

SICAK-NEMLİ İKLİMDE ÇİFT KABUK CEPHE ENERJİ PERFORMANSININ İNCELENMESİ (1)

Türkan GÖKSAL ÖZBALTA*, Yusuf YILDIZ**

Alındı: 19.05.2018; **Son Metin:** 30.01.2019

Anahtar Sözcükler: Çift kabuk cephe; cam tipi; bina enerji performansı.

1. Bu çalışma Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (Proje numarası 14-MÜH-025) tarafından desteklenmiştir.

GİRİŞ

Yapı sektörü enerji tüketiminde önemli bir paya sahiptir. Türkiye’de toplam enerjinin yaklaşık %20’si ulaşım, %43’ü endüstri ve %37’si binalarda kullanılmaktadır (Yılmaz, 2006). Dünyada sürekli artan enerji gereksinimine karşın fosil yakıtlar hızla tükenmekte ve atmosfere salınan emisyonlar sonucu küresel ısınma ve neden olduğu çevresel sorunlar giderek artmaktadır (Karaca ve Varol, 2012). Hızla artan enerji tüketimine bağlı olarak mevcut koşullar altında karbondioksit salımının 2050 yılında iki katına çıkması öngörülmektedir (International Energy Agency, 2014). İnşaat sektörü, dünya çapındaki enerji tüketimi, sera gazı salımı ve doğal kaynak kullanımının yaklaşık yarısından sorumludur (Dixit vd., 2012). Bu bağlamda yapı sektöründe sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının artırılmasının yanı sıra, yeni inşa edilen binaların enerji etkin tasarım parametreleri gözetilerek tasarlanması kaçınılmazdır. Ayrıca mevcut binalarda enerji tasarruf potansiyelinin değerlendirilerek, enerji etkin iyileştirme yöntemleri ile enerji performanslarının geliştirilmesi de bir diğer önemli konudur.

Bina kabuğunda ısı kayıp/kazançları, önemli ölçüde saydam yüzeylerden gerçekleşmektedir, dolayısı ile bina enerji tüketiminde ve iç ortam ısı konfor koşullarının sağlanmasında etkileri büyüktür. Çeşitli araştırmalar, toplam bina enerji tüketiminin yaklaşık %40’ından saydam yüzeylerin sorumlu olduğunu göstermektedir (Yin vd., 2012; Gao vd., 2012; Richter vd., 2008; Parkin ve Manning, 2006; Vakıloroaya vd., 2014). Bina enerji dengesinde oldukça yüksek bir paya sahip olan bina kabuğu kuruluşu ve cephe sistemleri, mimari kaygıların dışında, iklim koşullarına karşın bina içinde uygun fiziki ortam koşullarının sağlanmasında etkin rol oynar. İç ve dış ortam arasında ısı bariyer işlevini üstlenen bina kabuğunda enerji etkin iyileştirme yapılması, mevcut bina stokunun enerji performansının artırılmasında da etkili yöntemlerden biridir (Pomponi vd., 2015). Dolayısıyla mevcut binalar açısından enerji etkin cephe tasarımı oldukça

* Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ege University, İzmir, TURKEY

** Department of Architecture, Faculty of Architecture, Balıkesir University, Balıkesir, TURKEY

önemlidir. Bu doğrultuda enerji kayıplarını en aza indirmeyi ve enerjiden en üst düzeyde yararlanmayı amaçlayan gelişmiş bina kabuğu arayışı üzerine yapılan araştırmalar giderek artmaktadır. 1980'den bu yana, enerji tüketiminin artması ve çevre alanındaki yeni kavramlar çift kabuk cepheye doğru yönelişi beraberinde getirmiş, ekolojik ve sürdürülebilir mimarlık bağlamında bina kabuğuna fiziksel çevre etkilerinin kontrol edilmesi işlevini de eklemiştir (Ghasemi ve Ghasemi, 2017). Değişen fiziksel etkilere karşı direnç gösteren, kullanımı özellikle ofis binaları cephelerinde giderek yaygınlaşan çift kabuk cephe sistemleri, bina konfor koşullarının sağlanması ve enerji verimliliği kapsamında giderek yaygınlaşmaktadır.

Enerji etkin cephe tasarımında oldukça önemli olduğu görülen çift kabuk cephe sistemleri, uygulandıkları binalarda enerji tüketimi ve buna bağlı olarak karbon salımını azaltırken, kullanıldığı mekanlarda iç ortam konfor koşullarının iyileştirilmesine katkı sağlayan bina kabuğu teknolojisi olarak tanımlanmaktadır (Pomponi vd., 2016). Çift kabuk sistemler birbirinden hava boşluğu ile ayrılan ve genellikle iki cam yapı kabuğundan oluşmaktadır (Zhang vd., 2016). Enerji etkin iyileştirme yöntemi olarak çift kabuk cephe sistemi ise mevcut bina kabuğunun önüne ikinci cam cephenin eklenmesiyle oluşturulmaktadır. İki yapı kabuğu arasında tampon bölge işlevine sahip hava boşluğu, iklimsel değişikliklere karşı iç-dış ortam koşulları arasında denge kurarak, iç ortam konfor koşullarının sağlanmasına yardımcı olmaktadır.

Literatürde çift kabuk cephe sistemlerine ilişkin çeşitli çalışmalar bulunmaktadır; Ziyi vd. (2017) çalışmalarında doğal havalandırma sağlayan çift kabuk cephelerin yaygın olarak kullanılan bir teknoloji olmasına karşın ısı performansının henüz tam olarak anlayamadığını dile getirmektedir. Dolayısı ile çalışmalarında çift kabuk cephelerde ısı performans ve optimizasyon konusu ele alınmış ve önceki çalışmalarda ısı performans değerlendirmelerinin anlık veya standart günlere odaklanıldığı belirtilmiştir. Bu çalışmada, bir soğutma sezonu boyunca çift kabuk cepheden olan saatlik ve toplam ısı kazanımı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğine dayanan basitleştirilmiş bir yöntem ile hesaplanmıştır. Sonuç olarak soğutma döneminde toplam ısı kazancının farklı yapısal parametrelere dayandığı ve farklı iklim bölgeleri için optimize edilmiş parametrelerin kullanımının gerekliliğine dikkat çekilmiştir. Nazanin ve Majid (2015) çalışmalarında çift kabuk cephe sisteminin sadece şeffaf cephe olmasından dolayı değil aynı zamanda enerji tasarrufu sağlamasından dolayı genellikle ofis binalarında kullanılan bir uygulama olduğunu ifade etmişlerdir. Söz konusu çalışmada aşırı ısınmadan dolayı iç ve dış kabuk arasında yer alan boşluktaki hava hızının artışı incelenmiştir. Yaz aylarında hava boşluğunda sıcaklık arttıkça, kullanıcılar için iç mekanda olumsuz koşullar oluşabilmektedir. Bu nedenle, çift kabuk cephede hava çıkış hızını ve miktarını artırmak için kuzey cephede havalandırma kanalı düzenlenmesi önerilmektedir. Çift kabuk cephe uygulamasının pek çok avantajı olmasına karşın boşluktaki sıcak havanın sera etkisi yaratabileceğine dikkat çekilmektedir. Xue ve Li (2015) çalışmalarında soğutma sezonu opak duvardan sağlanan ısı kazancını çift kabuk cepheye göre %30 daha az, ısıtma sezonunda ise opak duvardan gerçekleşen ısı kaybının %89,1 oranı ile daha fazla olduğunu saptamıştır. Bu nedenle çift kabuk cephe kuruluşuna sahip binalar için yıllık enerji tüketiminin daha az olduğu vurgulanmakla birlikte, boşluktaki hava akım hızı, ısıtma/soğutma yükü, U-değeri, güneş kazanç faktörü vb. etmenlerin göz önünde bulundurularak tasarım yapılmasının gerekliliği dile getirilmektedir. Baldinelli (2009) çalışmasında çift kabuk cephe sistemlerindeki hava

