlar.

| Sıralamada ilk 15 simülasyon sonucu | | Sıralamada son 15 simülasyon sonucu | |
|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Tasarım Kodu | Yıllık Toplam Soğutma Yükü (kWh) | Tasarım Kodu | Yıllık Toplam Soğutma Yükü (kWh) |
| 80-EC-KG-DH | 49.009 | 50-EC-M-HH | 92.862 |
| 80-REF-KG-DH | 49.196 | 50-EC-DB-HH | 93.357 |
| 80-TC-KG-DH | 50.942 | 50-EC-KG-MH | 94.473 |
| 80-LOW-KG-DH | 51.445 | 50-TC-M-HH | 95.515 |
| 80-REF-M-DH | 51.716 | 50-TC-DB-HH | 96.066 |
| 80-REF-DB-DH | 52.916 | 50-TC-KG-MH | 97.172 |
| 80-EC-M-DH | 53.133 | 50-LOW-M-HH | 97.822 |
| 100-REF-KG-DH | 54.318 | 50-LOW-DB-HH | 98.606 |
| 80-EC-DB-DH | 55.337 | 50-LOW-KG-MH | 99.418 |
| 80-TC-M-DH | 55.357 | 50-EC-DB-MH | 99.706 |
| 100-EC-KG-DH | 56.331 | 50-EC-M-MH | 100.064 |
| 80-LOW-M-DH | 56.421 | 50-TC-DB-MH | 102.571 |
| 100-REF-M-DH | 56.977 | 50-TC-M-MH | 103.003 |
| 80-TC-DB-DH | 57.678 | 50-LOW-DB-MH | 105.437 |
| 100-TC-KG-DH | 58.201 | 50-LOW-M-MH | 105.815 |

Soğutma yükü bakımından en yüksek değerlere sahip ÇKC kuruluşları incelendiğinde, 50 cm boşluk genişliği öne çıkmaktadır. Bu durum, dar boşluklu sistemlerde hava sirkülasyonunun sağlanamaması ve pasif soğutma kapasitesinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle yaz aylarında, tampon bölgede ısı birikimini artırmakta ve iç ve dış ortam arasındaki sıcaklık farkı, havanın hareketini artırarak binaya daha fazla ısının girmesine yol açmaktadır. Mekanik ve hibrit havalandırma sistemleri ise dar boşluk genişliğinde (50 cm) fanların çalışması ile geri beslemeli ısı artışına yol açtığından, bu olumsuz etki daha da tetiklenmiştir. Cam türü ve yönlendirme parametrelerinin rolü ise bu kuruluşlarda ikincil faktördür. Low-e cam, kısmen iç ortamda ısı kaybını önlese de yazın dar boşlukta hapsolan ısıyı dağıtamamaktadır. Benzer şekilde, elektrokromik ve termokromik camlar da belirtilen nedenlerden dolayı beklenen performansı sergileyememiştir. Sonuç olarak, soğutma gereksinimini artıran en etkili parametre boşluk genişliğidir; havalandırma türü ise ikinci en etkili parametredir. Tablodaki verilere göre, en yüksek değer 105.815 kWh ile 50-LOW-M-MH ÇKC kuruluşundan elde edilmiştir.

Şekil 5.2’de, yıllık soğutma enerjisi tüketimi en düşük olan 80-EC-KG-DH ÇKC kuruluşunun aylık soğutma yükü dağılımı sunulmuş ve mevcut durum ile karşılaştırılmıştır. Bu analiz sonucunda, 80-EC-KG-DH ÇKC kuruluşunun soğutma talebinde %33,64 oranında tasarruf sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca metrekare başına yıllık soğutma yükü 16,47 kWh/m² olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.2: 80-EC-KG-DH ÇKC kuruluşu ile mevcut durumun yıllık soğutma yükü değerleri karşılaştırması.

Tablo 5.3, 108 farklı modelleme arasından yıllık toplam enerji tüketimi en düşük olan ilk 15 çift kabuk cephe kuruluşunu karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.

Tablo 5.3: Yıllık toplam enerji tüketim değeri en düşük ÇKC kuruluşları.

| | TASARIM KODU | YILLIK TOPLAM ISITMA YÜKÜ (kWh) | YILLIK TOPLAM SOĞUTMA YÜKÜ (kWh) | TOPLAM ENERJİ TÜKETİMİ (kWh) |
|----|---------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 1 | 80-EC-KG-DH | 68.567 | 49.009 | 117.576 |
| 2 | 80-LOW-KG-DH | 67.228 | 51.445 | 118.673 |
| 3 | 80-TC-KG-DH | 68.142 | 50.942 | 119.084 |
| 4 | 80-REF-KG-DH | 70.939 | 49.196 | 120.135 |
| 5 | 80-EC-M-DH | 68.229 | 53.133 | 121.362 |
| 6 | 80-REF-M-DH | 70.436 | 51.716 | 122.153 |
| 7 | 80-REF-DB-DH | 70.074 | 52.916 | 122.991 |
| 8 | 80-TC-M-DH | 67.725 | 55.357 | 123.082 |
| 9 | 80-LOW-M-DH | 66.892 | 56.421 | 123.313 |
| 10 | 80-EC-DB-DH | 68.578 | 55.337 | 123.915 |
| 11 | 80-TC-DB-DH | 68.184 | 57.678 | 125.862 |
| 12 | 80-LOW-DB-DH | 67.489 | 59.091 | 126.580 |
| 13 | 100-EC-KG-DH | 80.995 | 56.331 | 137.327 |
| 14 | 100-LOW-KG-DH | 79.368 | 58.962 | 138.329 |
| 15 | 100-TC-KG-DH | 80.534 | 58.201 | 138.735 |

Tablodaki verilere göre, yıllık toplam enerji tüketimi açısından ilk sırada yer alan 80-EC-KG-DH ÇKC kuruluşu, 80 cm boşluk genişliği + elektrokromik cam + kuzey-güney yönelme + doğal havalandırma parametrelerinden oluşmakta ve hem ısıtma (68.567 kWh) hem de soğutma (49.009 kWh) yükleri arasında dengeli bir dağılım sağlayarak toplamda 117.576 kWh yıllık tüketim ile en düşük değeri sağlamıştır. Benzer şekilde, 80-LOW-KG-DH ÇKC kuruluşu da 118.673 kWh/yıl toplam tüketim ile etkin cephe tasarımıdır. Bu iki kuruluşun öne çıkmasının başlıca sebepleri; elektrokromik camın güneş ışınımına bağlı olarak ışık geçirgenliğinin düzenlenmesi ile soğutma yüklerinde etkili olması, low-e camın ısı kaybını önleyerek ısıtma yüklerini düşürmesi, kuzey-güney yönelme ile güneş ışınımına doğrudan maruz kalınmaması, mekanik sistemler için tüketilen enerji miktarından kaçınılarak doğal havalandırma türünün kullanılması ve orta genişlikte (80 cm) tampon bölgeye sahip olmaları ile açıklanabilir. Bu bağlamda, tez çalışmasında incelenen örnek bina için en uygun çift kabuk cephe

parametrelerinin tespiti sorusuna yanıt olarak; 80-EC-KG-DH ÇKC kuruluşu en etkin tasarım olarak saptanmıştır. Bununla birlikte, 80-LOW-KG-DH ise enerji performansı açısından benzer bir etkinlik düzeyi sergilediğinden, güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

En etkin sonuçların sunulduğu tabloya göre, kutu tipi çift kabuk cephe kuruluşunda uygulanan 80 cm boşluk genişliği ve doğal havalandırma, en etkili parametrelerdir. Doğal havalandırmanın enerji tüketimini azaltması, örnek binanın mevcut iklim koşullarında mekanik sistemlere olan gereksiniminin düşük olduğunu göstermektedir. Parametreler arasında tüm yönlenmelerin ve cam türlerinin ilk 15'te yer alması, uygun parametre birleşimlerinin enerji performansı üzerinde olumlu etkilerini kanıtlamaktadır. Bu doğrultuda, kuzey-güney (KG) yönlenmede, güneş ışınımının sınırlı etkisi sayesinde yaz döneminde soğutma yüklerinde azalma sağlanırken, kış döneminde düşük güneşlenme süresine rağmen diğer parametrelerle olan etkileşim, ısı kayıplarının önüne geçmektedir. Buna ek olarak, kuzeybatı-güneydoğu (M) ve doğu-batı (DB) yönlenmeleri de uygun cam türü ve havalandırma stratejileri ile desteklendiğinde, enerji dengesini korumada etkilidir.

DesignBuilder benzetim programı ve EnergyPlus eklentisi kullanılarak modellenen 108 farklı çift kabuk cephe kuruluşu temel alınarak, yıllık toplam ısıtma/soğutma tüketimlerine etki eden parametreler dört ana başlık altında detaylı olarak irdelenmiştir:

- 1. Boşluk Genişliği:** Bu çalışmada, 80 cm boşluk genişliği, çift kabuk cephe kuruluşlarında dengeli tampon bölge oluşumu için en uygun değer olarak öne çıkmış olup yıllık enerji tüketim değerleri kapsamında en verimli sonuçları sağlayan parametrelerde baskın rol oynamıştır. Ayrıca, ısıtma ve soğutma yükleri arasında dengeli bir dağılım sağlamıştır. İkinci en etkin boşluk genişliği ise 100 cm'dir. 50 cm boşluk genişliği, diğerlerine kıyasla daha az etkinlik sağlamıştır. Bu durum, örnek bina için dar boşluklu çift kabuk cephe uygulamalarının yeterli yalıtım ve havalandırma performansı gösteremediğini ve dolayısıyla enerji tüketimi açısından dezavantajlı sonuçlara yol açtığını göstermektedir. Bu bulgu, çift kabuk cephe sistemlerinde boşluk genişliğinin, binaların ısıl performansı ve enerji verimliliği üzerinde belirleyici bir parametre olduğunu ve örnek bina için optimum boşluk genişliğinin 80 cm ile 100 cm arasında olması gerektiğini ortaya koymaktadır.

