

Türkiye'nin Büyük Şehirlerinde Yaz Aylarında Cam Filmi Kullanımı ile Isı Kazancı Kestirimi ve Maliyet Analizi

Erdem Onur ÖZYURT ^{1,a}, Mehmet Gökhan GÖKÇEN ^{1,b}, Mehmet İPEKOĞLU ^{1,c}

¹Türk-Alman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul

^aORCID: 0000-0002-1098-2314; ^bORCID: 0000-0001-5861-3377; ^cORCID: 0000-0002-0019-3346

Makale Bilgileri

Geliş : 01.06.2024

Kabul : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665449

Sorumlu Yazar

Erdem Onur ÖZYURT

ozyurt@tau.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Cam filmi,

Maliyet analizi

Enerji verimliliği

Güneş ısı kazancı

Karbon emisyonu

Atf şekli: ÖZYURT, E.O., GÖKÇEN, M.G., İPEKOĞLU, M., (2025). Türkiye'nin Büyük Şehirlerinde Yaz Aylarında Cam Filmi Kullanımı ile Isı Kazancı Kestirimi ve Maliyet Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(1), 17-31.

ÖZ

Küresel ısınma ile bağlantılı olarak dünya çapında birçok felaket meydana gelmektedir. Sera gazlarının emisyon seviyelerini azaltmanın yollarını bulmak için birçok çalışma yürütülmektedir. Fosil yakıt tüketiminin azaltılması emisyonları azaltmak için kullanılan en yaygın yöntemdir. Bu çalışmada belirli cam filmi özelliklerine sahip bir model binada sağlanacak ısı kazancının kestirimi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, saydam ve renkli cam üzerine kaplanmış üç film tipi için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Isı kazancı kestirimi, şehir, cam, bina ve nem özellikleri dikkate alınarak yaz günleri için uyarlamalı olarak yapılmıştır. Filmsiz saydam cam için elde edilen son oda sıcaklığı referans olarak alınmış ve diğer yedi tipte cam için kestirim bu referansa göre yapılmıştır. Örnek binanın konumu, sıcaklığı ve cephesi gibi özellikler dikkate alınarak elektrik tüketimi, karbon emisyonu ve fiyat açısından maliyet analizi yapılmıştır.

Heat Gain Estimation with Window Film Application in Some Major Cities of Türkiye during Summer and Related Cost Estimation

Article Info

Received : 01.06.2024

Accepted : 25.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665449

Corresponding Author

Erdem Onur ÖZYURT

ozyurt@tau.edu.tr

Keywords

Window film

Cost analysis

Energy efficiency

Solar heat gain

Carbon emission

How to cite: ÖZYURT, E.O., GÖKÇEN, M.G., İPEKOĞLU, M., (2025). Heat Gain Estimation with Window Film Application in Some Major Cities of Türkiye during Summer and Related Cost Estimation. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 17-31.

ABSTRACT

Many disasters occur around the world in connection with global warming. Many studies are conducted to find ways of decreasing levels of emissions of greenhouse gases. Reducing consumption of fossil fuels is the most common method used to decrease emissions. This study focusses on estimation of heat gain in a model room with given characteristics of window filming. The results are given comparatively for eight types of windows including clear and tinted windows and additionally three types of filming coated on both types. Heat gain is estimated for summer days adaptively by using the models taking into account the location of the city, the position of windows, the building volume and moisture. The heat gain and final room temperature for clear window is taken as a reference and other seven calculations are observed in terms of differences between heat gains in order to evaluate and compare their effectiveness. Cost analysis is performed in terms of electric consumption, carbon emission and price for characteristics including location, temperature and facade of the sample room.

1. GİRİŞ

Sanayi devrimi sonucunda on dokuzuncu yüzyılda başlayan ekonomik büyüme yirminci yüzyılda da devam etmiş ve buna önemli bir nüfus artışı eşlik etmiştir. Hızlı nüfus artışı, yoğun kentleşme ve yaşam kalitesindeki iyileşme enerji tüketimini önemli ölçüde artırmıştır. Enerji kullanımındaki bu artış, çevresel sorunlara ve buna bağlı maliyetlere yol açmıştır. Yüksek enerji tüketiminin çevre üzerindeki olumsuz etkileri, küresel ekonomiyi ve yaşam kalitesini gözle görülür bir şekilde etkilemeye başlayana kadar büyük ölçüde göz ardı edilmiştir. Bununla birlikte, sera etkisine katkıda bulunan atık gazlar, fosil yakıtların artan kullanımıyla daha da şiddetlenmiş, şehirlerde hava, su ve toprak kirliliğine ve küresel iklim değişikliklerine yol açmıştır [1].