akışını ve yapı enerji dengesini incelemiş, ısıtma/soğutma dönemindeki enerji performansına ilişkin optimizasyonun önemini vurgulamıştır. Ayrıca gölgeleme elemanlarının ısıtma/soğutma üzerindeki etkisi ele alınmış ve çift kabuk sistemler, geleneksel opak ve cam duvarlarla karşılaştırılmıştır. Mingotti vd. (2011) ise çalışmada çift kabuk cephe sistemlerinin olumlu ve olumsuz yönlerini ele alarak farklı dönem ve iklimlere göre optimize edilmiş havalandırma koşullarını irdelemiş ve bu tür sistemlerde olumsuzluk olarak görülen aşırı ısınma sorunlarına karşı alınabilecek önlemlere dikkat çekmiştir. Gratia ve De Herde (2007) çift kabuk cephelerin ses yalıtımı ve ısıtma döneminde enerji tasarrufu sağladığını belirtmişlerdir. Poirazis (2006) çalışmada hava akımı ve enerji simülasyonu dahil çift kabuk cephe modellemeleri sorunlarını ele almaktadır. Bina konumuna göre farklılık gösterebilen sistem tasarımının binanın enerji performansında etkili olduğu vurgulanmaktadır. Çalışmada çift kabuk cephelerin, iç mekân konforunda iyileşme sağladığı ve enerji kullanımını azaltır nitelikte olduğu belirtilerek, avantaj ve dezavantajları uygulanan çift kabuk cephe sistemi örnekleri üzerinden incelenmiştir. Özet olarak çift kabuk cephelerde amaç, mevcut cephenin önüne yalıtım amacı ile ikinci bir katmanın uygulanması sonucu tampon bölge yaratılmasıdır. Ana hatları ile yüzeylerin şeffaf olduğu ve yaratılan tampon bölge ile binada yalıtım sağlandığı, tampon bölgenin yönlenmeye bağlı olarak güneş ışınımından kazanç sağladığı, güneşe yönelmesi durumunda ise ışın ısıtma enerjisini desteklediği, ancak aşırı ısınma olmaması için de önlem alınması gerekliliğine dikkat çekilmektedir. Bir başka deyişle, çift kabuk cephe sistemleri soğuk iklimlerde ısıtma enerjisi talebini önemli ölçüde azaltmakla birlikte, sıcak iklimlerde iç mekanların aşırı ısınması nedeniyle soğutma amaçlı enerji tüketimini arttırabileceği sorununa vurgu yapılmaktadır (Zomorodian ve Tahsildoost, 2018). Kısacası malzeme/cam tipi seçimi ve sistem kurgusunun iklimsel koşullar ile oldukça ilgili olduğu görülmektedir. Dolayısı ile mevcut, kullanımda olan binalardan elde edilen deneysel veriler temel bilgi kaynağıdır. Ancak çift kabuk cephe uygulanmış binalarda yapılan ölçümler ve çift kabuk cephenin soğutma yükü üzerindeki olumsuzlukları ile ilgili çalışmalar sınırlı olup literatürde bu konuda yetersizlik olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışmada sıcak-nemli iklim koşullarının hakim olduğu İzmir ilinde bulunan bir üniversite binasında yer alan ofise uygulanan çift kabuk cephe sisteminin cam tipine bağlı olarak soğutma yükü üzerindeki etkisi deneysel olarak ve simülasyon modeli ile araştırılmıştır. Kış döneminde İzmir'de, iklimsel özellikler nedeni ile ısıtma yükleri göreceli olarak daha düşüktür. Bilindiği üzere farklı önlemlerle (güneş kırıcı, stor gibi) saydam yüzeylere ulaşan güneş ışınlarının engellenmesi olanaklıdır. Mimari anlamda güneş kırıcı kullanımının cephe karakterini önemli ölçüde etkilemesi nedeni ile tasarımda cephelerde bütünlüğü korumak adına genelde ülkemizde ilk tercih edilen bir önlem değildir; ayrıca maliyet açısından da uygulamalarda fazla yer bulamamaktadır. Cephelerde cam kullanımının giderek yaygınlaşması ve çeşitli termofiziksel özelliklere sahip camların kullanıma sunulması, farklı cam türlerinin enerji tüketimi üzerindeki etkisinin belirlenmesi konusunu daha önemli kılmaktadır. Bu nedenle, çalışmada çeşitli cam türleri ile çift kabuk cephe sisteminin yaz aylarında ofis mekanlarındaki soğutma yükü üzerindeki etkisinin belirlenmesine odaklanılmıştır. Böylece çift kabuk cephe sisteminde cam tipinin enerji yüküne olan etkisi, iklim koşullarına daha duyarlı cephe tasarımı ve cephe yenilenmesi açısından incelenmiştir.

ARAŞTIRMA YÖNTEMİ

Güneşin yörüngesine ve bulunulan konuma (enleme) bağlı olarak farklı yönlerdeki cephelere gelen güneş enerjisi miktarı değişmektedir (Mazria, 1979). Bu nedenle öncelikle simülasyon ile mevcut binanın tüm cephelerine ulaşan güneş ışınım miktarı hesaplanmış ve bilindiği üzere güney cepheye yıl boyunca ulaşan miktarının diğer yönlere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Araştırmada mevcut bir eğitim binasının güney cephesine 1/1 ölçekte uygulanan çift kabuk cephe deney düzeneği olarak kullanılmıştır. Ayrıca güney cephe özellikle sıcak-nemli iklim bölgesinde yer alan binalarda soğutma yükü açısından önemli rol oynar. Çalışmada sıcak-nemli iklime sahip İzmir İlinde bulunan üniversite binasının güney cephesinde farklı katlarda yer alan 2 ofis mekanı deneysel çalışma alanı olarak belirlenmiştir. 1/1 ölçek çift kabuk cephe uygulanan 2. katta yer alan ofis ve aynı cephede 1. katta yer alan mevcut referans mekandan sıcaklık ve nem değerlerine ilişkin ölçümler veri kaydediciler aracılığı ile toplanmıştır. Çift kabuk cephenin enerji performansı, farklı U-değeri ve güneş ısı kazanım katsayısı (SHGC) değerine sahip 6 farklı cam seçeneği için *Designbuilder* aracılığı ile hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

İzmir'in İklimsel Koşulları

Türkiye'nin batı kıyı şeridinde 38° 25' Kuzey Enlemi ve 27° 09' Doğu Boylamında yer alan İzmir İli, Köppen İklim Sınıfına göre C bölgesinde bulunmaktadır ve Akdeniz iklimi olarak bilinen kışı ılık, yazı sıcak ve kurak Csa sınıfı iklime sahiptir (Öztürk vd., 2017). İzmir iklimi, akademik çalışmalarda genellikle sıcak-nemli olarak da ifade edilmektedir (Sağlam ve Yılmaz, 2015). **Tablo 1**, aylık olarak İzmir iline ait farklı iklim verilerini göstermektedir.

Ortalama sıcaklıklar yıl boyunca 8,8°C ile 28°C arasında değişmektedir. 1936-2016 yılları arasında görülen en düşük sıcaklık -8,2°C iken en yüksek sıcaklık ise 42,6°C'dir. Bağıl nem ise %51,2 ile %71,7 arasında değişkenlik göstermektedir. İzmir'in güneşlenme potansiyeli yüksektir. Yüksek güneş radyasyonu seviyeleri nedeniyle, hava sıcaklığı öğle saatlerinde önemli ölçüde artmaktadır. Yaz dönemi, çoğunlukla sıcak ve nemlidir. Yaz aylarında ortalama maksimum, ortalama ve minimum sıcaklıklar sırasıyla 33,1°C, 28°C ve 19,7°C'dir. Son yıllarda, yaz aylarında maksimum

Tablo 1. İzmir iklim verileri (1938 - 2017)
(Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2018; İzmir İl Tarım ve Orman Müdürlüğü, 2018)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Ortalama Sıcaklık (°C)	8,7	9,5	11,6	15,8	20,7	25,5	28	27,6	23,6	18,7	14	10,4
Ortalama bağıl nem (%)	70,1	68,1	66,1	62,9	59,6	52,9	51,2	53,9	58	64	68,9	71,7
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	12,3	13,5	16,1	20,8	26	30,6	33,1	32,9	29,1	23,9	18,4	14
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	5,7	6,1	7,5	11	15,3	19,7	22,3	22,2	18,5	14,5	10,6	7,5
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	4,2	5,1	6,4	7,9	9,8	11,5	12,2	11,9	10,1	7,5	5,5	4,1
Ortalama Yağışlı Gün Sayısı	12,5	10,6	9,2	7,9	5,3	2,1	0,4	0,5	1,9	5,4	8,7	12,7
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)	133,2	101,8	76,4	45,9	31,2	9,9	1,7	2,9	13,7	43,8	93,1	143,4
En Yüksek Sıcaklık (°C)	22,4	27,0	30,5	32,5	37,6	41,3	42,6	43	40,1	36	30,3	25,2
En Düşük Sıcaklık (°C)	-8,2	-5,2	-3,8	0,6	4,3	9,5	15,4	11,5	10	3,6	-2,9	-4,7

sıcaklıklar genellikle 30°C'yi aşmaktadır. İzmir'de ortalama rüzgâr hızı 3,0 m/sn'dir. Bu güne kadar ölçülen maksimum rüzgâr hızı ise 151,9 km/saattir. İzmir'de hâkim rüzgâr yönü güney-güneydoğu, mevsimsel değişimlere bağlı olarak ikincil derece hâkim rüzgâr yönü ise batı-kuzeybatıdır.

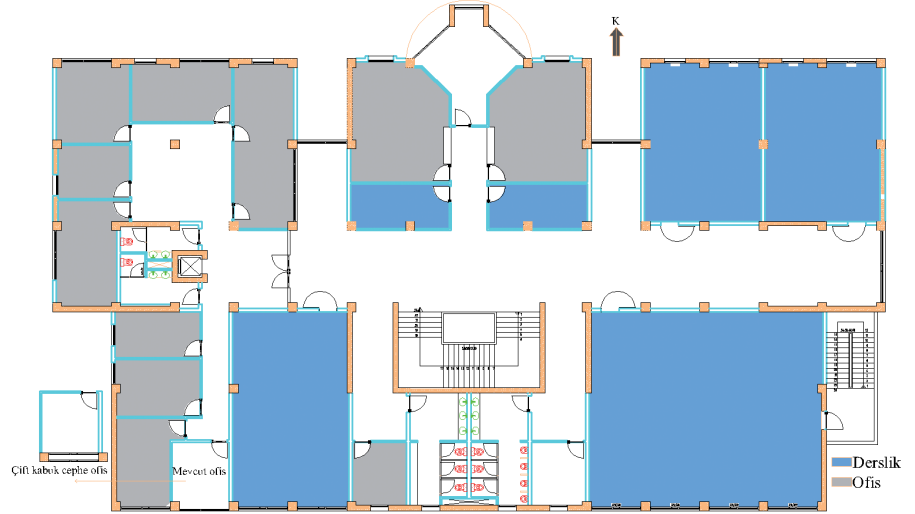
Bina Özellikleri

Çalışma Ege Üniversitesi Kampüsü'nde 2002–2003 yılları arasında inşa edilen İnşaat Mühendisliği Bölümü binasının 1. ve 2. katında bulunan öğretim elemanı ofislerinde gerçekleştirilmiştir. Doğu/Batı aksında konumlanan ve kompakt bir forma sahip olan bina 4 katlı ve dikdörtgen tabanlıdır; derslikler ve öğretim elemanı odaları binanın kuzey ve güney cephelerinde yer almaktadır. Binanın taban alanı yaklaşık 1.150 m², toplam hacmi ise 19.090 m³tür. Binayı oluşturan yapı bileşenlerinin incelenmesin durumunda (**Tablo 2**), taşıyıcı sistemin betonarme iskelet, dış duvarların büyük bir bölümünün ise 30 cm kalınlığında betonarme perde olduğu görülmektedir; perde duvarın toplam ısı geçirgenlik katsayısı (U-değeri) 2,85 W/m²K'dir. Dış duvarların bir bölümü ise 20 cm kalınlığında bimsblok