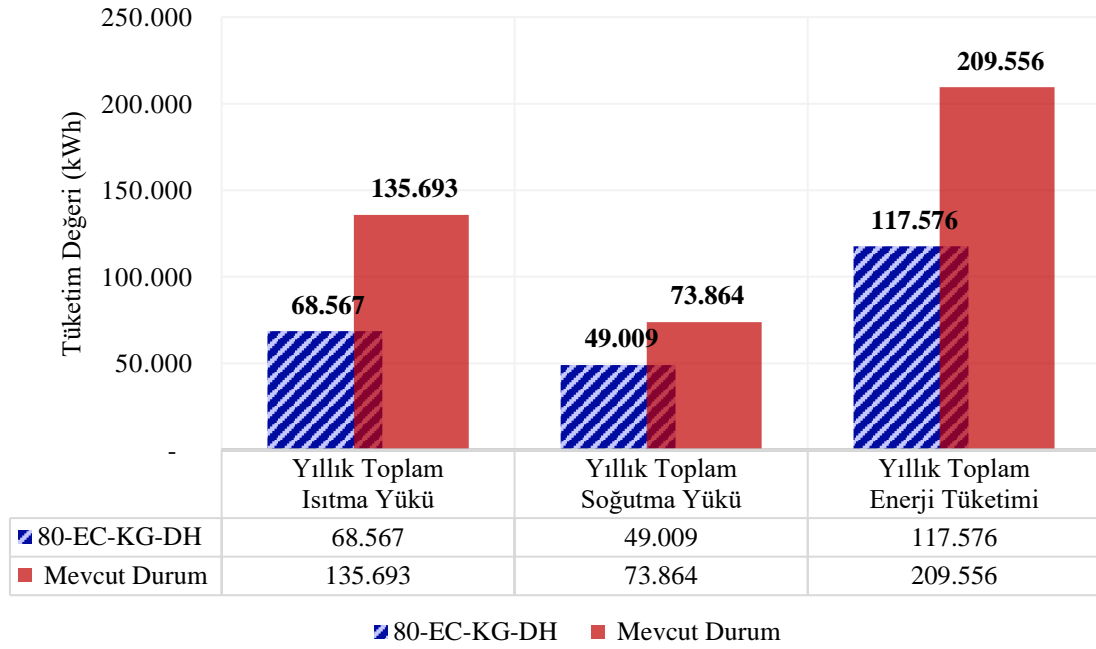
- 2. Cam Türü:** Tablo 5.3'e göre, en düşük yıllık toplam enerji tüketim değerleri kapsamında, parametre olarak seçilen dört cam türünün tamamı farklı ÇKC kuruluşlarında en düşük değerler arasında görülmektedir. Bu durum, tek bir cam türünün mutlak üstünlüğünden ziyade, uygun boşluk genişliği, yönlenme ve havalandırma stratejisiyle birlikte kullanıldığında her cam türünün binanın ısıtma/soğutma enerji tüketimlerinde tasarruf sağlayacağını ortaya koymaktadır. Modellemelerde kullanılan söz konusu cam türleri, kendine özgü termal ve optik özellikleri sayesinde enerji tüketimi üzerinde farklı etkiler yaratmaktadır. Elektrokromik cam, güneş ışığının geçiş oranını kontrol ederek ısıtma ve soğutma dengesini optimize ettiğinden, en düşük enerji tüketimine sahip ÇKC kuruluşlarının çoğunda etkin rol oynamaktadır. Low-e (düşük emisyonlu cam), ısı kaybını azaltarak özellikle ısıtma yükünü düşürmekte ve kullanıldığı çift kabuk cephe tasarımına bağlı olarak enerji verimliliği gözlenmektedir. Termokromik cam, güneş ısısına bağlı dinamik özellikleriyle soğutma ihtiyacını azaltarak toplam enerji tüketimini düşürmede etkili olmaktadır. Reflektif cam ise, yansıtıcı özelliği sayesinde yaz aylarında soğutma yükünü önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Ancak, bu özellik kış aylarında güneş enerjisi kazancını sınırlandırarak ısıtma yükünü artırmaktadır. Bu nedenle, reflektif cam içeren ÇKC kuruluşları diğer cam türlerine kıyasla daha yüksek toplam enerji tüketimi ile sonuçlanmaktadır. Buna rağmen, yalnızca 80 cm boşluk genişliği ile reflektif cam uygulamasına sahip tasarımlarda, yıllık toplam enerji tüketiminde belirgin bir düşüş gözlenmektedir.
- 3. Yönlenme:** Kuzey-güney yönlenme, Tablo 5.3'te doğu-batı ve mevcut yönlenmeye nazaran ağırlıklı olarak bulunmakta olup enerji gereksinimlerinin azaltılmasında etkilidir. Özellikle, kuzey cephesi doğrudan güneş ışınımı almamakta, bu sayede yaz aylarında iç mekânın daha serin kalmasını sağlayarak soğutma yükünü düşürmektedir. Öte yandan, güney cephesinde bulunan ofis mekanları, güneş ışınımından daha fazla faydalanarak kış aylarında ısıtma enerjisi ihtiyacını azaltmaktadır. Bu etkileşim, cephede güneş ışınımının dengeli bir şekilde dağıtılması yoluyla enerji tüketiminin optimize edilmesine ve ısıl yüklerin etkin bir biçimde yönetilmesine katkı sağlamaktadır. Simülasyonlardan elde edilen bulgulara göre doğu- batı yönlenmenin soğutma yükünü artırdığı saptanmıştır. Doğu ve batı yönleri, sabah ve akşam saatlerinde yüksek güneş ışınımına maruz kaldığından, özellikle yaz aylarında aşırı ısınmaya sebebiyet vermektedir. Buna karşın, kış döneminde ısıtma enerjisi tüketimini

sınırlandırmaktadır. Örnek binanın mevcut yönlenmesinde ise (kuzeybatı-güneydoğu), cephelerin bir kısmı sabah güneşi alırken, diğer kısmı öğleden sonra güneş ışınımına maruz kalmaktadır. Bu durum, gün boyunca ışınım dağılımının daha dengeli olmasına katkı sağlarken, aşırı ısınma riskini doğu-batı yönlenmesine göre azaltmaktadır. Kış aylarında, güneş ışınımının açısına bağlı olarak, güneydoğu yönü sabah saatlerinde daha fazla güneş ışığı almakta, bu da ısıtma yüklerini kısmen düşürmektedir. Ancak, kuzeybatı yönü gün boyunca daha düşük güneş ışınımı aldığı için, bu cephede ısı kayıpları meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, uygun cam türü ve havalandırma stratejileri ile desteklenmediğinde, ısıtma yükleri kuzey-güney yönlenmesine kıyasla daha yüksek olabilmektedir. Yaz aylarında ise, sabah ve öğleden sonra güneş ışınımına maruz kalan yüzeyler nedeniyle, soğutma yükleri doğrudan güneş alan doğu-batı yönlenmesine göre daha düşük kalmaktadır. Özellikle, elektrokromik veya reflektif cam gibi ışınım kontrolü sağlayan çözümlerle desteklendiğinde, iç mekân sıcaklıklarının sabit tutulması mümkündür. Genel olarak, yönlenme parametresi, enerji tüketimi üzerinde tek başına belirleyici değildir; cam türü, havalandırma türü ve boşluk genişliği parametreleri ile birlikte değerlendirildiğinde anlamlı bir etki oluşturmaktadır.

4. **Havalandırma Türü:** Doğal havalandırma, 108 farklı ÇKC kuruluşunun enerji tüketim analizine göre, en düşük enerji tüketimini sağlayan havalandırma türüdür. Soğutma yüklerini minimize ederken mekanik sistemlerin ek enerji tüketimini ortadan kaldırması, doğal havalandırmayı en verimli yöntem olarak öne çıkarmaktadır. Doğal havalandırma, özellikle yaz aylarında soğutma yüklerini azaltarak en etkin parametre olarak öne çıkmaktadır.

Şekil 5.3'te mevcut durum ile en yüksek performansı sergileyen çift kabuk cephe kuruluşuna ait yıllık ısıtma, soğutma ve toplam enerji tüketimleri karşılaştırılmıştır. 80-EC-KG-DH ÇKC kuruluşu, mevcut durumda 135.693 kWh olan yıllık toplam ısıtma yükünü %49,46 oranında azaltarak 68.567 kWh seviyesine düşürmüştür. Yıllık toplam soğutma yükü bakımından ise %33,64'lük bir tasarrufla mevcut değerlere kıyasla belirgin bir iyileşme sağlanmıştır. Toplam enerji tüketimi, mevcut durumda 209.556 kWh iken, 80-EC-KG-DH ÇKC kuruluşu ile 117.576 kWh seviyesine düşerek %43,89'lük bir verim artışı sağlanmıştır. Bu doğrultuda, mevcut durumda metrekare başına 45,6 kWh/m² olan yıllık ısıtma enerjisi tüketimi, %49,47 oranında bir azalma göstererek 23,04 kWh/m² seviyesine ulaşmıştır. Benzer şekilde, yıllık toplam

soğutma enerji tüketimi 24,82 kWh/m²'den 16,47 kWh/m²'ye düşerken, toplam enerji tüketimi ise 70,42 kWh/m²'den 39,5 kWh/m²'ye gerileyerek örnek binada enerji tasarrufu sağlanmıştır.



Şekil 5.3: 80-EC-KG-DH ÇKC kuruluşu ile mevcut durum tüketim değerlerinin karşılaştırılması.

Çift kabuk cephe tasarımı, ısıtma ve soğutma yüklerini doğrudan etkilemektedir. Doğru tasarlandığında, güneş ısısı kazanımlarını kontrol ederek yaz aylarında soğutma yüklerini düşürmekte, kış aylarında ise ısı kaybını azaltarak ısıtma tüketimini sınırlandırmaktadır. Bu sistemlerin enerji performansı üzerinde doğrudan etkili olan tasarım parametreleri bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, boşluk genişliği, havalandırma türü, cam türü ve yönlenme parametrelerinin bina enerji yükleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, bu unsurların çeşitli faktörlere bağlı olarak bir arada uygulanması, yıllık toplam enerji tüketimini azaltarak enerji etkin ve sürdürülebilir bina tasarımını mümkün kılmaktadır.

Çalışmanın bulgularında, örnek bina kapsamında modellenen 108 farklı kutu tipi çift kabuk cephe kuruluşundan en düşük yıllık tüketim değerini sağlayan tasarım için aşağıdaki temel parametrelerin belirleyici olduğu saptanmıştır:

1. **Boşluk Genişliği:** 80 cm, ısı performans açısından kritik bir eşik olarak öne çıkmakta olup yeterli yalıtım ve havalandırma kapasitesi sağlayarak enerji tasarruf oranını artırmaktadır.

2. **Cam Türü:** Elektrokromik (EC) aktif/adaptif özelliği ile soğutma yüklerinde etkiliyken, low-e cam ise pasif güneş kontrolü sağlamak ve ısı kayıplarını önlemektedir.
3. **Yönelme:** Kuzeybatı-Güneydoğu yönelimi, güneş ışınımının dengeli dağılımı sayesinde enerji tüketiminin azaltılmasında önemli rol oynarken, Kuzey-Güney yönelimi ise özellikle soğutma yüklerini düşürerek yıllık toplam enerji tüketiminde belirgin düşüş sağlamaktadır.
4. **Havalandırma:** Doğal havalandırma, ısıtma ve soğutma yüklerinde doğrudan etkili olup mekanik sistemlere kıyasla enerji tüketimini anlamlı ölçüde azaltmaktadır.

Modelleme sonuçlarında yıllık toplam enerji tüketimi bakımından ilk sıralarda yakın değerlere sahip ÇKC kuruluşları, örnek bina kapsamında enerji etkin tasarımlardır. Bu durum, farklı mimari kısıtlar veya tasarım tercihleri durumunda alternatif çözümlerin mümkün olduğunu kanıtlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, cephe kuruluşlarında parametre seçiminin önemi vurgulanmış, alternatif tasarım esnekliği sağlanmış ve çift kabuk cephe sistemlerinin sürdürülebilir bina tasarımları ile karbon nötr hedefleri doğrultusunda etkili bir araç olarak kullanılabilceği ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, gelecekteki araştırmalar için nicel bir temel oluşturmanın yanı sıra, pratik uygulamalar için stratejik öneriler sunmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Aelenei, D., Aelenei, L. & Vieira, C.P. (2016). Adaptive façade: Concept, applications, research questions. *Energy Procedia*, 91, 269-275, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.218>.
- Ahmed, M. M., Abel-Rahman, A. K., Ali, A. H. H. & Suzuki, M. (2016). Double skin façade: the state of art on building energy efficiency. *Journal of Clean Energy Technologies*, 4(1), 84-89. <https://doi.org/10.7763/JOCET.2016.V4.258>.
- Ahriz, A., Mesloub, A., Djeflal, L., Alsolami, B. M., Ghosh, A. & Abdelhafez, M. H. H. (2022). The use of Double-Skin Façades to improve the energy consumption of high-rise office buildings in a Mediterranean climate (Csa). *Sustainability*, 14(10), 6004, <https://doi.org/10.3390/su14106004>.
- Aksamija, A. (2013), *Sustainable Facades: Design Methods for High-Performance Building Envelopes*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA.
- Al-awag, E. A. N. & Wahab, I. A. (2022). Perspectives in Double-Skin Façade (DSF) Advantages and Disadvantages. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1022, No. 1, p. 012003). IOP Publishing, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1022/1/012003>.
- Albatayneh, A. (2021). Optimisation of building envelope parameters in a semi-arid and warm Mediterranean climate zone, *Energy and Reports*, <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2021.04.011>.
- Alemdağ, E. L. & Beyhan, F. (2017). A research on construction systems of double skin facades. *Gazi University Journal of Science*, 30(1), 17-30.
- Anaç, M. (2019). Cephe gölgeleme elemanlarının ısıtma ve soğutma yükleri üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Anđelković, A. S., Cvjetković, T. B., Đaković, D. D. & Stojanović, I. H. (2012). The development of simple calculation model for energy performance of double skin façades. *Thermal Science*, 16(suppl. 1), 251-267, <https://doi.org/10.2298/TSCI120201076A>.