Dış duvar 1	Kalınlık (cm)	Isıl iletkenlik katsayısı (W/mK)
Sıva	2	0,87
Betonarme perde	30	2,1
Sıva	2	1,4
U_{D1} (W/m²K)		2,85
Dış duvar 2		
Sıva	2	0,87
Bimsblok	20	0,27
Sıva	2	1,4
U_{D2} (W/m²K)		1,05
Zemine oturan döşeme		
Betonarme döşeme	20	2,1
Çimento harçlı şap	4	1,4
Su yalıtımı	0,2	-
Çimento harçlı şap	3	1,4
Yapıştırma harcı	1,5	1,4
Kaplama malzemesi	1	2,3
U_Z (W/m²K)		2,90
Yürünebilen teras çatı		
Sıva	1,5	0,87
Betonarme döşeme	15	2,1
Çimento harçlı şap	4	1,4
Su yalıtımı	0,5	-
Buhar kesici	-	-
Çimento harçlı şap	3	1,4
XPS ısı yalıtımı	5	0,035
Çimento harçlı şap	2	1,4
Seramik kaplama	1,5	2,3
U_T (W/m²K)		0,45
Pencere	Kalınlık (mm)	U_p (W/m²K)
Alüminyum çerçeve	4-12-4	2,9

Tablo 2. Bina kabuğunu oluşturan yapı elemanlarının özellikleri

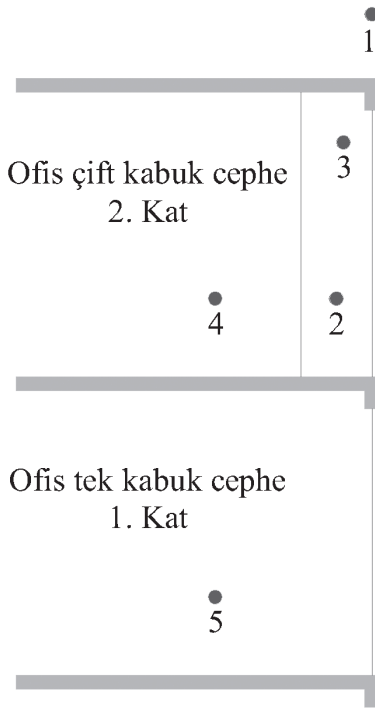
malzemeden inşa edilmiş olup, U-değeri $1,05 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'dir. İncelenen binada farklı malzemelerden oluşan dış duvarların U-değerleri, TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardına (Türk Standartları Enstitüsü, 2013) göre İzmir İlinin bulunduğu 1. Derece-Gün Bölgesi için önerilen değerden ($U=0,66 \text{ W/m}^2\text{K}$) oldukça yüksektir. Yapının diğer bileşenlerinden zemine oturan döşemenin U-değeri $2,90 \text{ W/m}^2\text{K}$ (önerilen $0,66 \text{ W/m}^2\text{K}$), yürünebilen teras çatının ise $0,45 \text{ W/m}^2\text{K}$ (önerilen $0,43 \text{ W/m}^2\text{K}$) olup standarda göre sınır değerlerin üstündedir. Binanın pencereleri yalıtımsız alüminyum doğramadan üretilmiş ve saydam yüzeylerde çift cam (4-12-4 mm) kullanılmıştır. Pencereler ortalama $2,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ toplam ısı geçirgenlik katsayısı değerine sahiptir; ancak TS 825'e göre sınır değer $1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'dir. Ayrıca pencerelerin güneş ısı kazanç katsayısı (SHGC) ise %78'dir. Binada toplam saydam yüzeyler, dış duvar alanının %29'unu oluşturmakla birlikte yönlere göre pencere/duvar alanı oranı değişkenlik göstermektedir. Güneş enerjisi kazancında cephelerin yön durumu saydam yüzeyler açısından önemli bir tasarım parametresidir. İncelenen binada kuzey cephede pencere/duvar alanı oranı %37,2, güney cephede %27,18, doğu cephede %12, batı cephede ise %12,4 oranına sahiptir. Alan çalışmasında incelenen ofis mekanına uygulanan (Resim 1) çift kabuk cephe kuruluşunda iki saydam kabuk arasındaki boşluk 40 cm, iç kabuk pencere doğramasının boyutları 240 cm x 270 cm'dir.



Resim1. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü normal kat planı



Resim 2. Çift kabuk cephe kuruluşu (plan, cephe ve iç görünüş)



Resim 3. Tek kabuk ve çift kabuk cepheli ofis mekanlarında ölçüm noktaları

Dış kabuk ise, alüminyum çerçeveli 4 mm kalınlığında tek camdan oluşmaktadır; ayrıca ara boşluğun havalandırılması için doğramada çapraz konumlandırılmış 119 cm x 57 cm boyutlarında 2 adet menfez bulunmaktadır (**Resim 2**). Tek cam pencerenin U-değeri ortalama 5,8 W/m²K, güneş ısı kazanç katsayısı ise %87'dir. Deneysel çalışmaları yapıldığı ofis mekanı 10,39 m² taban alanına sahiptir, mekanın hacmi ise 41,58 m³tür. Binada ısıtma ve soğutma amaçlı olarak merkezi sistem fan coil kullanılmaktadır.

Verilerin Toplanması

Deneysel çalışmada simülasyon için dış ortam, iç ortam (çift cepheli ofis-2. Kat ve referans ofis-1. Kat) ve çift kabuk cephe ara boşluk sıcaklık/nem değerleri 26 Mayıs-7 Eylül 2016 tarihleri arasında yapılan ölçümler ile toplanmıştır. Ölçüm yapılan her iki ofis aynı özelliklere sahiptir, aynı cephede yer alır, aynı büyüklüğe sahiptir, ancak farklı katlarda bulunur. Dış ortam ölçümleri bina çatısında yer alan, zeminden yaklaşık 18,5 m yüksekliğe yerleştirilen DAVIS Vantage PRO2 (1) meteoroloji istasyonundan elde edilmiştir. İç mekanlar ve çift kabuk cephe ara boşluk sıcaklık ve nem değerleri ise 4 adet Onset HOBO Data Logger kullanılarak ölçülmüştür; (sıcaklık:doğruluk $\pm 0,21^{\circ}\text{C}$, çözünürlük $0,024^{\circ}\text{C}$ ve bağıl nem: doğruluk $\pm 3,5$, çözünürlük $0,07$). Veri kaydediciler çift kabuk cephe arasındaki boşlukta iki farklı noktada (2 ve 3), çift kabuk cepheli ofis (4) ve tek kabuk cepheli ofis (5) olmak üzere 4 farklı noktaya konumlandırılmıştır (**Resim 3**). Ölçümler 10 dakika aralıklarla kaydedilmiştir. Ölçümlerin yapıldığı zaman aralığında ofisler mümkün olduğunca kullanılmamış ve bu nedenle pencereler çoğunlukla kapalı tutulmuştur. Böylece önemli bir iç ısı kazancı oluşmamıştır. Bir binanın ya da mekanın kullanılmadığı zamanlarda izlenmesi, sonuçların kullanıcı davranışının öngörülemez tüm etkilerinden soyutlanmasını sağlamaktadır. Bu durumda sonuçlar, sadece iklim ve bina özelliklerinden etkilenmektedir.

Simülasyon Modelinin Oluşturulması ve Doğrulanması

Çift kabuk cephenin soğutma yüküne etkisi, enerji simülasyon programı *Designbuilder* kullanılarak incelenmiştir. *Designbuilder*, bina enerji performansı analizlerinde yaygın olarak kullanılan bir programdır ve hesaplama aracı olarak *EnergyPlus* programını kullanmaktadır. Bu nedenle *EnergyPlus*'in matematiksel algoritması, simülasyonun temelini oluşturmaktadır (EnergyPlus, 2012). Öncelikle, İnşaat Mühendisliği binasının mevcut özelliklerine uygun olarak *DesignBuilder* programında üç boyutlu ısı modeli oluşturulmuştur. Simülasyon süresini kısaltmak için eğitim binasında aynı özelliklere sahip mekanlar gruplandırılarak, ısı bölgeleri tanımlanmıştır. Isıl bölgeleme oluşturulurken aynı yönlere, ısıtma ve soğutma gereksinimi benzer, aynı kullanım amacına sahip mekanlar tek bir ısı bölge olarak modellenmiştir. Binanın enerji tüketim değerlerini etkileyen tüm parametreler (malzemelerin termofiziksel özellikleri, ısıtma/soğutma sistemi, bina kullanım özellikleri, vb.) model içinde aslına uygun olarak tanımlanmış ve hesaplamalar İzmir ili için var olan tipik iklim verileri (TMY2) kullanılarak yapılmıştır. TMY bina enerji analiz programlarında sıkça kullanılan iklim verilerinden biri olup, yıl bazında saatlik iklim verilerinden oluşmaktadır. Mevcut durum için oluşturulan model aynı zamanda referans modeldir. Bu modelden elde edilen sonuçlar, diğer tüm senaryoların karşılaştırılması için kullanılmıştır.

İncelenen eğitim binasında ısıtma/soğutma için fan-coil sistemi mevcuttur. Bina modelinde, soğutma termostat değeri 25°C olarak belirlenmiş ve

binanın yaz aylarındaki soğutma yükü incelenmiştir. İnşaat Mühendisliği Bölümü Binasında ağırlıklı olarak derslikler ve öğretim elemanları odaları bulunmaktadır. Yaz okulu nedeni ile yaz döneminde eğitim/öğretim devam etmektedir. Bunun dışında hafta sonlarında gerçekleştirilen sınavlar (ÖSYM, açık öğretim, gibi) sebebi ile binada ısıtma/soğutma sistemi çoğunlukla aktif durumdadır. Sınav süreleri ve mekanların kullanımları da değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle yaz döneminde bina enerji performansının bütüncül değerlendirilebilmesi için yıl boyunca, hafta sonu dahil olmak üzere mekanlarda soğutma gereksiniminin gün içinde 8.00-18.00 saatleri arasında olduğu kabul edilmiştir. İstenmeyen hava kaçak değeri olarak ise mevcut yapı kalitesi gözlemlenerek 1 ach değeri kullanılmıştır. Yaz dönemi olması sebebiyle aydınlatmanın her gün koridorlarda 3 saat açık olacağı, geri kalanında ise gün ışığının yeterli olduğu düşünülmektedir. Mevcut aydınlatmanın ortalama 13 W/m² enerji tükettiği kabul edilmiştir. En çok kullanılan cihazlar genellikle bilgisayarlar olup ortalama 120 W enerji tükettikleri kabul edilmiştir (Autodesk Knowledge Network, 2018).

Simülasyon programları ile hesaplama yapmanın en önemli noktalarından biri modelin güvenilirliğidir. Simülasyonun, modelin performansı hakkında en doğru ve en güvenilir sonuçları verdiğiinden emin olmak gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan simülasyon modelinin, gerçek durumu ne kadar iyi temsil ettiği ortalama sapma hatası (MBE) ve varyasyon katsayısının kök ortalama karesel hatası (CV(RMSE)) değerleri ile tespit edilmiştir. Bu iki değer ölçüm ve simülasyon sonuçları (tek ve çift kabuk cephe ofis iç ortam sıcaklıkları) kullanılarak hesaplanmıştır (Royapoor ve Roskilly, 2015).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} (M_i - S_i)}{\frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} M_i} \quad (1)$$

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_i} [(M_i - S_i)]^2}{N_i}}}{\frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} M_i} \quad (2)$$

M_i ve S_i ölçüm ve simülasyon sonucu elde edilen değerlerdir. N_i ise hesaplamada kullanılan değerlerin sayısıdır.

ASHRAE Guide 14 (2002)'e göre, saatlik MBE değerleri ±%10 aralığında ve saatlik CV(RMSE) değerleri %30'un altında ise, simülasyon modelinden elde edilen sonuçlar kullanılabilir. Bu analizin sonuçları **Tablo 3'**te verilmiştir. MBE ve CV(RMSE) değerlerine bakıldığında hepsinin sınır değerlerin altında olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, simülasyon modelinin gerçek durumun iyi bir temsili olduğu, tek ve çift kabuk cephenin enerji performansını tahmin etmede güvenilir ve kullanılabilir olduğu anlamına gelmektedir. Ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçlarının bire bir örtüşmesi mümkün değildir; çünkü ölçüm aletlerinin doğruluğu ve hassasiyeti, programın hesaplama algoritması, binada kullanılan malzeme kuruluşları ve değerleri, simülasyonda kullanılan iklim verileri ve kullanıcı davranışından kaynaklı belirsizlikler her zaman olabilmektedir. Ancak bu belirsizliklerin, yüksek hassasiyete sahip ölçüm aletlerinin kullanımı, güvenilir simülasyon programlarının tercih edilmesi, kullanılan malzemelerin gerçeğe yakın tespiti, gerçek iklim verilerinin kullanımı ve kullanıcı davranışlarının olabildiğince programa tanıtılması ile en aza indirilebilmesi mümkündür.

	MBE (%)	CV(RMSE) (%)
Tek kabuk cephe ofis iç ortam sıcaklıkları	4,74	14,6
Çift kabuk cephe ofis iç ortam sıcaklıkları	7,9	18,8
Çift kabuk cephe arası alt ve üst boşluk sıcaklık ortalamaları	9,1	28,9

Tablo 3. MBE ve CV(RMSE) değerleri

Simülasyon Senaryoları

Tek ve çift kabuk cephe kuruluşuna sahip ofislerin mevcut durumlarının modellenmesinden sonra çeşitli cam tipi seçeneklerine göre modellemeler yapılmıştır. Esas amaç, çift kabuk cephe uygulamasında iç ve dış kabukta kullanılan camların soğutma amaçlı enerji performansına olan etkisinin değerlendirilmesidir. Mevcut durumun simülasyonundan elde edilen sonuçlar, diğer tüm senaryoları karşılaştırmak için kullanılmıştır. Sadece çift kabuk cephe kuruluşundaki iç ve dış cam özellikleri değiştirilerek, cephenin soğutma amaçlı enerji performansı üzerindeki etkisinin diğer değişkenlerden etkilenmeden analiz edilmesi mümkün olmaktadır. Seçilen cam malzemelerin optik ve termofiziksel özellikleri **Tablo 4'**te verilmiştir. Camların performans değerleri Şişecam performans hesaplayıcı kullanılarak elde edilmiştir (Şişecam Performans Hesaplayıcı, 2018).

BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Ölçüm Sonuçlarının Analizi

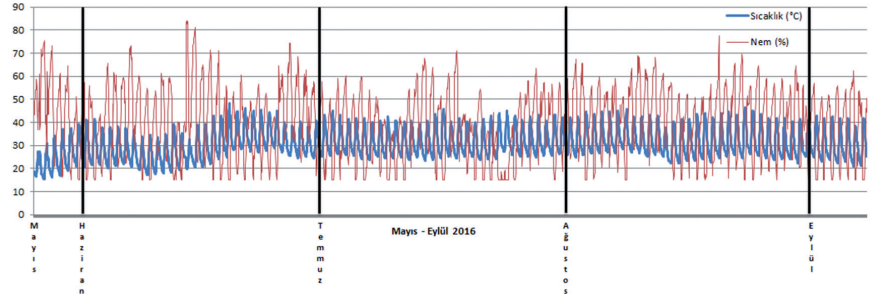
Dış Sıcaklık ve Bağıl Nem Değerleri için Detaylı Sonuçlar

Resim 4, 26 Mayıs ile 7 Eylül 2016 tarihleri arasındaki İzmir saatlik dış ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Bu zaman aralığında, genellikle yaz döneminin en sıcak günleri yaşanmaktadır. Bu dönemde dış hava sıcaklığı 15,5°C ile 45,4°C arasında değişmekte olup ortalama 30,9°C'dir.

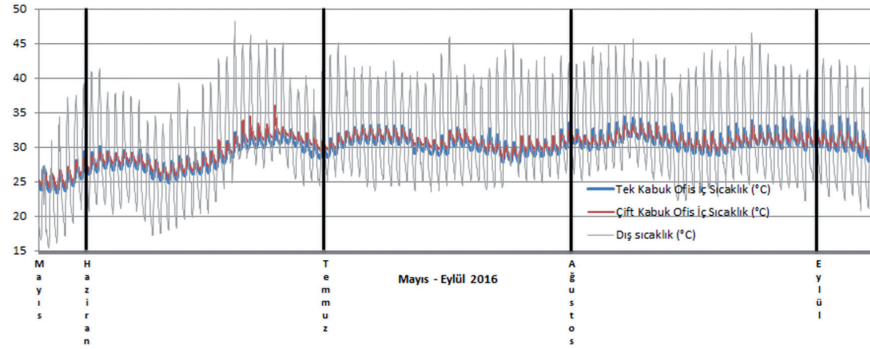
Senaryo	Tanım	Gün ışığı geçirgenliği (%)	U-değeri (W/m ² K)	SHGC (%)
Mevcut dış cam	Düzcama 4mm renksiz	90	5,8	87
Mevcut iç cam	Düzcama 4-12-4mm renksiz	82	2,9	78
S1	Düzcama Mavi 6mm	56	5,7	55
S2	Tentesol Mavi 6 mm	23	5,7	38
S3	Tentesol Mavi Titanyum 6 mm	39	5,7	45
S4	Düzcama Mavi 6-13-6mm	20	2,8	44
S5	Solar Low-E Cam 6-13-6mm	70	1,5	42
S6	Tentesol Mavi 6-13-6mm	21	2,8	27

Tablo 4. Camların optik ve termofiziksel özellikleri

Resim 4. İzmir dış sıcaklık ve bağıl nem değerleri (26 Mayıs-7 Eylül 2016)



Resim 5. Çift ve tek kabuk cephe kuruluşuna sahip ofis iç ortam hava sıcaklık değerleri (26 Mayıs-7 Eylül 2016)



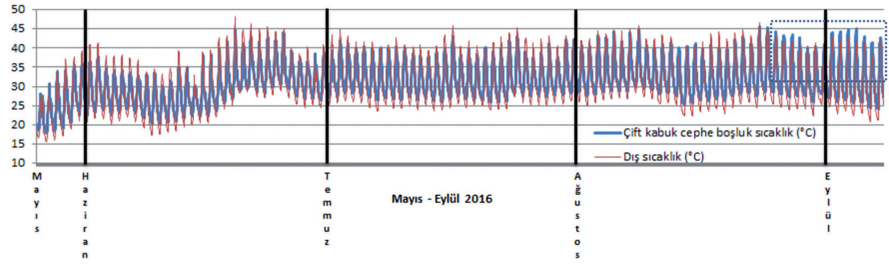
Maksimum sıcaklıklar ölçüm periyodunun %28,5'inde 35°C'yi geçerken, en düşük sıcaklık 27 Mayıs günü sabahın erken saatlerinde 15,5°C olarak ölçülmüştür. Bağıl nem değerleri %15 ile %84,2 arasında değişkenlik göstermektedir. Ortalama değer ise %39,3'tür. 30 Mayıs günü saat 14:00'da kaydedilen minimum bağıl nem değeri %15'tir. En yüksek bağıl nem değeri ise 6 Haziran 2016 saat sabah 6:00'da ölçülmüştür.

Ofislerin Isıl Davranışları

Tek ve çift kabuk cephe kuruluşuna sahip güneye yönelik ofislerde ölçülen iç ortam hava sıcaklıkları **Resim 5**'te yer almaktadır.