- Andreeva, D., Nemova, D. & Kotov, E. (2022). Multi-skin adaptive ventilated facade: A review. *Energies*, 15(9), 3447. <https://doi.org/10.3390/en15093447>.
- Araji, M. T., Elmalky, A. M. & Yao, M. G. (2024). Experimental validation of ventilated double-skin façades aided by neural networks and thermal modelling for heating demand reduction. *Building and Environment*, 256, 111500. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111500>.
- Arons, D. (2000). Properties and Applications of Double-Skin Building Facades. MSc thesis in Building Technology, *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*, USA.
- Aruta, G., Ascione, F., Bianco, N., Iovane, T. & Mauro, G. M. (2023). A responsive double-skin façade for the retrofit of existing buildings: Analysis on an office building in a Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 284, 112850. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112850>.
- Ascione, F., Bianco, N., de Rossi, F., Iovane, T. & Mauro, G. M. (2021). Energy refurbishment of an Office Building by addition of a second skin: Improvement of thermal behavior, energy performance and possible conversion by PV. In *2021 6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.23919/SpliTech52315.2021.9566358>.
- ASHRAE (2014). “ASHRAE Guideline 14- 2014: Measurement of Energy and Demand savings,” American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- ASHRAE Standard 55, (2010). “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA.
- Atmaca, U. (2016). “TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardındaki Güncellemeler”, *Tesisat Mühendisliği*, sayı 154, s. 21-35.
- Attia, S., Bertrand, S., Cuchet, M., Yang, S. & Tabadkani, A. (2022). Comparison of thermal energy saving potential and overheating risk of four adaptive façade technologies in office buildings. *Sustainability*, 14(10), 6106. <https://doi.org/10.3390/su14106106>.
- Ayçam, İ. (2011). Enerji etkin ofis binalarında gelişmiş cephe sistemlerinin incelenmesi, *X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 1593-1609.

- Aydın, D. & Mihlayanlar, E. (2020). A case study on the impact of building envelope on energy efficiency in high-rise residential buildings. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 13(1), 5-18. <https://doi.org/10.21307/acee-2020-001>.
- Azari, R. (2019). Life cycle Energy consumption of buildings; Embodied + operational. In *Elsevier eBooks* (pp. 123–144). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811749-1.00004-3>.
- Barnaś, J. (2014). Double-skin façades—the shaping of modern elevations—technology and materials. *Czasopismo Techniczne, Architektura Zeszyt 7 A* (14) 2014), 5-15.
- Beşiroğlu, Ş. & Özmen, E. (2022). Sürdürülebilir mimarlık kapsamında ekolojik bina ve enerji etkin binanın basit toplamli ağırlıklandırma yöntemi ile karşılaştırılması: ekolojik ve enerji etkin binaların karşılaştırılması. *Tasarım+ Kuram*, 18 (35), 194-205. <https://doi.org/10.14744/tasarimkuram.2022.00378>.
- Beytekin, H. E. (2016). Yapı kabuğunun enerji etkinliği açısından incelenmesi ve değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa.
- Bichiou, Y. & Krarti, M. (2011). Optimization of envelope and HVAC systems selection for residential buildings. *Energy and Buildings*, 43(12), 3373-3382.
- Bielek, B., Klem, J. & Macák, M. (2019). Physical cavity of a double skin facade as a source of pre-heated air in the winter season for the heat recovery unit of a facade. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 27(4), 7-10. <https://doi.org/10.2478/sjce-2019-0025>.
- Boake, T. M. & Harrison, K. (n.d.). The Tectonics of the Environmental Skin: The Occidental Chemical Center (Hooker Building), Niagara Falls, New York. *University of Waterloo, School of Architecture*, Erişim adresi: <https://www.tboake.com/ds/hooker.pdf>
- Boake, T. M. (2002). Structure and Its Enclosure. In *ACSA Technology Conference. Portland, Oregon: ACSA* (pp. 64-73).
- Bonham, M. B. (2019). *Bioclimatic Double-Skin Façades* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315661384>.
- Bueno, B., Street, M., Pflug, T. & Braesch, C. (2017). A co-simulation modelling approach for the assessment of a ventilated double-skin complex fenestration system coupled with a

- compact fan-coil unit. *Energy and Buildings*, 151, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.029>.
- Cabeza, L. F., Bai, Q., Bertoldi, P., Kihila, J. M., Lucena, A. F. P., Mata, É., Mirasgedis, S., Novikova, A. & Saheb, Y. (2022). Buildings. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Shukla P.R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.011>.
- Casini, M. (2018). Active dynamic windows for buildings: A review. *Renewable Energy*, 119, 923-934. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.049>.
- Catto Lucchino, E., Goia, F., Lobaccaro, G. & Chaudhary, G. (2019, February). Modelling of double skin facades in whole-building energy simulation tools: A review of current practices and possibilities for future developments. *In Building Simulation* (Vol. 12, pp. 3-27). Tsinghua University Press. <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0511-y>.
- Charisi, S. (2017). The role of the building envelope in achieving nearly-zero energy buildings (NZEBs). *Procedia Environmental Sciences*, 38, 115–120. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.092>
- Ching, F. D. (2014). *Building Construction Illustrated*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. <https://doi.org/10.1002/9781118786178>.
- Chou, S. K., Chua, K. J. & Ho, J. C. (2009). A study on the effects of double skin façades on the energy management in buildings. *Energy Conversion and Management*, 50(9), 2275–2281. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.05.003>.
- Compagno, A. (2002). *Intelligent Glass Facades: Material, Practice, Design*, Basel: Birkhauser.
- Çabuk, S. (2024). İklim Uyumlu Cephe Sistemlerindeki Kinetik Uygulamaların Analizi. *STAR Sanat ve Tasarım Araştırmaları Dergisi*, 5(8), 123-143.
- Çakır Kıasif, G. (2015). Enerji etkin çift kabuk cephe sistemlerinin istanbul'a uygunluğunun analizi. Doktora Tezi, *Haliç Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

- Çakır, G. (2012). Enerji etkin çift kabuk cephe sistemleri. X. Uluslararası yapıda tesisat teknolojisi sempozyumu, *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği*, 11–24, İstanbul.
- Çetin, H. G. & Dikmen, N. (2022). Bir ofis binasının enerji yüklerinin çift kabuklu cephe sistemi ve güneş kırıcılar ile azaltılması. *Online Journal of Art and Design*, 10(4).
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2018). Binalar için ısı yalıtımı bir zorunluluk mudur? Yalova Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü. Erişim adresi: <https://yalova.csb.gov.tr/binalar-icin-isi-yalitimi-bir-zorunluluk-mudur-haber-226222>
- De Gracia, A., Castell, A., Navarro, L., Oró, E., & Cabeza, L. F. (2013). Numerical modelling of ventilated facades: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 539–549. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.029>
- Department of the Environment and Energy, (2013). Factsheet: HVAC Energy Breakdown. *HVAC HESS Heating, Ventilation & Air-Conditioning High Efficiency Systems Strategy*. Australian Government. Erişim Adresi: <https://www.environment.gov.au/system/files/energy/files/hvac-factsheet-basics.pdf>. Erişim tarihi: 6 Kasım 2024.
- Ding, W., Hasemi, Y. & Yamada, T. (2005). Natural ventilation performance of a double-skin façade with a solar chimney. *Energy and buildings*, 37(4), 411-418. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.08.002>.
- Doebber, I. & McClintock, M. (2006). Analysis process for designing double skin facades and associated case study. *Proceedings of SimBuild*, 2(1).
- Dragišić, V. T. (2016). Improved energy efficiency and optimization of microclimate in buildings. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 53, p. 01044). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20165301044>.
- Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi. (2009). "Enerji Tüketiminde Dönüşüm İçin Binalarda Enerji Verimliliği." *Sürdürülebilir Bir Dünya İçin Kurumsal Çözümler*, İstanbul: SKD Türkiye.
- Elbi, D. (2019). Yapı bilgi modelleme aracılığı ile enerji etkin yapı tasarımı ve geliştirilmesi: bir konut projesi örneği. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

- ElGhazi, Y. S. A. (2021). Integrated design approach for responsive solar-shadings in double skin facades in hot arid climate. Doctoral dissertation, Newcastle University.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024). 2023 Yılı Bina Sektörü Kıyaslama Raporu. Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı [çevrimiçi]. (03.11.2024), <https://enerjiverimliliği.enerji.gov.tr/template/dist/pdf/b12ff23c-b10a-4b8f-a8c1-20a9947479d3.pdf>
- Erçin, Ç. (2005). Mimarlıkta iklim faktörü ve bu faktöre bağlı olarak konut alanlarında fiziksel yerleşme yoğunluğunun belirlenmesi için ilkeler. *Yüksek Lisans Tezi, Yakın Doğu Üniversitesi Fen ve Sosyal Bilimler Enstitüsü.*
- Ergin, Ö. (2019). Uyarlanabilir cephe sistemlerinde güncel yaklaşımlar ve akıllı malzemelerin kullanımı. *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*
- Erkol, E. & Sayın, S. (2021). Akıllı Cam Cephe Sistemleri ve Teknolojileri. Online Journal of Art and Design 9(1):1–22. <https://www.researchgate.net/publication/344824577>.
- Fathaliana, A. & Kargarsharifabad, H. (2018). Actual validation of energy simulation and investigation of energy management strategies (Case Study: An office building in Semnan, Iran) *Case Studies in Thermal Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.06.007>.
- Fenner, A. E., Kibert, C. J., Li, J., Razkenari, M. A., Hakim, H., Lu, X., ... Sam, M. (2020). Embodied, operation, and commuting emissions: A case study comparing the carbon hotspots of an educational building. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122081. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.122081>
- Firouzabad, M. R. & Astarai, F. R. (2024). Energetical effect of electrochromic glazing on the double-skin façade of the building in different climates. *Energy and Buildings*, 114344, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114344>.
- Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Berardi, U., Tookey, J., Li, D. H. W. & Kariminia, S. (2016). Exploring the advantages and challenges of double-skin façades (DSFs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1052–1065. doi:10.1016/j.rser.2016.01.130.

- Giuseppe A., Ascione F., Iovane T. & Mastellone M. (2025). Double-skin façades for the refurbishment of historic buildings: energy-economic feasibility for different types of glazing and ventilation rates. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112125>.
- GlobalABC. (2023). Call for buildings breakthrough rallying point. Erişim adresi: <https://globalabc.org/news/call-buildings-breakthrough-rallying-point>, Erişim tarihi: 25.09.2024.
- GlobalABC/IEA/UNEP Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency and the United Nations Environment Programme (2020). GlobalABC Roadmap for Buildings and Construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector, *IEA*, Paris.
- Granqvist, C. G. (2016). *Recent progress in thermochromics and electrochromics: A brief survey. Thin Solid Films*, 614, 90–96. doi:10.1016/j.tsf.2016.02.029
- Gratia, E. & De Herde, A. (2007). The most efficient position of shading devices in a double-skin facade. *Energy and buildings*, 39(3), 364-373, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.09.001>.
- Gündoğdu, E. & Arslan, H. D. (2020). Mimaride enerji etkin cephe ve biyomimikri. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8(4), 922-935, <https://doi.org/10.29109/gujsc.799424>.
- Güvenli, Ö., (2006), “Tarihsel Süreç İçinde Malzeme Cephe İlişkisi ve Giydirme Cepheler”, Yüksek Lisans Tezi, YıldızTeknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Haase, M., Wong, F. & Amato, A. (2007) Double–Skin Facades for Hong Kong. *Surveying & Built Environment*. Vol. 18, No:2, p.17-32.
- Hannoudi, L. A., Christensen, J. E. & Lauring, M. (2015). Façade system for existing office buildings in Copenhagen. *Energy Procedia*, 78, 937-942, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.023>.
- Heimrath, R., Hengsberger, H., Mach, T. & Streicher, W. (2005). *BESTFAÇADE: Best Practice for Double Skin Façades: WPI Report "State of the Art"* (W. Streicher, Ed.). Graz University of Technology, Institut of Thermal Engineering, Graz, Austria.

- Herzog, T., Krippner, R. & Lang, W. (2004)., Institut für Internationale ArchitekturDokumentation GmbH & Co. KG, München: Birkhäuser, <https://doi.org/10.11129/detail.9783034614573>.
- Hilmarsson, J. G. (2008). Double skin façade: Evaluating the viability of the component. *Copenhagen: Copenhagen Technical Academy*.
- Høseggen, R., Wachenfeldt, B. J. & Hanssen, S. O. (2008). Building simulation as an assisting tool in decision making: case study: with or without a double-skin façade?. *Energy and buildings*, 40(5), 821-827. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.05.015>.
- Hou, K., Li, S. & Wang, H. (2021). Simulation and experimental verification of energy saving effect of passive preheating natural ventilation double skin façade. *Energy Exploration & Exploitation*, 39(1), 464-487. <https://doi.org/10.1177/0144598720956288>.
- IEA (2023a), Annual change in global CO2 emissions from energy combustion and industrial processes, 1900-2022. *IEA*, Paris. Erişim adresi: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-change-in-global-co2-emissions-from-energy-combustion-and-industrial-processes-1900-2022>, Erişim tarihi: 11.10.2024.
- IEA (2023b). Building envelopes. *International Energy Agency*. Erişim adresi: <https://www.iea.org/energy-system/buildings/building-envelopes#tracking> Erişim tarihi: 11.10.2024.
- IEA. (2022). Buildings 2021. Erişim adresi: <https://www.iea.org/reports/buildings> Erişim tarihi: 26.09.2024.
- IMPVP (2010). “International performance measurement and verification protocol: concepts and options for determining energy and water savings,” Efficiency Valuation Organisation, Oak Ridge.
- Inoue T., Ichinose M., Ichikawa N., (2008). “Thermotropic glass with active dimming control for solar shading and daylighting”, *Energy and Buildings*, 40(3), 385–393.
- Ioannidis, Z., Rounis, E.-D., Athienitis, A.. & Stathopoulos, T. (2020). Double skin façade integrating semi-transparent photovoltaics: Experimental study on forced convection and heat recovery. *Applied Energy*, 278, 115647, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115647>.

- IPCC. (2023): Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- İnan, T. & Başaran, T. (2015). Çift kabuk cepheler: avantajları ve dezavantajları. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 146.
- Jankovic, A. & Goia, F. (2022). Control of heat transfer in single-story mechanically ventilated double skin facades. *Energy and Buildings*, 271, 112304. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112304>.
- Jelle, B. P. & Breivik, C. (2012). State-Of-The-Art Building İntegrated Photovoltaics. *Energy Procedia*, 20, 68-77. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.03.009>.
- Jelle, B. P., Hynd, A., Gustavsen, A., Arasteh, D., Goudey, H. & Hart, R. (2012). Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 96, 1–28. [doi:10.1016/J.SOLMAT.2011.08.010](https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2011.08.010).
- Kazanasmaz, T. & Diler, Y., (2011). ‘Gelişmiş Cam Teknolojileri ile Enerji Etkinliğin Değerlendirmesi’, VI. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu ve Sergisi Bildirileri, 24-25 Kasım, İzmir, Bildiriler Kitabı, 84-93.
- Khalifa, A. M., Nour, W. & Elghamry, R. (2023). The Impact of Using Smart Windows Technique in Reducing Energy Consumption and Improving Building Performance in the Office Building. *Journal of Engineering Research*, 7(4), 57-64.
- Khorasgani, A. M., Zarearsanjani, N. & Rodriguez, A. (2024). Using IoT in Double Skin Facades toward Thermal Comfort: A Review. *Urban Planning and Construction*, 2(1). <https://doi.org/10.55121/upc.v2i1.131>.
- Khoshbakht, M., Gou, Z., Dupre, K. & Altan, H. (2017). Thermal environments of an office building with double skin façade. *Journal of Green Building*, 12(3), 3-22. <https://doi.org/10.3992/1943-4618.12.3.3>.
- Kilaire, A. & Stacey, M. (2017). Design of a prefabricated passive and active double skin façade system for UK offices. *Journal of Building Engineering*, 12, 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.06.001>.

- Kim, D. D. (2020). Computational fluid dynamics assessment for the thermal performance of double-skin façades in office buildings under hot climatic condition. *Building Services Engineering Research and Technology*, 42(1), 45. <https://doi.org/10.1177/0143624420952962>.
- Knaack U. & Klein T. (2007) *Façades-Principles Of Construction*, Birkhauser Verlag Ag, Basel, Boston, Berlin.
- LaFrance, M. (2013). *Technology Roadmap: Energy efficient building envelopes*. Paris: IEA.
- Lee, C. S., Lee, H., Choi, M. & Yoon, J. (2019). Design optimization and experimental evaluation of photovoltaic double skin facade. *Energy and Buildings*, 202, 109314. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.031>.
- Lee, E., Selkowitz, S., Clear, R., DiBartolomeo, D., Klems, J., Fernandes, L., ... Yazdani, M. (2006). *Advancement of Electrochromic Windows*, Sacramento, CA: California Energy Commission, PIER, 500-01-023, LBNL-59821, USA.
- Levesque, A., Pietzcker, R. C. & Luderer, G. (2019). Halving energy demand from buildings: The impact of low consumption practices. *Technological Forecasting and Social Change*, 146, 253-266, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.04.025>.
- Li, D. H. W. & Lam, T. N. T. (2001). Evaluation of lighting performance in office buildings with daylighting controls. *Energy and Buildings*, 33(3), 189-200. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00067-6).
- Li, H., Guo, H., Lu, X., Hu, J. & Zhong, K. (2024). Zero-Energy Purification of Ambient Particulate Matter Using a Novel Double-Skin Façade System Integrated with Porous Materials. *Sustainability*, 16(6), 2489. <https://doi.org/10.3390/su16062489>.
- Lim, Y. & Ismail, M. R. (2023). Thermal and Energy Influences of Double Skin Façade Towards Green Buildings in Tropical Classified Countries. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 109(2), 1-26. <https://doi.org/10.37934/arfmts.109.2.126>.
- Liu, X., Wang, W., Ding, Y., Wang, K., Li, J., Cha, H. & Sailer, Y. (2024). Research on the Design Strategy of Double-Skin Facade in Cold and Frigid Regions—Using Xinjiang Public Buildings as an Example. *Sustainability*, 16(11), 4766. <https://doi.org/10.3390/su16114766>.

- Loncour, X., Deneyer, A., Blasco, M., Flamant, G. & Wouters, P. (2005). Ventilated Double Skin Façades-Classification & illustration of façade concepts. Report, Belgian Building Research Institute (BBRI), Brussels.
- Lucchino, E. C. & Goia, F. (2023). Multi-domain model-based control of an adaptive façade based on a flexible double skin system. *Energy and Buildings*, 285, 112881. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112881>.
- Mahdavinejad, M., Bazazzadeh, H., Mehrvarz, F., Berardi, U., Nasr, T., Pourbagher, S. & Hoseinzadeh, S. (2023). The impact of facade geometry on visual comfort and energy consumption in an office building in different climates. *Energy Reports*, 11, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.11.021>.
- Matour, S., Garcia-Hansen, V., Omrani, S., Hassanli, S. & Drogemuller, R. (2022). Thermal performance and airflow analysis of a new type of Double Skin Façade for warm climates: An experimental study. *Journal of Building Engineering*, 62, 105323. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105323>
- Memari, A. M., Solnosky, R. & Hu, C. (2022). Multi-disciplinary characteristics of double-skin facades for computational modeling perspective and practical design considerations. *Buildings*, 12(10), 1576. <https://doi.org/10.3390/buildings12101576>.
- Mindel L. F. (2024). Otto Wagner's Vienna: The Architect Who Pioneered Modernism in Austria. *Architectural Digest*. Erişim adresi: <https://www.architecturaldigest.com/gallery/otto-wagner-vienna-austria-modernism-architecture-slideshow>, Erişim tarihi: 29.09.2024.
- Naddaf, M. S. & Baper, S. Y. (2023). The role of double-skin facade configurations in optimizing building energy performance in Erbil city. *Scientific Reports*, 13(1), 8394. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35555-0>.
- Năstase, G., Doboși, I. S., Brezeanu, A. I., Taus, D., Tăbăcaru, M. B., Vuțoiu, B., ... Iordan, N. F. (2022). Experimental Heat Transfer, Sound Insulation and Interior Comfort Parameters Assessment on a Box Double-Skin Façade. *Buildings*, 12(6), 730. <https://doi.org/10.3390/buildings12060730>.

- Ochoa, C. E. & Capeluto, I. G. (2006). Evaluating visual comfort and performance of three natural lighting systems for deep office buildings in highly luminous climates. *Building and Environment*, 41(8), 1128-1135. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.001>.
- Oesterle, E. (2001). Double-skin facades: integrated planning; building physics, construction, aerophysics, air-conditioning, economic viability. Prestel.
- Okumuş, E. (2020). Sürdürülebilir mimari kapsamında akıllı cephe sonuçlarının incelenmesi. *Akademik Perspektif Prosedürü*, 3 (1), 267-281. <https://doi.org/10.33793/acperpro.03.01.54>.
- Parikh P. & Chin-Yee S. (2023). World Economic Forum. (WEF). What were the key outcomes of COP 28?. Erişim adresi: <https://www.weforum.org/agenda/2023/12/cop28-key-outcomes-un-climate-summit/>. Erişim tarihi: 20.09.2024.
- Pelletier, K., Wood, C., Calautit, J. & Wu, Y. (2023). The viability of double-skin façade systems in the 21st century: A systematic review and meta-analysis of the nexus of factors affecting ventilation and thermal performance, and building integration. *Building and Environment*, 228, 109870. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109870>.
- Poirazis, H., (2004). Double Skin Façades For Office Buildings, Lund Institute Of Technology Department Of Construction And Architecture, Lund University, Lund.
- Pomponi, F. & Piroozfar, P. A. E. (2015). Double skin façade (DSF) technologies for UK office refurbishments. *Structural Survey*, 33(4/5), 372–406. <https://doi.org/10.1108/SS-04-2015-0025>.
- Pomponi, F., Piroozfar, P. A., Southall, R., Ashton, P. & Farr, E. R. (2015). Life cycle energy and carbon assessment of double skin façades for office refurbishments. *Energy and Buildings*, 109, 143-156. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.051>.
- Preet, S., Sharma, M. K., Mathur, J., Chowdhury, A. & Mathur, S. (2020). Performance evaluation of Photovoltaic double-skin facade with forced ventilation in the composite climate. *Journal of Building Engineering*, 101733. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101733>.
- Qurraie, B. S. & Sertyamaç, R. (2023). Investigation of energy performance of nanotechnological material and double-skin facade system in office buildings in

- Turkiye. *Intelligent Buildings International*, 15(6), 251-265.
<https://doi.org/10.1080/17508975.2024.2310059>.
- Radmard, H., Ghadamian, H., Esmailie, F., Ahmadi, B. & Adl, M. (2020). Examining a numerical model validity for performance evaluation of a prototype solar oriented Double skin Façade: Estimating the technical potential for energy saving. *Solar Energy*, 211, 799–809. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.017>.
- Reinhart, C. F. & Wienold, J. (2011). The daylighting dashboard – A simulation-based design analysis for daylit spaces. *Building and Environment*, 46(2), 386-396.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.08.001>.
- Riganti, M., Castri, G. L., Serra, V., Manca, M. & Favoino, F. (2024). Energy Saving Potential of Advanced Dual-Band Electrochromic Smart Windows for Office Integration. SSRN: 4888677. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4888677>.
- Roberts, F., Yang, S., Du, H. & Yang, R. (2023). Effect of semi-transparent a-Si PV glazing within double-skin façades on visual and energy performances under the UK climate condition. *Renewable Energy*, 207, 601-610.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.023>.
- Saelens, D., Roels, S. & Hens, H. (2008). Strategies to improve the energy performance of multiple-skin facades. *Building and Environment*, 43(4), 638-650.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.024>.
- Salzano, M. (2021). Monarch sanctuary: Integrated biodiversity in double-skin facade. *Architect Magazine*. Erişim adresi: https://www.architectmagazine.com/project-gallery/monarch-sanctuary-integrated-biodiversity-in-double-skin-facade_o, Erişim tarihi: 29.09.2024.
- Saroglou, T., Theodosiou, T., Givoni, B. & Meir, I. A. (2019). Studies on the optimum double-skin curtain wall design for high-rise buildings in the Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 109641. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109641>.
- Schaffer, M., Bugenings, L. A., Larsen, O. K. & Zhang, C. (2023). Exploring the potential of combining diffuse ceiling and double-skin facade for school renovations. *Building and Environment*, 235, 110199. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110199>.

- Schindler, V. M. (2016). Algas verdes en la arquitectura y diseño receptivos. *Diseña*, (10), 176-191, <https://doi.org/10.5167/uzh-126695>.
- Schwartz, M. (2008). *Encyclopedia of Smart Materials*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781420043730>
- Shen, C. & Li, X. (2016). Thermal performance of double skin façade with built-in pipes utilizing evaporative cooling water in cooling season. *Solar Energy*, 137, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.055>.
- Silolezya H. R. (2023). The Sustainability Agenda at COP Summits: What Has Been Achieved So Far? *LinkedIn*. Erişim adresi: <https://www.linkedin.com/pulse/sustainability-agenda-cop-summits-what-has-been-we-28-rabecca-4k0of/>, Erişim tarihi: 22.09.2024.
- Slavković, B. P. (2017). Application of the double skin façade in rehabilitation of the industrial buildings in Serbia. *Thermal Science*, 21(6 Part B), 2945-2955. <https://doi.org/10.2298/TSCI160524179S>.
- Solla, I. F. (2011). The Steiff Factory and the Birth of the Curtain Wall. *Facades Confidential*. Erişim adresi: <https://facadesconfidential.blogspot.com/2011/11/steiff-factory-and-birth-of-curtain.html>, Erişim tarihi: 29.09.2024.
- Solla, I. F., (2012). Le Corbusier, Mur Neutralisant and the Brise Soleil. *Facades Confidential*. Erişim Adresi: <https://facadesconfidential.blogspot.com/2012/04/le-corbusier-mur-neutralisant-and.html>, Erişim tarihi: 29.09.2024.
- Sotelo-Salas, C., Pozo, C. E. & Esparza-López, C. J. (2021). Thermal assessment of spray evaporative cooling in opaque double skin facade for cooling load reduction in hot arid climate. *Journal of Building Engineering*, 38, 102156. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102156>.
- Stec, W. & Van Paassen, D. (2003). Defining the performance of the double skin facade with the use of the simulation model. In 8th International IBPSA Conference Building Simulation. Vol. 2, pp. 1243-1250.
- Stec, W. J. & Van Paassen, A. H. C. (2005). Symbiosis of the double skin façade with the HVAC system. *Energy and Buildings*, 37(5), 461-469. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.08.007>.