Ofislerdeki iç hava sıcaklıkları, klima veya gece havalandırması olmadığı halde ve dış hava sıcaklığının 40°C'nin üzerinde olduğu zamanlarda bile çoğunlukla 35°C'yi geçmemektedir. Tek kabuk kuruluşuna sahip ofiste kaydedilen en düşük sıcaklık 23,4°C, en yüksek değer ise 34,4°C'dir. Ortalama sıcaklık ise 29,9°C'dir. Çift kabuk cephe kuruluşuna sahip ofiste kaydedilen en düşük sıcaklık 24,1°C iken en yüksek sıcaklık 36°C, ortalama sıcaklık ise 30,2°C'dir. Maksimum sıcaklık değerleri genellikle 12:00 ile 16:00 saatleri arasında gerçekleşmiştir. Aynı şekilde çift kabuk cephe boşluğundaki hava sıcaklığı da benzer zamanlarda maksimum değere ulaşmaktadır. Anılan zaman aralığında güney cephe yüksek miktarda güneş radyasyonuna maruz kalmaktadır. Tek kabuk cepheye göre çift kabuk cepheye sahip ofisteki iç sıcaklık değerleri bazı zaman aralıklarında biraz daha yüksek seyretmiştir. Bunun olası sebebi çift kabuk cephenin ısının dışarıya atılmasında ilave bariyer etkisi yapması şeklinde yorumlanabilir. Gece saatlerinde iç sıcaklıkların çok fazla düşmediği görülmektedir, bunun nedeni de gece-gündüz sıcaklık farklılıklarının iklimsel özellik nedeni ile fazla olmamasına bağlı olarak ısı transferinin düşük düzeylerde kalmasıdır. Tek kabuk cepheye sahip ofis iç sıcaklıkları, ölçüm zaman aralığındaki saatlerin %26,9'unda çift kabuk cepheye oranla daha yüksektir. Tek kabuk cepheye sahip ofis iç sıcaklıkları, çalışma saatlerinin

Resim 6. Çift kabuk cephe, boşluk sıcaklık değerleri. Dikdörtgen, boşluk sıcaklığının dış sıcaklığı aştığı zaman aralığını ifade etmektedir.



(08:00-18:00) %49'unda çift kabuk cephe ofis sıcaklıklarından daha yüksektir.

Çift Kabuk Cephe Boşluk Isıl Davranışı

Mevcut durumdaki çift kabuk cephe ara boşluk sıcaklığı ile birlikte dış hava sıcaklığı **Resim 6**'da yer almaktadır. Çift kabuk cephe ara boşluk sıcaklığı ölçüm noktası 2 ve 3 verilerinin aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. 2 ve 3 noktasındaki ölçüm değerleri arasında yaklaşık $0,4^{\circ}\text{C}$ farklılık bulunmaktadır. Boşluktaki hava sıcaklık değerleri çoğunlukla dış ortam sıcaklık değerleri ile paralellik göstermektedir. Dış hava ile ara boşluk hava sıcaklığı arasındaki en yüksek fark, yaklaşık $2,8^{\circ}\text{C}$ seviyesindedir. Eylül ayında ise bazı zamanlarda ara boşluk sıcaklığının dış hava sıcaklık değerlerini aştığı görülmektedir. Özellikle gece boyunca, çift kabuk cephenin sebep olduğu sera etkisi (Larsen vd., 2015) nedeniyle boşluktaki hava sıcaklığı, dış ortam hava sıcaklığına göre ortalama $1,4^{\circ}\text{C}$ daha yüksek düzeydedir. Bunun bir diğer nedeni olarak dış kabuktaki camın güneş enerjisi toplam geçirgenliğinin %87 gibi çok yüksek değere sahip olması gösterilebilir; ayrıca bu noktada ara boşluktaki sıcak havanın dışarı atılmasının gerekliliği de ortaya çıkmaktadır.

Simülasyon Sonuçlarının Analizi

Çift kabuk cephenin iç ve dış katmanları için seçilen 6 farklı cam tipinin soğutma amaçlı enerji performansına etkisi *Designbuilder* simülasyon programı kullanılarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar **Tablo 5**'te özetlenmiştir. Mevcut durumdaki sonuçlara bakıldığında yaz döneminde çift kabuk cephe uygulanmış ofisin soğutma yükü, tek kabuk cephe kuruluşuna sahip ofise kıyasla %20 daha fazladır. Ofise çift kabuk cephe uygulanması, soğutma yükünü arttırmıştır. Bunun en önemli sebebi olarak çift kabuk cephede kullanılan dış katmandaki tek camın güneş enerjisi toplam geçirgenliğinin çok yüksek olması gösterilebilir. Dış katmandaki camın direkt güneş ışınımına karşı direnci çok azdır. Aynı zamanda çift kabuk cephe iç camın U-değeri $2,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'dir. Bu içeride biriken ısının dışarıya atılmasını da güçleştirmektedir. Bu sonuçlar çift kabuk cephe uygulanan ofisteki iç sıcaklık ölçüm değerlerinin zaman zaman tek kabuk cepheye sahip ofis iç sıcaklıklarından daha yüksek olmasıyla da örtüşmektedir.

Çift kabuk cephe kuruluşunda dış cam tipinin değiştirilmesi sonucu farklı soğutma yükleri elde edilmiştir. Mevcut 4mm renksiz cam, 6mm'lik mavi tek cam (S1) ile değiştirildiğinde çift kabuk cepheli ofiste, tek kabuk cephe kuruluşuna sahip ofisin soğutma yükünden %7,1 daha az soğutma yükü hesaplanmıştır. İki camın termofiziksel özelliklerine bakıldığında U-değerlerinin birbirine çok yakın olduğu anlaşılmaktadır. 6mm'lik mavi tek camın güneş ısı kazanı katsayısı değeri ise 4mm renksiz cama göre %36,7 daha azdır. Daha düşük bir soğutma yükü talebine yol açan durum,

Senaryo	Soğutma yükü Dış cam sabit İç cam değişken	Değişim Oranı	Soğutma yükü İç cam sabit Dış cam değişken	Değişim Oranı
M-Tek kabuk cephe ofis (Referans değer)	442,69 kWh Dış cam: U: 5,8W/m ² K, SHGC=%87		442,69 kWh Dış cam: U: 5,8W/m ² K, SHGC=%87	-
M-Çift kabuk cephe ofis	534,74kWh Dış cam: U: 5,8W/m ² K, SHGC=%87 İç cam: U: 2,9W/m ² K, SHGC=%78	(%20)	534,74kWh Dış cam: U: 5,8W/m ² K, SHGC=%87 İç cam: U: 2,9W/m ² K, SHGC=%78	(%20)
S1	478,65kWh Dış cam sabit İç cam: U: 5,7W/m ² K, SHGC=%55	+%8,1	410,91kWh İç cam sabit Dış cam: U: 5,7W/m ² K, SHGC=%55	- %7,1
S2	449,19kWh Dış cam sabit İç cam: U: 5,7W/m ² K, SHGC=%38	+%1,4	331,58kWh İç cam sabit Dış cam: U: 5,7W/m ² K, SHGC=%38	-%25
S3	475,13kWh Dış cam sabit İç cam: U: 5,7W/m ² K, SHGC=%45	+%7,4	354,95kWh İç cam sabit Dış cam: U: 5,7W/m ² K, SHGC=%45	-%19,8
S4	424,35kWh Dış cam sabit İç cam: U: 2,8W/m ² K, SHGC=%44	-%4,1	359,47kWh İç cam sabit Dış cam: U: 2,8W/m ² K, SHGC=%44	-%18,7
S5	420,95kWh Dış cam sabit İç cam: U: 1,5W/m ² K, SHGC=%42	-%4,9	364,51kWh İç cam sabit Dış cam: U: 1,5W/m ² K, SHGC=%42	-%17,6
S6	382,42kWh (Dış cam sabit İç cam: U: 2,8W/m ² K, SHGC=%27	-%13,6	307,80kWh İç cam sabit Dış cam: U: 2,8W/m ² K, SHGC=%27	-%30,4

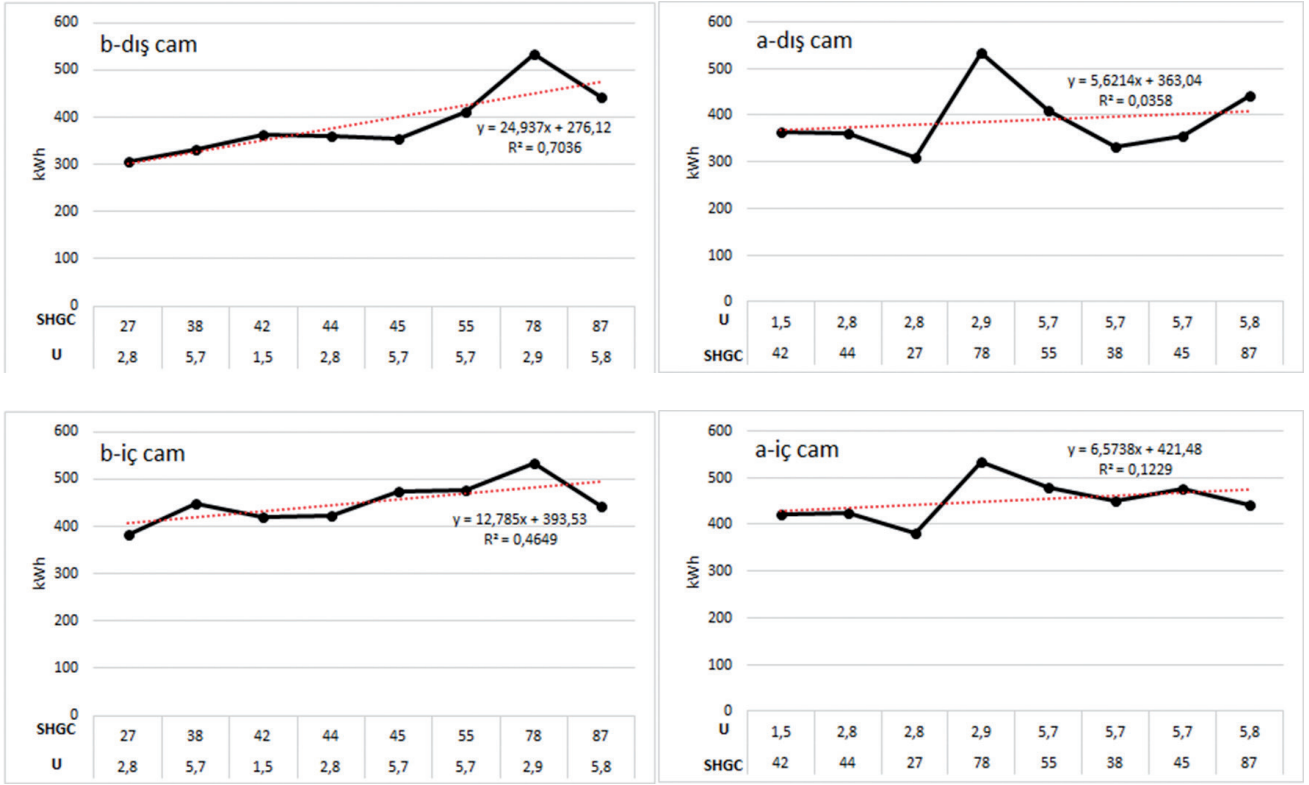
Tablo 5. Çift kabuk cephe iç ve dış katman cam tipinin soğutma yüküne etkisi