- Sung, U. J. & Kim, S. H. (2019). A study on the improvement of double-skin facade operation for reducing heating load in winter. *Sustainability*, 11(22), 6238, <https://doi.org/10.3390/su11226238>.
- Şenyurt, S. U. & Altın, M. (2014). Enerji Etkin Tasarımın Çatı ve Cephelere Yansıması. 7. *Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Beşiktaş, İstanbul.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB). (2024). Sözleşme ve Protokoller, Erişim adresi: <https://iklim.gov.tr>, Erişim Tarihi: 22/09/2024.
- T.C. Ticaret Bakanlığı. (2021). Yeşil Mutabakat Eylem Planı. Erişim adresi: <https://ticaret.gov.tr/data/60f1200013b876eb28421b23/MUTABAKAT%20YE%C5%9E%C4%B0L.pdf>. Erişim Tarihi: 22/09/2024.
- Taher, R., Abdelkader, W. A. & Fahim, A. A. M. A. (2022). Sustainable Building: To Achieve Thermal Comfort in Highly Glazed Buildings Using Smart Glass. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1113, No. 1, p. 012021). IOP Publishing.
- Ulukavak Harputlugil, G. (2016). Enerji Verimliliği Bina Tasarım Stratejileri. *T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı*. Binalarda Enerji Verimliliğinin Artırılması İçin Teknik Yardım Projesi, 38.
- URL-1: IAS Parliament. (2021). Mitigating a crisis: COP 26 Glasgow. Erişim adresi: <https://www.iasparliament.com/current-affairs/gsiiii/mitigating-a-crisis-cop-26-Glasgow>, Erişim tarihi: 01.10.2023.
- URL-2: Sustainability For All. (2019). Climate Change, Achievements of the Conference of the Parties. Erişim adresi: https://www.activesustainability.com/climate-change/achievements-of-the-conference-of-the-parties/?_adin=11734293023, Erişim tarihi: 19.09.2024.
- URL-3: United Nations Framework Convention on Climate Change. COP29. Erişim tarihi: 17.01.2025. <https://unfccc.int/cop29>.
- URL-4: United Nations. Department of Economic and Social Affairs, Sustainable Development. "The 17 Goals". Erişim adresi: <https://sdgs.un.org/goals>. Erişim tarihi: 13.10.2024.

- URL-5: Birleşmiş Milletler. Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları. Küresel Amaçlar. Erişim adresi: <https://www.kureselamaclar.org/>, Erişim tarihi: 16.09.2024.
- URL-6: Orion Heritage. (T.y.). Built Heritage. Erişim adresi: <https://www.orionheritage.co.uk/casestudy/built-heritage/>, Erişim tarihi: 29.09.2024.
- URL-7: Urban Systems. (t.y.). Commerzbank HQ, Frankfurt, Germany. Urban Systems Design. Erişim adresi: <https://www.urbansystems.design/commerzbank-hq-frankfurt-germany>, Erişim tarihi: 24.12.2024.
- URL-8: Sauerbruch Hutton. Photonic Center, Berlin. Erişim adresi: <https://www.sauerbruchhutton.de/en/project/pho>, Erişim tarihi: 29.09.2024.
- URL-9: Yeadon D. (2014). Homeostatic Façade System. MaterialDistrict. Erişim adresi: <https://materialdistrict.com/article/homeostatic-facade-system/#moved>, Erişim tarihi: 20.12.2024.
- URL-10: ArchDaily. (2016). The Edge / PLP Architecture. Erişim adresi: <https://www.archdaily.com/785967/the-edge-plp-architecture>, Erişim tarihi: 30.09.2024.
- URL-11: Terreform. (2019). Monarch Sanctuary. Cooper Hewitt Design Triennial. Erişim adresi: <https://www.terreform.org/monarch-sanctuary>, Erişim tarihi: 29.09.2024.
- URL-12: Behnisch Architekten. Norddeutsche Landesbank Hannover. Erişim adresi: <https://behnisch.com/work/projects/0029>, Erişim tarihi: 29.09.2024.
- URL-13: ArchDaily. (2019). 30 St Mary Axe tower / Foster + Partners. Erişim adresi: <https://www.archdaily.com/928285/30-st-mary-axe-tower-foster-plus-partners>, Erişim tarihi: 29.09.2024.
- URL-14: ArchDaily. (2013). 1 Angel Square / 3D Reid. Erişim adresi: <https://www.archdaily.com/337430/1-angel-square-3d-reid>, Erişim tarihi: 28.09.2024.
- URL-15: Eko Yapı Dergisi. Dünyanın en yeşil binası: The Edge. Erişim adresi: <https://www.ekoyapidergisi.org/dunyanin-en-yesil-binasi-the-edge>, Erişim tarihi: 30.09.2024.

- URL-16: ArchDaily. (2013). RMIT Design Hub / Sean Godsell. Erişim adresi: <https://www.archdaily.com/335620/rmit-design-hub-sean-godsell>, Erişim Tarihi: 20.09.2024.
- URL-17: ArchDaily. (2016). Nearly zero energy building of the Guian Innovation Park / SUP Atelier. Erişim adresi: https://www.archdaily.com/799060/nearly-zero-energy-building-of-the-guian-innovation-park-sup-atelier?ad_content=799060&ad_medium=widget&ad_name=featured_loop_main, Erişim Tarihi: 20.09.2024.
- URL-18: Balıkesir Teknokent, Tarihçe, Bauntek. Erişim adresi: <https://www.bauntek.com.tr/bauntek/tarihce> Erişim Tarihi: 16.11.2024.
- URL-19: Balıkesir Üniversitesi, Yerleşke Krokisi. Erişim tarihi: 01.03.2025. Erişim adresi: <https://www.balikesir.edu.tr/yerleske-krokisi>.
- URL-20: T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB). Meteoroloji Müdürlüğü, İklim sınıflandırmaları. Erişim adresi: <https://www.mgm.gov.tr/iklim/iklim-siniflandirmalari.aspx?m=BALIKESIR>, Erişim tarihi: 15.12.2024.
- URL-21: Coğrafya Dünyası. Erişim tarihi: 29.09.2024. Erişim adresi: <https://www.cografya.gen.tr/tr/balikesir/iklim.html>, Erişim Tarihi: 15.12.2024.
- URL-22: Meteoblue. Balıkesir ilinin son 30 yıllık iklim verileri. https://www.meteoblue.com/tr/hava/historyclimate/climatemodelled/bal%C4%B1kesir_t%C3%BCrkiye-cumhuriyeti_322165. Erişim tarihi: 25.01.2025.
- Waldner, R., Flamant, G., Prius, S., Erhorn-Klutting, H., Ifigenia, F., Duarte, R. et al. (2007). Best Practice For Double Skin Façades, *WP5 Best Practice Guidelines, BESTFAÇADE. Intelligent Energy*. University of Lund, Sweden.
- Wang, Y. & Zhang, X. (2016). Optimization of building energy performance: a simulation-based approach. *Energy and Buildings*, 127, 337-346. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.040>.
- Waskow, D., Srouji, J., Layke, J., Warszawski, N., Swaby, G., Bhandari, P., Alayza, N. et al. (2023). *World Resources Institute*. (WRI). Unpacking COP28: Key Outcomes from the

- Dubai Climate Talks, and What Comes Next. Erişim adresi: <https://www.wri.org/insights/cop28-outcomes-next-steps>, Erişim tarihi: 20.09.2024.
- Yang, R., Li, D., Arıcı, M., Salazar, S. L., Zhang, C., Fu, Q., ... Zheng, Q. (2023). Thermal performance of an innovative double-skin ventilated façade with multistep-encapsulated PCM integration. *Journal of Energy Storage*, 73, 109121. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109121>.
- Yıldız, Y., Göksal Özbalta, T. & Durmuş Arsan, Z. (2011). Farklı Cam Türleri ve Yönlerine Göre Pencere/Duvar Alanı Oranının Bina Enerji Performansına Etkisi: Eğitim Binası, İzmir. *MEGARON*, 6(1), 30-38.
- Yılmaz, Z. (2006) Akıllı Binalar ve Yenilenebilir Enerji, *Tesisat Mühendisliği Dergisi* (91) 7-15.
- Yüksel, E. N. & Ekici, B. B. (2023). Çift Kabuk Cephe Sistemlerinin Sıcak ve Soğuk İklim Bölgeleri için Isıl Performanslarının İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 35(2), 495-504. <https://doi.org/10.35234/fumbd.1293891>.
- Zhang, C., Larsen, O. K., Hu, Y., Mikkelsen, A. K., Pedersen, L. L., Nyborg, V. Ø. & Larsen, T. S. (2023). Experimental investigation of an integrated renovation solution combining diffuse ceiling ventilation and double skin façade. *Building and Environment*, 246, 111000. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111000>.
- Zhao, X., Wei, A., Zou, S., Dong, Q., Qi, J., Song, Y. & Shi, L. (2024). Controlling naturally ventilated double-skin façade to reduce energy consumption in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 202, 114649. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114649>.
- Zheng, C., Chen, C., Hong, X., Zhang, W., Yang, R. & Shi, F. (2024). Experimental evaluation of the thermal, lighting, and energy performances of a mechanically ventilated double-skin façade with Venetian blinds and a light shelf. *Energy and Buildings*, 306, 113947. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113947>.
- Zhou, J. & Chen, Y. (2010). A review on applying ventilated double-skin facade to buildings in hot-summer and cold-winter zone in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(4). 1321-1328, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.017>.

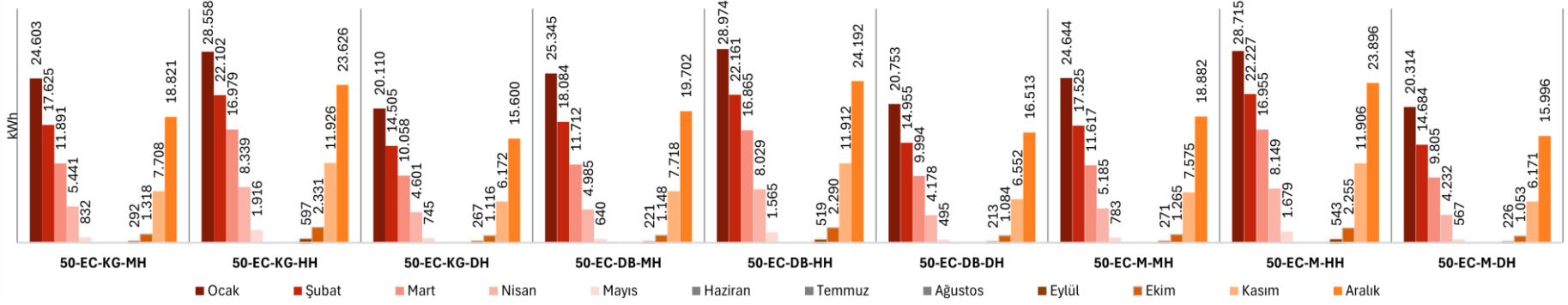
Zomorodian, Z. S. & Tahsildoost, M. (2018). Energy and carbon analysis of double skin façades in the hot and dry climate. *Journal of Cleaner Production*, 197, 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.178>.

Zuhaib, S., Hajdukiewicz, M. & Goggins, J. (2019). Application of a staged automated calibration methodology to a partially-retrofitted university building energy model. *Journal of Building Engineering*, 26, 100866. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100866>.