direkt güneş ışınımının daha az miktarda çift cephe kabuk ara boşluğuna ulaşmasıdır. Dış kabuk camda yansıtıcı özelliği de olan Tentesol Mavi 6 mm tek cam (S2) kullanılması durumunda ise soğutma yükü tek kabuk cephe ofise göre %25 daha az bulunmuştur. S1 senaryosu ile benzer durum söz konusudur. U-değerleri birbirine yakın olmasına rağmen güneş geçirgenliği mevcut duruma göre %56 daha azdır. Bu durum ikinci cam yüzeye ulaşan güneş ışınımı miktarını da azaltmaktadır. Tentesol Mavi Titanyum 6 mm'lik tek cam (S3) simüle edildiğinde soğutma yükü %19,8 azalmıştır. Aynı şekilde U-değerleri birbirine benzerdir. Fakat güneş geçirgenliği mevcut cama göre %48,2 daha düşüktür. Dış kabukta tek cam yerine çift cam kullanıldığında soğutma yükünün nasıl değiştiği de hesaplanmıştır. 4mm'lik tek cam yerine SolarLow-E Cam6-13-6mm (S4) tercih edilmesi durumunda soğutma yükünün %18,7 azaldığı görülmüştür. U-değeri mevcut 4mm'lik cam ile kıyaslandığında daha düşük olduğu görülmektedir. Aynı şekilde güneş geçirgenlik değeri de daha azdır. Fakat her iki değer de düşük olmasına karşın soğutma yükü ihtiyacındaki azalma benzer U-değeri ve güneş ısı kazanç katsayısı değerine sahip S3 senaryosuyla yakın degerdedir. S5 senaryosunda ki çift camın U-değeri 1,5W/m²K gibi oldukça düşüktür. Güneş ısı kazanç katsayısı ise %42'dir. Soğutma yükü ise tek cama göre %17,6 daha azdır. SHGC ve U-değeri, S3 senaryosuna göre daha düşük olmasına rağmen soğutma yükünde azalma daha az gerçekleşmiştir. Bu sonucun U-değerinin belli bir seviyenin altına inmesi durumunda, ara boşlukta biriken yüksek sıcaklıktaki havadan dış ortama olan ısı transferinin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir çünkü düşük U-değeri oranı, yapı elemanının yüksek ısıl direncini ifade

eder (Oesterle vd., 2001). Bu durum Khalifa vd. (2017) çalışma bulguları ile de tutarlıdır. Ayrıca baca ve rüzgar etkisi sonucu oluşacak havalandırma ile içerideki fazla ısı dışarıya atılabilir (Azarbayjani, 2010). S6 TentesolMavi 6-13-6mm çift cam diğer cam tipleriyle kıyaslandığında en düşük güneş ısı kazanç katsayısı değerine sahiptir ve U-değeri $2,8W/m^2K$ olup mevcut tek camın U-değerinden daha düşüktür. Soğutma gereksinimi açısından bakıldığında ise tek cephe kuruluşuna sahip ofisten %30,4 daha az soğutma yükü ihtiyacı vardır.

Çift kabuk cephede dış cam tipi mevcut hali ile korunarak iç cam tipi aynı 6 farklı cam ile değiştirilmesi durumunda sonuçların nasıl etkilendiği incelenmiş ve önemli değişiklikler tespit edilmiştir. En önemli fark iç camın S1, S2 ve S3 senaryolarındaki farklı termofiziksel özelliklere sahip tek camlarla değiştirilmesi halinde ortaya çıkmış ve soğutma yükünün arttığı hesaplanmıştır. Mevcuttaki iç cam 4-12-4 mm renksiz çift camdan oluşmaktadır. U-değeri $2,98W/m^2K$, güneş ısı kazanç katsayısı ise %78'dir. S1 senaryosundaki cam, çift kabuk cephe kuruluşu iç camında kullanılması halinde soğutma yükü %8,1 artmıştır. SHGC değeri mevcut cama kıyasla %29,4 az olmasına rağmen soğutma yükünde artış gerçekleşmiştir. S1 senaryosundaki tek camın U-değeri mevcut iç camın U-değerinin yaklaşık 2 katıdır. U-değerinin yüksek olması çift cephe kabuk arasında biriken ısının önemli bir kısmının çift kabuk cephe kuruluşuna sahip ofis mekanına transfer olduğunu ve bu nedenle de soğutma yükünün arttığını göstermektedir. S2 senaryosunda ki tek camın güneş ısı kazanç katsayısı değerinin mevcut cama kıyasla oldukça düşük olmasına rağmen soğutma yükü %1,4 oranında artmıştır. Güneş ısı kazanç katsayısı (SHGC) değerinin düşük olması soğutma yükünün azalması için yeterli olmamıştır. Ara boşlukta oluşan yüksek ısının iç ortama önemli ölçüde transfer olmaya devam ettiği söylenebilir. S3 senaryosundaki tek camın güneş geçirgenlik değeri mevcut camdan daha azdır. Fakat aynı şekilde soğutma yükünde %7,4 artış gerçekleşmiştir. S1 ve S2 senaryosundaki benzer durumun S3 senaryosu için de geçerli olduğu görülmektedir. Çift kabuk cephe iç cam, çift camlarla değiştirildiğinde sonuç soğutma yükü açısından olumlu yönde değişmektedir. Çift camların U-değerleri mevcut cama çok yakın ya da daha azdır. Aynı zamanda güneş geçirgenlik değerleri de belirli ölçülerde daha düşüktür. S4 senaryosundaki cam, iç camda kullanıldığında çift kabuk kuruluşuna sahip ofis soğutma yükü tek kabuk cepheli ofise kıyasla %4,1 daha azdır. Bu cam tipinin dış camda kullanılması durumunda azalma %18,7' idi. S5 senaryosundaki çift cam kullanıldığı zaman soğutma yükünde %4,9 azalma gerçekleşmektedir. Bu senaryoda hem U-değeri hem de SHGC değeri mevcut çift camdan daha azdır. Buna rağmen soğutma yükünde çok fazla bir değişiklik gerçekleşmemiştir. S6 senaryosundaki camın güneş geçirgenliği mevcut cama kıyasla %65,3 daha az iken soğutma yükünde ki azalma sadece %13,6'dır.

Camın termofiziksel özellikleri olan U-değeri ve SHGC değerinin soğutma yükü üzerindeki etkilerini daha iyi anlayabilmek için soğutma yükünün iç ve dış cam U-değeri ve SHGC değerine bağlı olarak nasıl değiştiği korelasyon analizi ile incelenmiş ve sonuçlar **Resim 7**'de verilmiştir. İlk olarak, korelasyon katsayılarına bakıldığında iç cam U-değeri değişiminin, dış cam U-değeri değişimine göre soğutma yükü üzerinde az da olsa, daha etkili olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni ara boşlukta oluşan ısının iç ortama geçişinde iç camın bariyer görevi (düşük U- değeri) görmesidir. Dış cam U-değerinin oluşan ısının iç ortama geçmesinde anlamlı bir önemi bulunmamaktadır. SHGC değeri açısından ise dış cam SHGC değerindeki değişimin iç cam SHGC değerindeki değişime göre görece olarak daha çok



Resim 7. İç ve dış cam U-değeri ve SHGC değerine bağlı olarak soğutma yükü değişimi

etkili olduğu tespit edilmiştir. Soğutma yükünün azaltılmasında güneş ışınlarının iç mekana geçmeden engellenmesinin, daha önemli olduğu anlamına gelmektedir.

SONUÇLAR

Bu araştırmanın asıl amacı, İzmir’de bulunan bir üniversite binasında uygulanan çift kabuk cam cephenin bina enerji performansına etkisini incelemektir. Ayrıca sıcak-nemli iklim bölgesinde farklı termofiziksel özelliklere (U-değeri ve SHGC) sahip cam türlerinin çift kabuk cephe soğutma yüküne etkisi detaylı şekilde incelenmiştir. Alan çalışması olarak, İzmir’de bulunan bir üniversite binasındaki öğretim elemanlarının kullandığı güneşe yönelik 2 ofis mekanı seçilmiştir. Aynı özelliklere sahip farklı katlarda yer alan bu ofislerden birine gerçek ölçülerde çift kabuk cephe uygulanmıştır. Böylece belirtilen mekanlarda yerinde toplanan veriler ile deneysel ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Tek ve çift kabuk cephe kuruluşuna sahip ofislerin ısıl davranışları, ölçüm sonuçları ile değerlendirilmiştir. Ayrıca farklı cam tiplerine dayalı 6 senaryo oluşturularak simülasyonlar ile soğutma amaçlı enerji performansları araştırılmıştır. Elde edilen bulgulardan genel olarak sıcak-nemli iklim bölgesinde çift kabuk cephe kuruluşu uygulamaları ile soğutma yükünü azaltmak istendiğinde cam seçiminin çok önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Diğer bulgular ve öneriler aşağıda özetlenmiştir:

- Sıcak iklimlerde soğutma yükünün, özellikle güneşe bakan çift kabuk cephe uygulamaları ile dış kabukta düşük SHGC değerine sahip cam kullanılarak azaltılabileceği görülmüştür. U-değerinin, SHGC değeri kadar etkili olmamakla birlikte yerel kış iklim koşullarına bağlı olarak optimum bir değerde olması gereklidir.