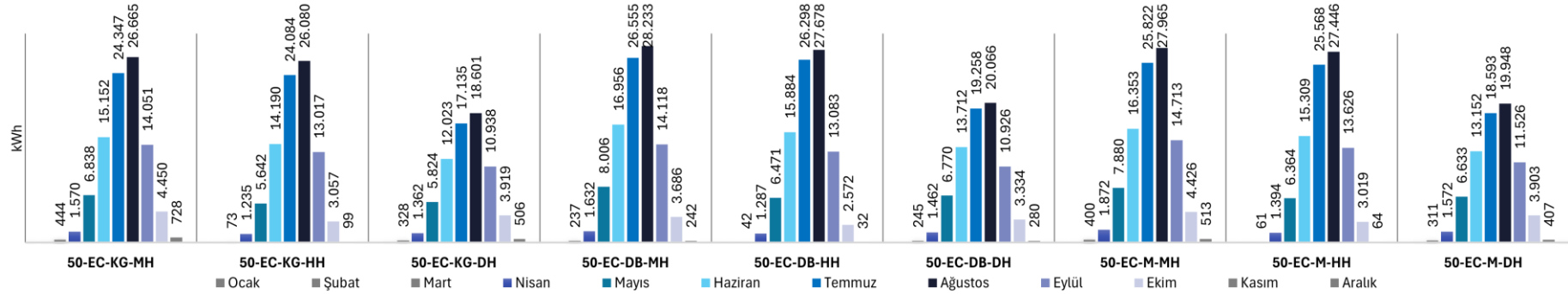
EKLER

EKLER

EK A: 50-EC sabit parametresine sahip ÇKC kuruluşlarının enerji tüketimleri.

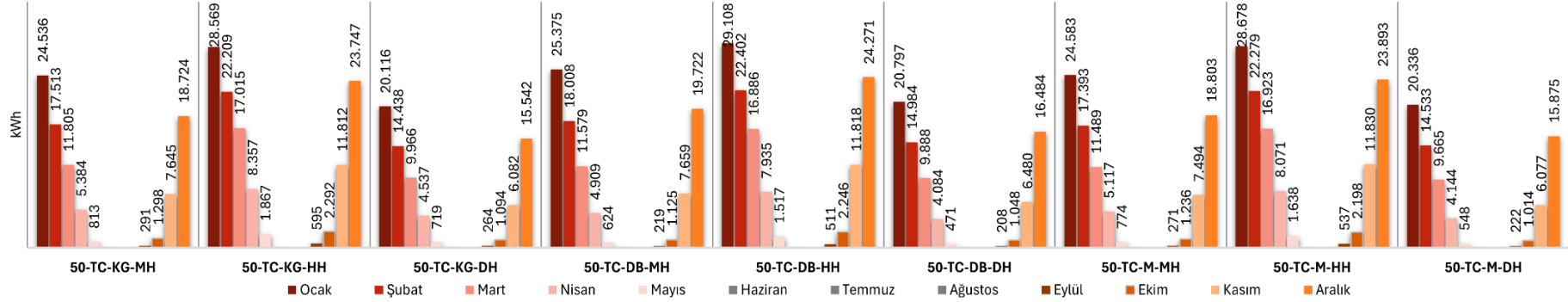


Şekil A.1: 50-EC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı.

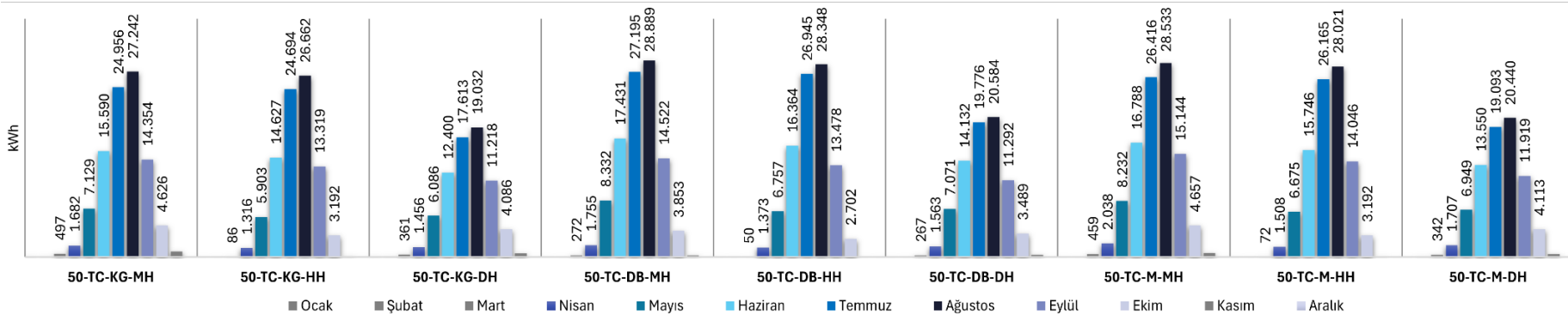


Şekil A.2: 50-EC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı.

EK B: 50-TC sabit parametresine sahip ÇKC kuruluşlarının enerji tüketimleri.

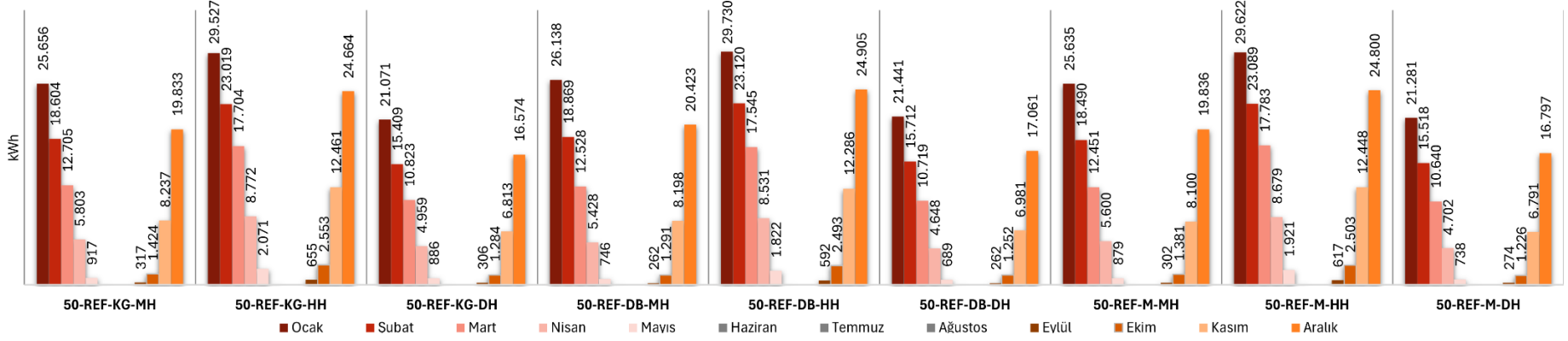


Şekil B.3: 50-TC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı.

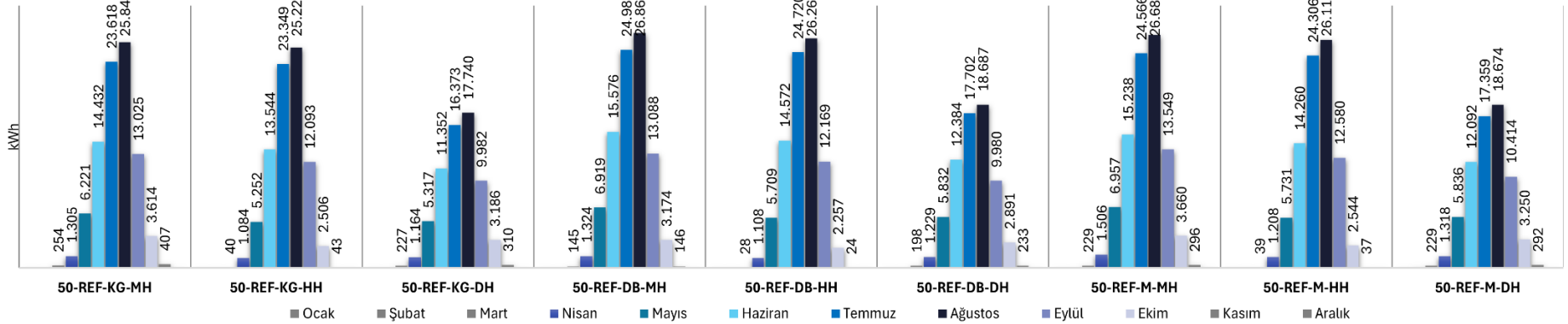


Şekil B.4: 50-TC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı.

EK C: 50-REF sabit parametresine sahip ÇKC kuruluşlarının enerji tüketimleri.

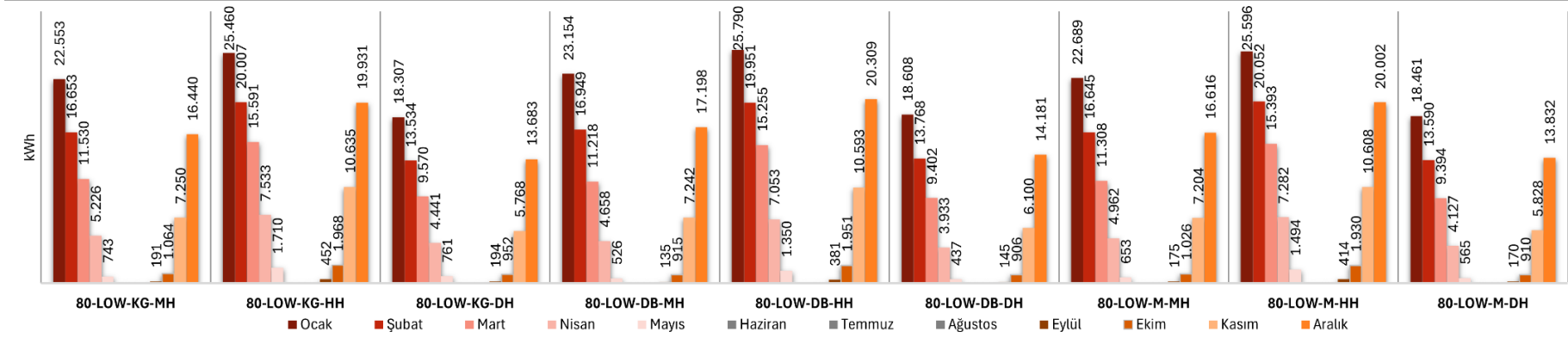


Şekil C.5: 50-REF sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı.

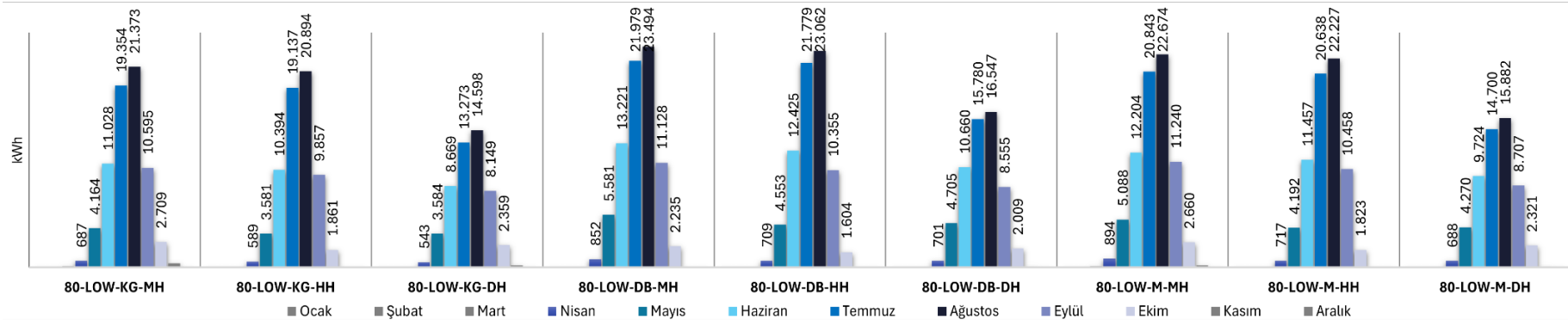


Şekil C.6: 50-REF sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı.

EK D: 80-LOW sabit parametresine sahip ÇKC kuruluşlarının enerji tüketimleri.

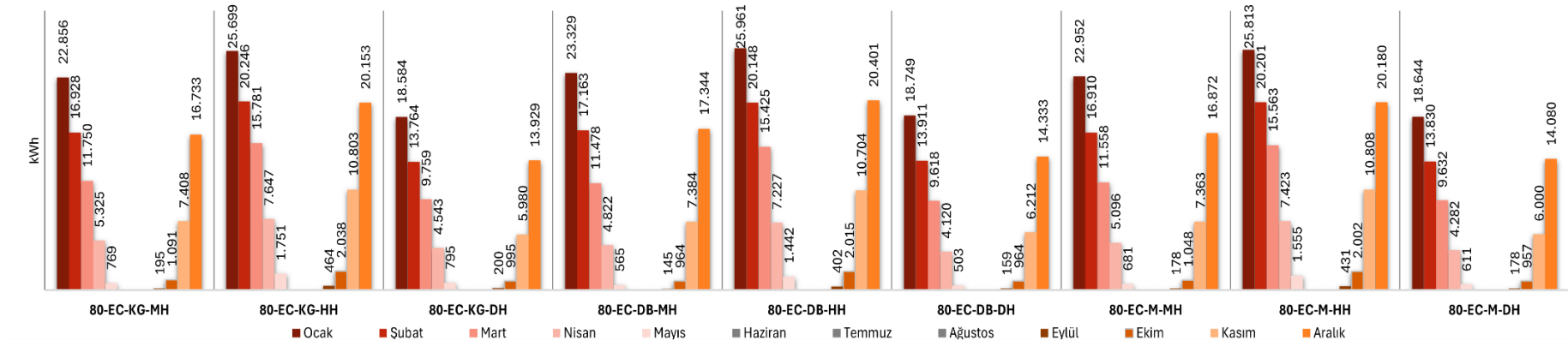


Şekil D.7: 80-LOW sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı.

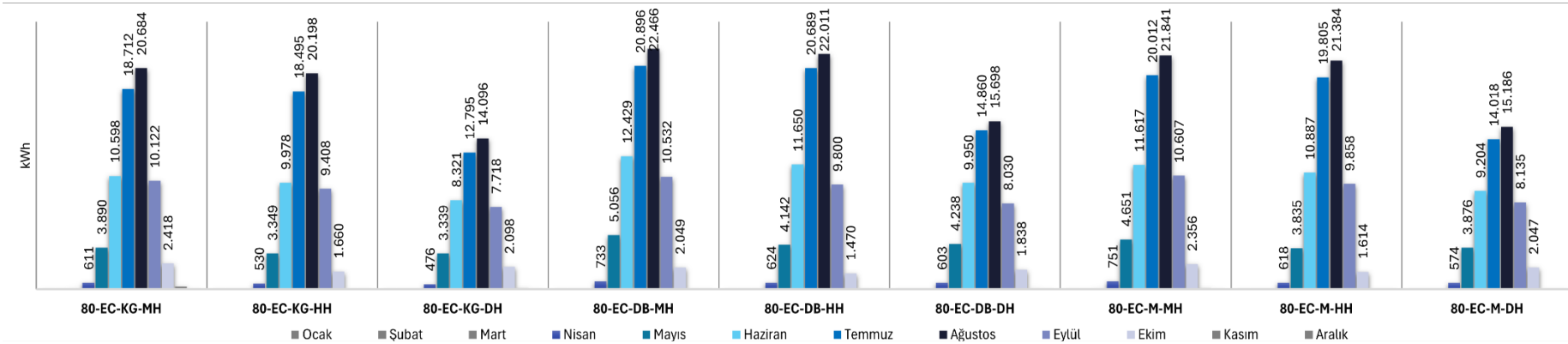


Şekil D.8: 80-LOW sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı.

EK E: 80-EC sabit parametresine sahip ÇKC kuruluşlarının enerji tüketimleri.

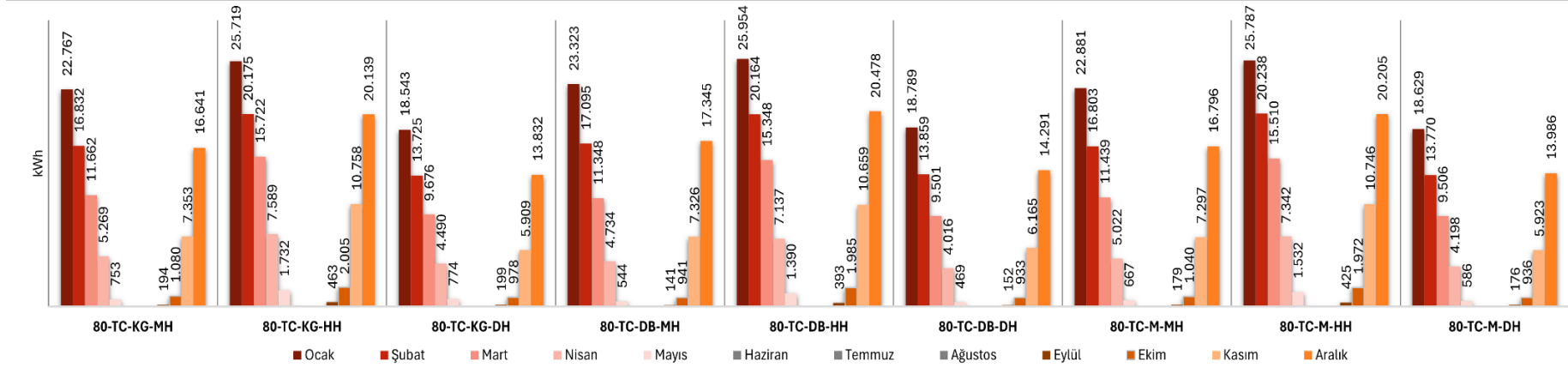


Şekil E.9: 80-EC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı.

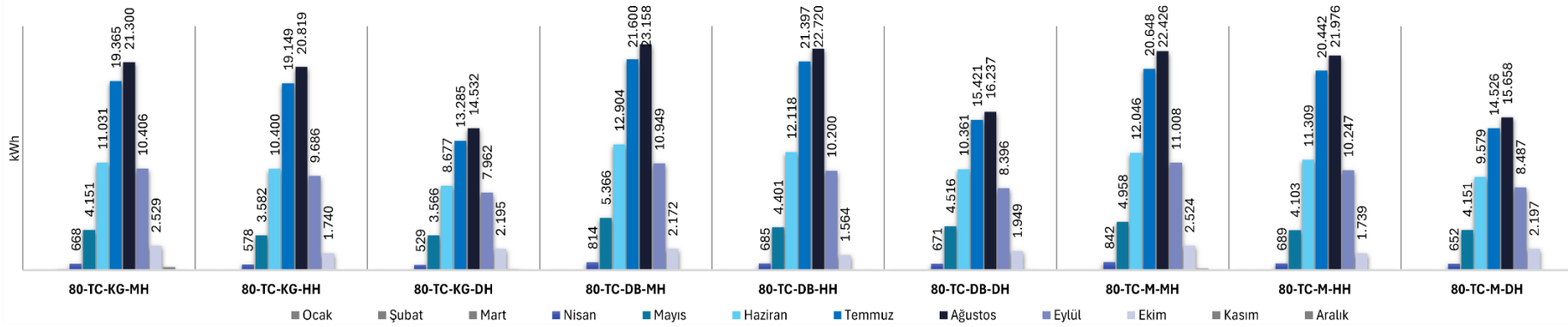


Şekil E.10: 80-EC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı.

EK F: 80-TC sabit parametresine sahip ÇKC kuruluşlarının enerji tüketimleri.

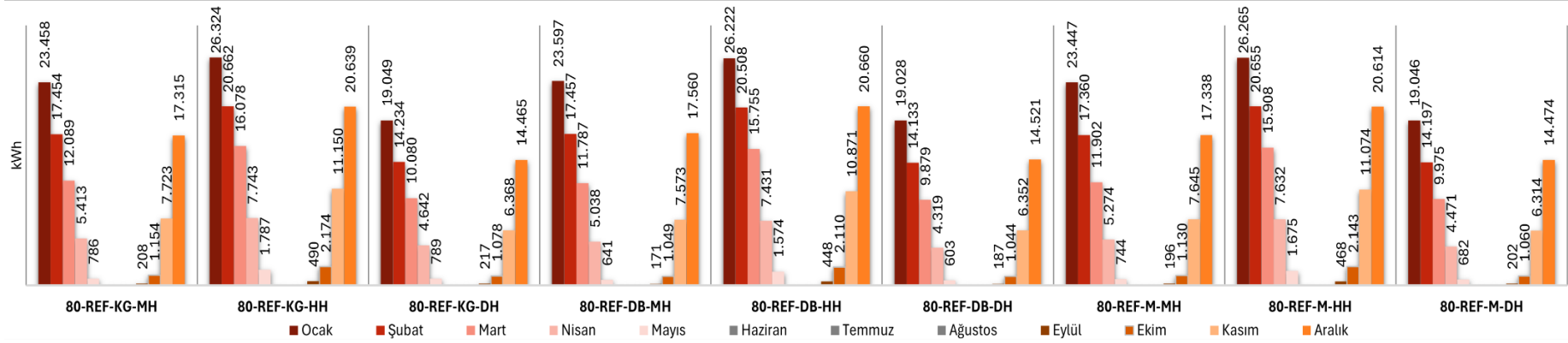


Şekil F.11: 80-TC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı.

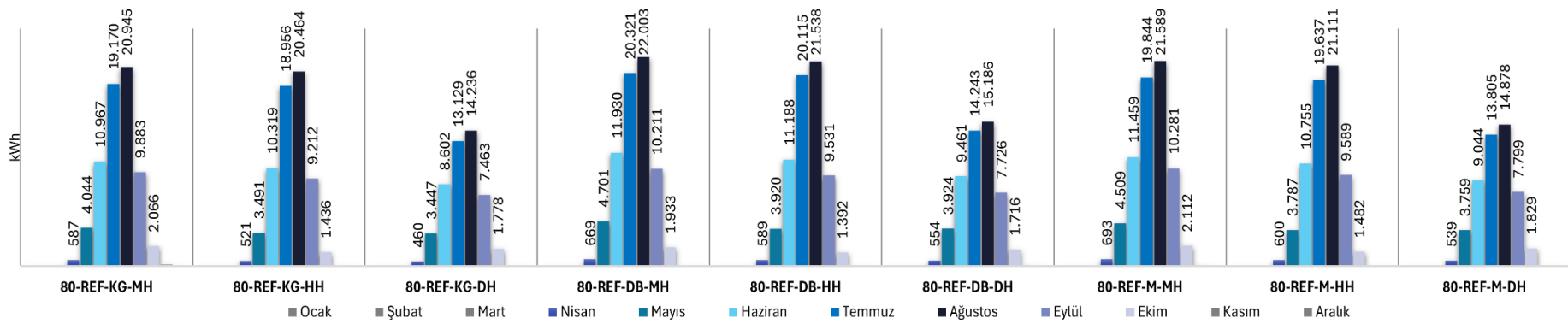


Şekil F.12: 80-TC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı.

EK G: 80-REF sabit parametresine sahip ÇKC kuruluşlarının enerji tüketimleri.

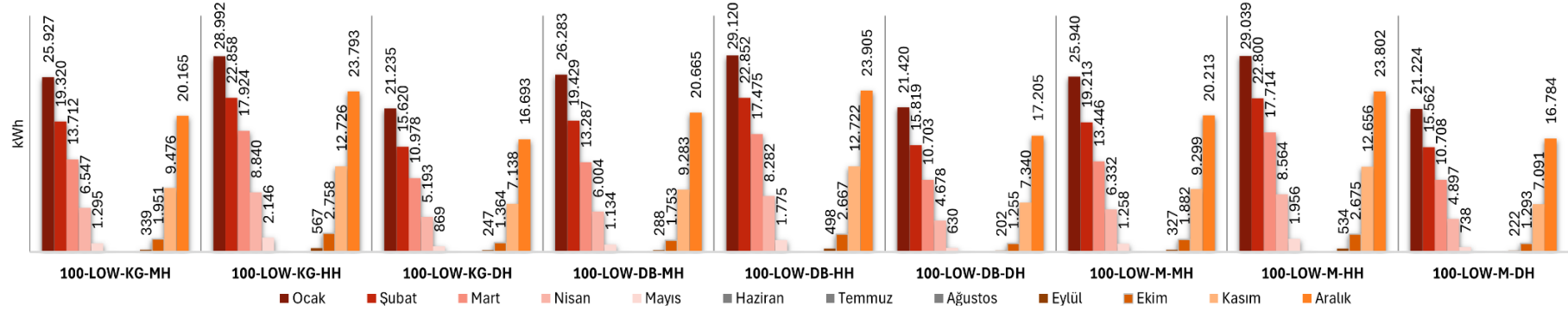


Şekil G.13: 80-REF sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı.