- Mevcut durumda, çift kabuk ara boşluk sıcaklığının dış hava sıcaklık değerlerini kısa zaman aralıklarında aştığı kaydedilmiştir. Bunun nedeni çift kabuk cephe kuruluşundaki dış camın SHGC değerinin çok yüksek olmasına bağlı olarak oluşan sera etkisidir.
- Mevcut durumda, çift kabuk cephe uygulanmış ofiste soğutma yükünün tek kabuk cephe kuruluşuna sahip ofise göre %20 oranında daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum çift kabuk cephenin içeride biriken ısının dışarıya atılmasını güçleştirdiğini göstermektedir. Dolayısı ile bu olumsuz etkinin giderilmesi için farklı önlemler (havalandırılmalı çift cidarlı cephe uygulaması, doğru cam seçimi, gölgeleme, gibi) gerekmektedir.
- Çift kabuk cephede, dış cam tipinin farklı özelliklere sahip camlar ile değiştirilmesi durumunda elde edilen soğutma yükü tasarrufunun %7,1 ile %30,4 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu farklılaşmada en büyük etkinin, camların SHGC değerlerinden kaynaklandığı dikkat çekmektedir. %55 güneş ısı kazanç katsayısı değerine sahip S1 senaryosu ile çift kabuk cepheli ofisin soğutma yükü, tek kabuk cephe kuruluşuna sahip ofise göre %7,1 daha az bulunmuştur. S6 senaryosu için seçilen camın güneş ısı kazanç katsayısı değeri %27'dir. Oldukça düşük güneş enerjisi geçirgenliğine sahip cam uygulaması ile elde edilen tasarruf %30,4 oranı ile en yüksek değere ulaşmıştır. Bu camların U değerlerinde de farklılık olmasına rağmen soğutma yüküne çok fazla etkisinin olmadığı görülmektedir.
- Çift kabuk cephe kuruluşunda güneş ısı kazanç katsayısı değeri düştükçe kabuk ara boşluğuna ulaşacak güneş radyasyonu miktarının azalması ile iç sıcaklık ve buna bağlı olarak soğutma yükünün de artması engellenebilir. Soğutma yükü üzerinde önemli etkisi olan cephedeki saydamlık oranı, mimari bir karar olması nedeniyle çoğunlukla bina enerji performansı açısından çok fazla dikkate alınmadan belirlenmektedir. Cephedeki saydamlık oranından bağımsız uygun termofiziksel özelliklere sahip cam kullanımıyla soğutma yükünün azaltılabileceği mimara tasarımsal özgürlük sağlayacaktır. Enerji etkin yenileme esnasında da bina cephesinin karakterini çok fazla değiştirmeden sadece farklı özelliklere sahip cam kullanarak enerji tasarrufu sağlanacaktır. Mevcut çift kabuk cephe kuruluşunda dış camın, tek veya çift cam olmasının soğutma yükü üzerinde çok fazla etkili olmadığı görülmüştür. Önemli olan camın termofiziksel özellikleridir (U-değeri ve SHGC).
- Çift kabuk cephe kuruluşunda iç cam seçimi yapılırken SHGC değeri yanı sıra U-değerinin de dikkate alınması önemlidir. Farklı cam özelliklerine sahip 6 nolu senaryonun soğutma yüküne etkisi incelendiğinde sadece SHGC değerindeki düşüşün soğutma yükünü azaltmada yeterli olmadığı görülmüştür. Bu durum S1, S2 ve S3 senaryolarındaki camların U-değerlerinin mevcut iç cama göre daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Soğutma yükleri hesaplandığında S1 senaryosunda %8,1 artış, S2 senaryosunda %1,4 ve S3 senaryosunda ise %7,4'lük artış gerçekleşmiştir. S4, S5 ve S6 senaryolarında camların U-değeri ve SHGC değerleri mevcut iç cama göre daha düşüktür ve bu senaryolarda belirlenen cam tiplerinin kullanımıyla soğutma yükünde elde edilen tasarruf oranları sırasıyla %4,1, %4,9 ve %13,6

olarak bulunmuştur. Bu nedenle çift kabuk cephe uygulamalarında iç cam tipi belirlenirken düşük SHGC ve U-değerine sahip camların tercih edilmesi avantaj sağlayabilir. Düşük U-değeri çift cam kabuk ara boşluğunda oluşabilecek yüksek ısının iç ortama geçişini azaltması açısından önemlidir. Aksi takdirde düşük güneş ısı geçişi tek başına soğutma yükünü azaltma konusunda yeterli olamayacağı için daha fazla soğutma yüküne neden olabilir.

- Güney yöne bakan çift kabuk cephe dış ve iç katmanlarında farklı termofiziksel özelliklere sahip camların etkisi incelenmiştir. İç camda değişiklik yapılması durumunda, elde edilen enerji tasarruf miktarının daha az olacağı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak sıcak-nemli iklim koşullarında çift kabuk cephe kuruluşunun ısı davranışı ve soğutma amaçlı enerji performansı hakkında değerli bilgiler elde edilmiştir. İklimsel koşullara bağlı olarak uygun özelliklere sahip cam tipi kullanılarak, çift kabuk cam cephelerin yeni veya mevcut binalarda uygulanması ile enerji tasarrufu sağlanabileceği görülmektedir. Çalışmada yaz mevsiminde güneşten olan ısı kazançlarının en aza indirilmesinin soğutma yükü üzerindeki önemi de bir kez daha vurgulanmıştır. Ayrıca, çift kabuk cephe kuruluşunda hangi cam özelliklerinin etkili olduğuna karar verme konusunda sonuçların önemli bir yarar sağlayacağı düşünülmektedir. Kısmi olarak uygulanan çift kabuk cephe sisteminin enerji performansına, binadaki diğer yapı elemanlarının ve farklı parametrelerin de (saydam yüzey oranı, kişi sayısı, gibi) etkisinin olabileceği unutulmamalıdır. Deneysel çalışmanın kısıtı çift kabuk cephenin tek bir yön için uygulanmasıdır; ölçümlerin diğer yönler için ve havalandırma etkisi ile birlikte sonraki çalışmalarda ayrıntılı olarak incelenmesi önem arz etmektedir. Dolayısı ile bu araştırma sonuçlarının diğer yönler ve farklı iklim koşullarında, güneş ışınım şiddetine bağlı olarak farklılık gösterebileceğine dikkat çekilmektedir.

KAYNAKLAR

- ASHRAE (2002) *ASHRAE Guideline 14-2002: Measurement of Energy Demand and Savings*, American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers Press, Atlanta.
- AUTODESK KNOWLEDGE NETWORK, *Equipment and Lighting Loads*. [https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products/getting-started/caas/simplecontent/content/equipment-and-lighting-loads.html] Erişim Tarihi (17.08.2018).
- AZARBAYJANI, M. (2010) *Beyond Arrows: Energy Performance of a New, Naturally Ventilated Double-Skin Façade Configuration for a High-rise Office Building in Chicago*, yayınlanmamış Doktora Tezi, University of Illinois at Urbana- Champaign, Illinois.
- BALDINELLI, G. (2009) *Double Skin Façades for Warm Climate Regions: Analysis of a Solution with an Integrated Movable Shading System*, *Building and Environment* 44(6) 1107-18.
- DIXIT, M.K., FERMANDEZ-SOLLIS, J.L., LAVY, S., CULP, C.H. (2012) *Need for an Embodied Energy Measurement Protocol for Buildings: A Review Paper*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(6) 3730-43.

- ENERGYPLUS (2012) *EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations*, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, USA.
- GAO, Y., LUO, H., ZHANG, Z., KANG, L., CHEN, Z., DU, J., KANEHIRA, M., CAO, C. (2012) Nanoceramic VO₂ Thermochromic Smart Glass: a Review on Progress in Solution Processing, *Nano Energy* 1(2) 221–46.
- GHA SEMI, N. ve GHA SEMI, F. (2017) Double-skin Façade Technology and its Aspects in Field of Aesthetics, Environment and Energy Consumption Optimization, *International Journal of Scientific Study* 5(4) 293-307.
- GRATIA, E. ve HERDE, A.D. (2007) Greenhouse Effect in Double-skin Facade, *Energy and Buildings* 39(2) 199-211.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2014) *World Energy Outlook 2014*. [<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2014.pdf>] Erişim Tarihi (15.05.2018).
- İZMİR İL TARIM VE ORMAN MÜDÜRLÜĞÜ, *İzmir İli 2013 Yılı İklim Verileri ile Uzun Yıllar (1970-2013) Ortalamalarının Karşılaştırılması*. [<https://izmir.tarim.gov.tr/Belgeler/2013%20tar%C4%B1msal%20veriler/%C3%87izelge%20-Ayl%C4%B1k%20%C4%B0klim%20Verileri.xls>] Erişim Tarihi (07.08.2018).
- KARACA, M. ve VAROL, Ç. (2012) Konut Alanlarında Enerji Etkinliği: Toplu Konut İdaresi Başkanlığı (TOKİ) Toplu Konut Projeleri Üzerine Eleştirel Bir Değerlendirme, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dergisi* (29)2 127-41.
- KHALIFA, I., GHARBI-ERNEZ, L., ZNOUDA, E., BOUDEN, C. (2017) Assessment of the Inner Skin Composition Impact on the Double-Skin Façade Energy Performance in the Mediterranean Climate, *Energy Procedia* (111) 195-204.
- LARSEN, S.F., RENGIFO, L., FILIPIN, C. (2015) Double Skin Glazed Façades in Sunny Mediterranean Climates, *Energy and Buildings* (102) 18–31.
- MAZRIA, E. (1979) *The Passive Solar Energy Book: A Complete Guide to Passive Solar Home, Greenhouse, and Building Design*. Rodale Press; 1st edition.
- METEOROLOJİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ (2018) *İllerimize Ait Genel İstatistik Verileri*. [<https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=IZMIR>] Erişim Tarihi (10.03.2018).
- MINGOTTI, N., CHENVIDYAKARN, T., WOODS, A.W. (2011) The Fluid Mechanics of the Natural Ventilation of a Narrow-Cavity Double-Skin Facade, *Building and Environment* 46(4) 807-23.
- NAZANIN, N. ve MAJID, S. (2015) Performance Enhancement of Double Skin Facades in Hot and Dry Climates Using Wind Parameters, *Renewable Energy* (83) 1-12.
- OESTERLE, E., LIEB, R. D., LUTZ, M., HEUSLER, W. (2001) *Double-Skin Facades: Integrated Planning*, Munich, London, New York: Prestel.
- ÖZTÜRK, M. Z., ÇETİNKAYA, G., AYDIN, S. (2017) Köppen-Geiger İklim Sınıflandırmasına göre Türkiye'nin İklim Tipleri, *Cografya Dergisi* (35) 17-27.