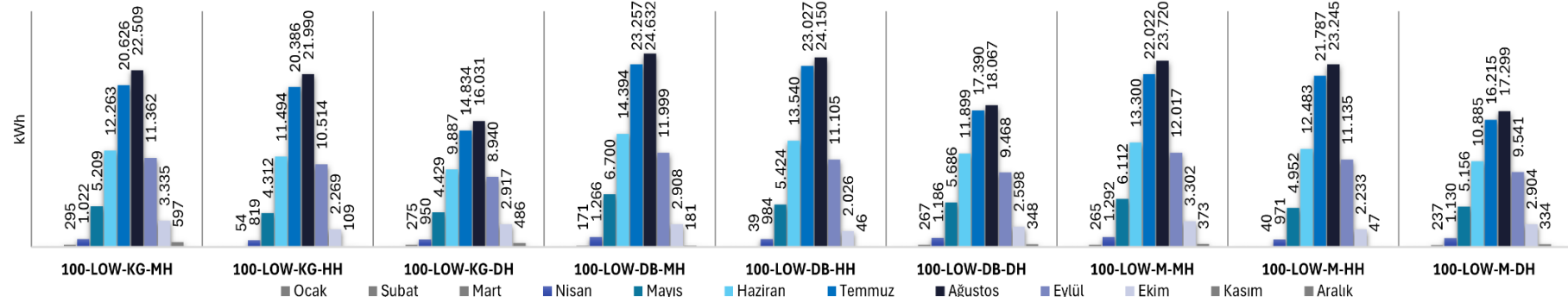


Şekil G.14: 80-REF sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı.

EK H: 100-LOW sabit parametresine sahip ÇKC kuruluşlarının enerji tüketimleri.

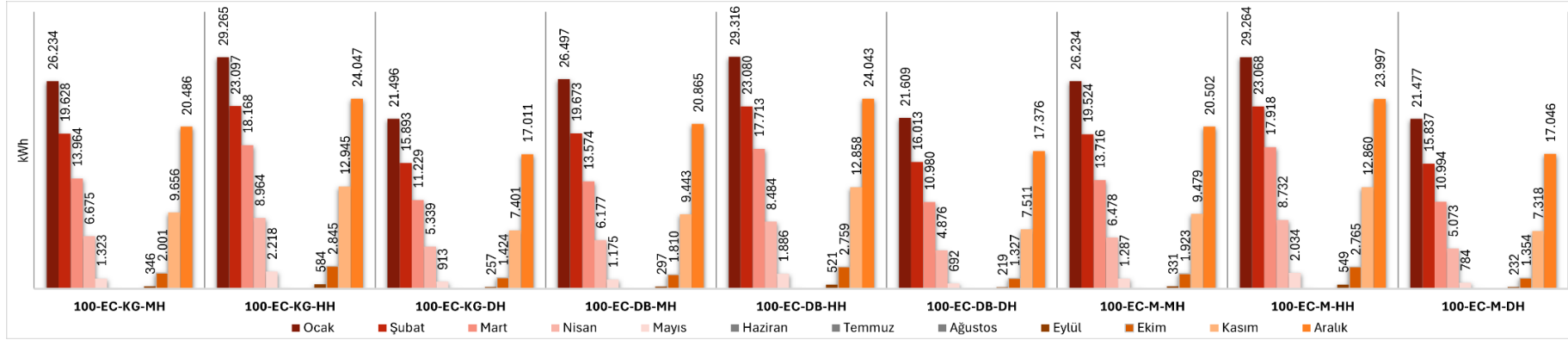


Şekil H.15: 100-LOW sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı.

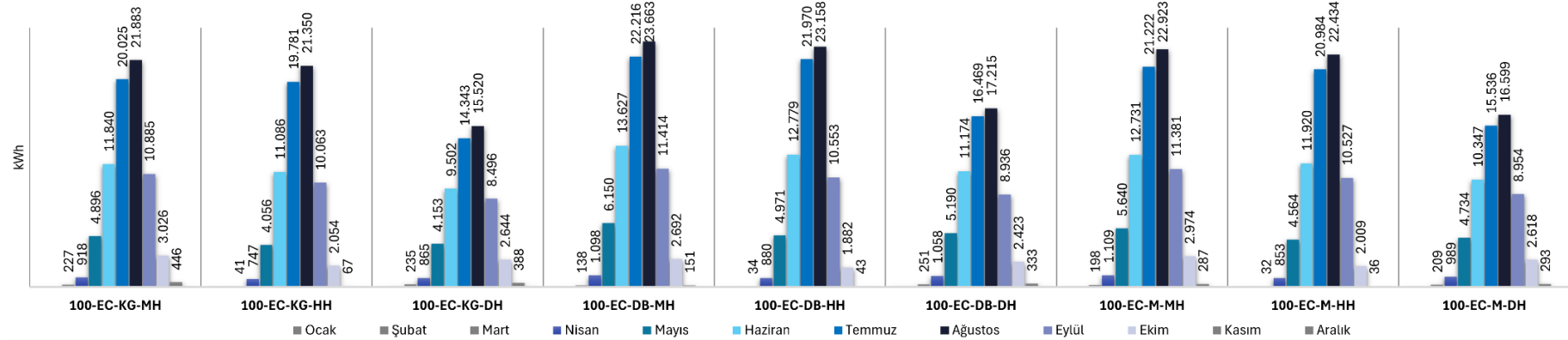


Şekil H.16: 100-LOW sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı.

EK J: 100-EC sabit parametresine sahip ÇKC kuruluşlarının enerji tüketimleri.

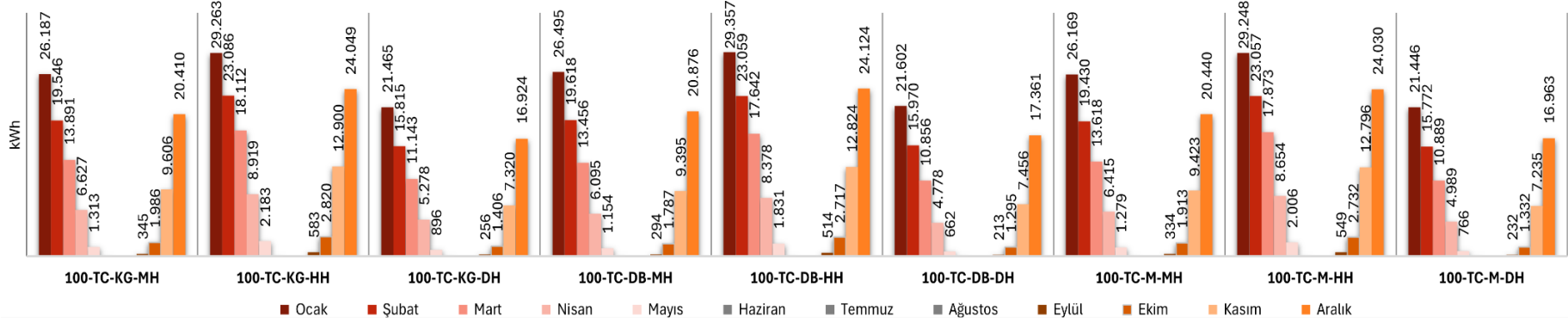


Şekil J.17: 100-EC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı.

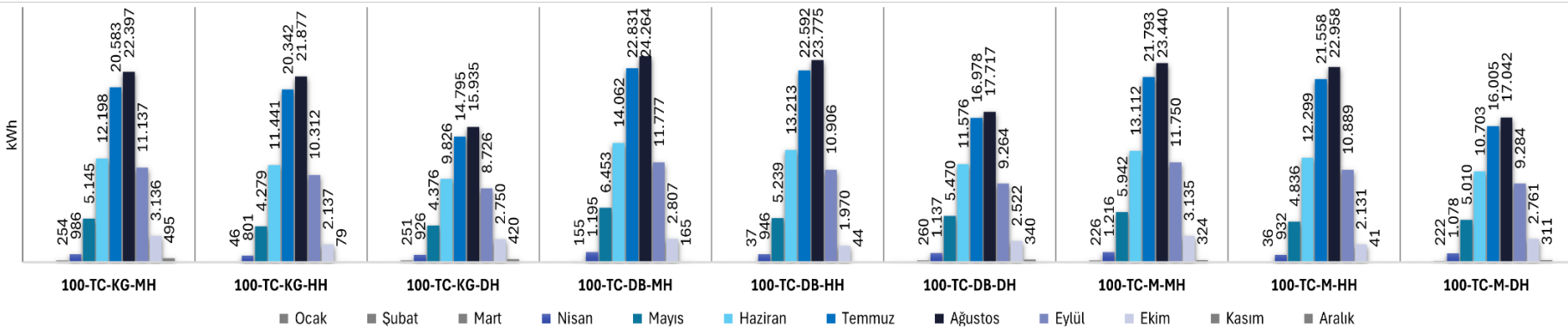


Şekil J.18: 100-EC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı.

EK K: 100-TC sabit parametresine sahip ÇKC kuruluşlarının enerji tüketimleri.

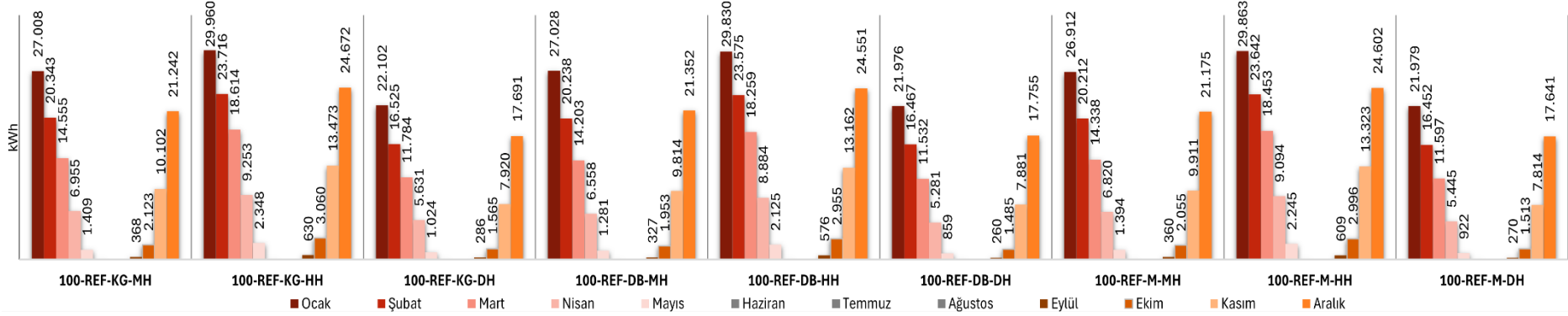


Şekil K.19: 100-TC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı.

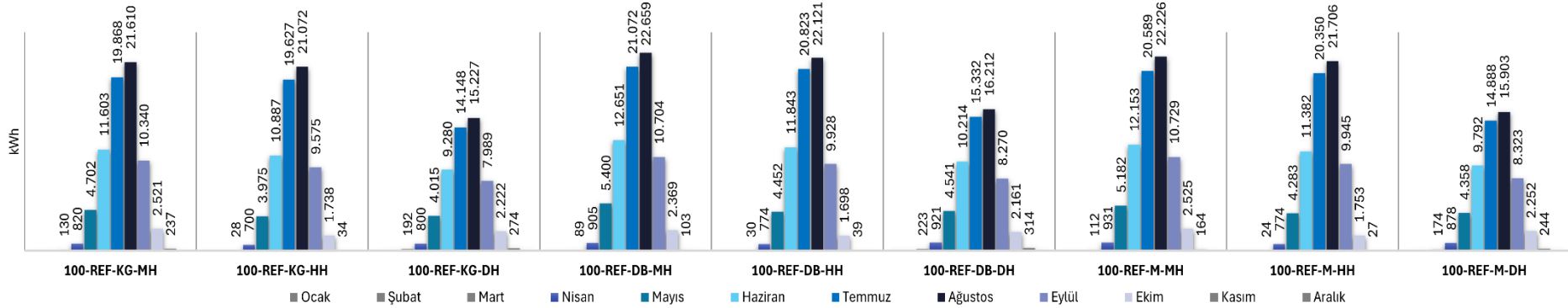


Şekil K.20: 100-TC sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı.

EK L: 100-REF sabit parametresine sahip ÇKC kuruluşlarının enerji tüketimleri.



Şekil L.21: 100-REF sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait ısıtma yüklerinin aylara göre dağılımı.



Şekil L.22: 100-REF sabit parametrelili 9 farklı ÇKC kuruluşuna ait soğutma yüklerinin aylara göre dağılımı.