- PARKIN I. P. ve MANNING T. D. (2006) Intelligent Thermo-chromic Windows, *Journal of Chemical Education* 83(3) 393–400.
- POIRAZIS, H. (2006) *Double Skin Facades a Literature Review*, A Report of IEA SHC Task 34 ECBCS Annex-43.
- POMPONI, F., FARR, E.R.P., PIROOZ FAR, P., GATES, J. R. (2015) Façade Refurbishment of Existing Office Buildings: Do Conventional Energy-Saving Interventions Always Work?, *Journal of Building Engineering* (3) 135-43.
- POMPONI, F., PIROOZ FAR, P.A.E., SOUTHWALL, R., ASHTON, P., FARR, E.R.P. (2016) Energy Performance of Double-Skin Façades in Temperate Climates: A Systematic Review and Meta-Analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (54) 1525-36.
- RICHTER, B., GOLDSTON, D., CRABTREE, G., GLICKSMAN, L., GOLDSTEIN, D., GREENE, D. (2008) How America Can Look Within to Achieve Energy Security and Reduce Global Warming, *Reviews of Modern Physics* (80) 1-109.
- ROYAPOOR, M. ve ROSKILLY, T. (2015) Building Model Calibration Using Energy and Environmental Data, *Energy and Buildings* (94) 109–120.
- SAGLAM, H. G. ve YILMAZ, A. Z. (2015) Progress Towards EPBD Recast Targets in Turkey: Application of Cost Optimality Calculations to A Residential Building, *Energy Procedia* (78) 973–8.
- SU, Z., LI, X., XUE, F. (2017) Double-skin Façade Optimization Design for Different Climate Zones in China, *Solar Energy* (155) 281–90.
- ŞİŞECAM PERFORMANS HESAPLAYICI (2018) Şişecam [http://www.sisecamduzcam.com/tr/faaliyet-alanlarimiz/mimari-camlar/performans-hesaplayici] Erişim Tarihi (01.02.2018).
- TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ (2013) *TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı*, Ankara.
- VAKILOROAYA, V., SAMALI, B., FAKHAR, A., PISHGHADAM, K. (2014) A Review of Different Strategies for HVAC Energy Saving, *Energy Conversion and Management* (77) 738–54.
- XUE, F. ve LI, X. (2015) A Fast Assessment Method for Thermal Performance of Naturally Ventilated Double-Skin Façades during Cooling Season, *Solar Energy* (114) 303-13.
- YILMAZ, Z. (2006) Akıllı Binalar ve Yenilenebilir Enerji, *Tesisat Mühendisliği Dergisi* (91) 7-15.
- YIN, R., XU, P., SHEN, P. (2012) Case Study: Energy Savings from Solar Window Film in Two Commercial Buildings in Shanghai, *Energy and Buildings* (45) 132–40.
- ZHANG, T., TAN, Y., YANG, H., ZHANG, X. (2016) The Application of Airlayers in Building Envelopes: A Review, *Applied Energy* (165) 707–34.
- ZIYI, S., LI, X., XUE, F. (2017) Double-Skin Façade Optimization Design for Different Climate Zones in China, *Solar Energy* (155) 281–90.

ZOMORODIAN, S.Z., TAHSILDOOST, M. (2018) Energy and Carbon Analysis of Double Skin Façades in the Hot and Dry Climate, *Journal of Cleaner Production* (197) 85-96.

KISALTMALAR

CV(RMSE): Varyasyon katsayısının kök ortalama karesel hatası
MBE: Ortalama sapma hatası
SHGC: Güneş ısı kazanc katsayısı
TS: Türk standardı
TMY: Tipik iklim verileri
U: Toplam ısı geçirgenlik katsayısı

Received: 19.05.2018; Final Text: 30.01.2019

Keywords: Double skin facade; glass type; building energy performance.

INVESTIGATION OF ENERGY PERFORMANCE OF DOUBLE SKIN FACADE IN HOT-HUMID CLIMATE

In buildings, which have a significant share of energy consumption, the proper construction and design of the building envelope is an important issue on all countries due to environmental problems and energy supply. Therefore, controlling the heat loss/gain from the building envelope is an inevitable necessity when considering the increasing building stock in Turkey. Reducing the amount of energy consumed in both new and existing buildings leads to new environmental and climate-sensitive approaches. Double skin facade applications because of the impact on building energy performance is becoming increasingly important. The main purpose of this study is to investigate the effect of the use of double skin facade on the building energy performance through experimentation and simulation in hot-humid climatic regions, especially where the cooling load is high. In double skin facades, the layers consist of transparent surfaces (glasses). Therefore, it is important to examine how to consider to energy loads in terms of glass type selection on double skin facades especially in the hot-humid climatic regions. The study is based on the effect of cooling load on the total heat transfer coefficient (U-value) and the solar heat gain coefficient (SHGC) values from the thermophysical properties of glasses which is one of the main elements of double skin facade systems. As an experimental investigation, a double skin facade was applied at 1/1 scale to the south orientation of an existing education building. The thermal behaviours in the current situation were investigated through measurement data obtained by the reference and experiment office, and the effects on the energy performance of the double skin facade for cooling were calculated. The results show that double skin facade, especially outer layer glass type properties of the facade, is a significant contributor to reducing the cooling load. It has been found that the glass having low SHGC value should be selected for outer layer, and both U-value and SHGC value should be low for the glass of inner layer of the facade. With the use of outer glass having a low SHGC value, it was estimated that the cooling load can be saved between 7.1% and 30.4%. However, if the inner glass type does not meet the above mentioned criteria, the cooling load may increase further. As a result of the simulations, if the U-value of the inner glass and the SHGC value are low, the cooling load will be saved between 4.1% and 13.6%.

SICAK-NEMLİ İKLİMDE ÇİFT KABUK CEPHE ENERJİ PERFORMANSININ İNCELENMESİ (1)

Enerji tüketiminde önemli bir paya sahip olan binalarda, bina kabuğunun doğru kurgulanması ve tasarlanması çevresel sorunlar ve enerji arzı gibi nedenlerle tüm ülkelerin gündeminde olan önemli bir konudur. Dolayısı ile bina kabuğundan gerçekleşen ısı kayıp/kazançlarının kontrol altına alınması, artan yapı stoku dikkate alındığında ülkemiz açısından da kaçınılmaz bir gerekliliktir. Gerek yeni gerekse mevcut binalarda tüketilen enerji miktarının azaltılması çevre ve iklim duyarlı yeni yaklaşımları da beraberinde getirmektedir. Çift kabuk cephe uygulamaları da bu bağlamda bina enerji performansına etkileri nedeni ile giderek önem kazanmaktadır. Çalışmanın temel amacı çift kabuk cephe kullanımının bina enerji performansı üzerindeki etkisinin özellikle soğutma yükünün fazla olduğu sıcak-nemli iklim bölgelerinde deney ve simülasyon aracılığı ile araştırmaktır. Çift kabuk cephelerde, katmanları saydam yüzeyler (cam) oluşturmaktadır. Dolayısı ile enerji yükleri üzerinde özellikle sıcak-nemli iklim bölgelerinde çift kabuk cephede cam tipi seçimi açısından nelere dikkat edilmesi gerektiğinin araştırılması önem arz etmektedir. Çalışma, çift kabuk cephe sistemlerinin ana öğelerinden biri olan camların termofiziksel özelliklerinden toplam ısı geçirgenlik katsayısı (U-değeri) ve güneş ısı kazanç katsayısı (SHGC) değerinin soğutma yükü etkisi üzerine kurgulanmıştır. Deney düzeneği olarak mevcut bir eğitim binasının güney cephesine 1/1 ölçekte çift kabuk cephe uygulanmıştır. Veri kayıt cihazları ile referans ofis ve deney ofisinde yerinde toplanan ölçüm verileri aracılığı ile mevcut durumdaki ısı davranışlar incelenmiş ve yapılan simülasyonlar ile çift kabuk cephede cam tipinin soğutma amaçlı enerji performansına etkisi hesaplanmıştır. Sonuçlar çift kabuk cephe kuruluşunda, özellikle dış kabuk cam türü özelliklerinin soğutma yükünün azaltılmasında önemli olduğunu göstermektedir. Çalışmada dış kabuk cam tipi seçiminde SHGC değerinin düşük olması, iç kabuk cam tipi seçiminde ise SHGC değeri ile birlikte U-değerinin de düşük olmasının gerektiği saptanmıştır. Düşük SHGC değerine sahip dış cam kullanımıyla %7,1 ile %30,4 arasında değişen oranlarda soğutma yükünden tasarruf edilebileceği hesaplanmıştır. Ancak iç cam tipinin yukarıda belirtilen kriterlere uymaması durumunda ise soğutma yükünün artabileceği görülmüştür. Yapılan simülasyonlar sonucu iç camın U-değeri ve SHGC değerinin düşük olması durumunda soğutma yükü açısından %4,1 ile %13,6 arasında değişen oranlarda tasarruf edileceği saptanmıştır.

TÜRKAN GÖKSAL ÖZBALTA; B.Arch, M.Sc., PhD.

Received her bachelor's degree in architecture from FH Hamburg, Fachbereich Architektur in 1984 and MSc from Mimar Sinan University, Faculty of Architecture in 1988. Earned her PhD. degree from Universität Dortmund, Fachbereich Bauwesen in 1992. Major research interests include solar architecture, energy efficient building design and building production technology. tozbalta@gmail.com

YUSUF YILDIZ; B.Arch, M.Sc., PhD.

Received his bachelor's degree in architecture from Trakya University, Faculty of Architecture in 2004 and MSc from Izmir Institute of Technology, Faculty of Architecture in 2008. Earned his PhD. degree in Architecture from Izmir Institute of Technology, Faculty of Architecture in 2012. Major research interests include simulation for energy efficient building design and operation of high-performance buildings in terms of energy use and indoor environmental quality. yusufyildiz@gmail.com