Pencereler, yeterli iç aydınlatma ve iç ve dış mekanlar arasında görsel bir bağlantı sağlamak için tasarlanmıştır. Saydam malzemelerden yapılan pencereler, ısı kaybına karşı en hassas bileşenlerdir. Çoğu kış gününün bulutlu olduğu göz önüne alındığında, binalar genellikle kış aylarında net ısı kaybı yaşarlar. Yaz aylarındaysa tam tersine ısı kazancı gerçekleşir [2]. Binalar enerji tasarrufu ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasında çok önemli bir rol oynamaktadır ve pencereler ısı kayıplarının yaklaşık %60'ını oluşturmaktadır. Sonuç olarak, pencereler binalardaki enerji tüketimini azaltmayı amaçlayan araştırmalarda kritik bir odak noktasıdır [3]. Pencereler, estetik görünüm, iklimlendirme, pasif güneş enerjisi kazanımı, aydınlatma ve acil durumlarda çıkış hizmeti gibi özellikleri nedeniyle bir binanın önemli bileşenleridir. Bu nedenle, pencereler zaman içinde bina cephelerinde daha büyük alan kaplayacak şekilde kullanılmaya başlanmıştır [4]. Pencereler, diğer yapı malzemelerine kıyasla yüksek U değerleri nedeniyle binalardaki ısı kaybının önemli bir kısmını oluşturmakta ve daha yüksek maliyet ve daha fazla sera gazı emisyonuna yol açmaktadır. Bu nedenle, pencereler binalardaki ısı kaybından kaynaklanan sera gazı emisyonunun azaltılmasında da etkili bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Enerji maliyetleri, pencerelerin ısı yalıtım performansının iyileştirilmesiyle yüksek enerji tasarrufu sağlayacak şekilde azaltılabilir. Bina standartları 2000'li yıllardan itibaren bu kapsamda revize edilmiştir. Bu standartlar, uygun inşaat malzemelerinin kullanımıyla enerji verimliliğini artırarak binaların ısıtılması veya soğutulması için maksimum enerji ihtiyacının azaltılmasına yardımcı olmuştur. Geleneksel pencereler kullanarak üstün termal standartlara uymak mümkün değildir. Mevcut pencere teknolojisi, yüksek enerji tüketimine yol açtığı için karbon emisyonunun azaltılmasına izin vermemektedir [5].

Bir binanın tüm bileşenleri, pencereler de dahil olmak üzere entegre bir sistemin parçası olarak işlev görür. Enerji tasarruflu pencereler, kış veya yaz aylarında optimum performans için özel optik ve termofiziksel özelliklerle tasarlanıp sonuçta enerji tüketiminin azaltılmasına katkıda bulunurlar [6]. Bir binanın termal verimliliği, pencerelerin boyutuna ve özelliklerine bağlıdır [7]. Bir binanın ısı kaybının yaklaşık %60'ı pencerelerden gerçekleşirken, soğutma yükünün %40'ı güneş ışınımından ve pencerelerden ısı kazanımından kaynaklanmaktadır [8]. Cam filmleri, pencerelerden ısı kazanımını en aza indirmek için uygun maliyetli ve etkili bir çözümdür. Bu ince filmler, güneş ısıyı yansıtma üzere tasarlanmış termal özelliklere sahip metalik-polyester katmanlardan oluşur. Bunun yanında, UV ışınlarının bina içine girmesini engelleyebilir ve bina içindeki dekorun güneş radyasyonunun zararlı etkilerinden korunmasını sağlayabilir [9]. Filmin metalik bileşeni güneş ısıyı yansıtırken, polyester bileşeni güneş ışığının metalik katmandan geçmesine izin verir. Pencerelerin dış yüzeyine uygulanan filmler, dış ortam koşullarına dayanabilecek malzemelere duyulan ihtiyaç nedeniyle daha pahalıdır [10].

2. LİTERATÜR TARAMASI

Cam filmlerinin uygulanması hem nemli hem de kuru bölgelerde performans bakımından incelenmiştir. Bir çalışmada saydam camların enerji tasarrufu açısından renkli camlardan daha iyi performans gösterdiği ortaya koyulmuştur [11]. Bir başka çalışmada ise dış ve iç cam filmlerinin sırasıyla %44 ve %22 oranında enerji tasarrufu sağlayabileceği belirlenmiştir [12]. Literatürde cam filmlerinin yaz aylarında enerji tasarrufu için etkili olmalarına rağmen görece daha sıcak iklimlerde kış aylarında enerji kullanımının artmasına neden olabileceği belirtilmektedir [13]. Yapılan çalışmalarda akıllı pencere teknolojilerinin etkili ancak genellikle maliyetli olduğu gösterilmiştir [14]. Çin'de beş farklı iklim koşulu analiz edilmiş ve opak esnek pencere panjurlarının enerji tasarrufu için en etkili çözüm olduğu belirtilmiştir [15]. Pencere boyutu, en-boy oranı ve konumunun ısı kaybı üzerindeki etkisi de incelenmiş ve soğuk iklimlerde pencere eğiminin ve boyutunun etkileri araştırılmıştır [16]. Bir çalışmada cam filmleriyle birlikte çift camlı pencerelerin enerji kullanımını artırdığı bildirilirken [17], simülasyonların kullanıldığı bir başka çalışmada sıcak ve diğer

iklimlerde soğutma yükünde %17 ila %47 oranında bir azalma olduğunu gösterilmiştir [18]. İnsan alışkanlıkları binaların ısı kaybını önemli ölçüde etkilemektedir ve bu durum otomatik iklimlendirme sistemlerinin insan davranışlarının enerji tasarrufu üzerindeki olumsuz etkisini azaltabileceğini düşündürmektedir [7]. Binalarda enerji tüketimini azaltmak için, yeni pencere teknolojileri düşük U değeri, uygun bir g değeri, yüksek hava geçirmezlik ve yüksek ışık geçirgenliğine sahip olmalıdır. Enerji endeksi hesaplanırken termal geçirgenlik, güneş ısı kazanç katsayısı ve hava geçirmezlik faktörleri dikkate alınmaktadır [7]. Başka bir çalışmada pencerelerin performans analizine görünür geçirgenlik ve salınım katsayısı dahil edilmiştir [19].

Bu çalışma, oda ve pencere boyutları verilen bir binanın pencere yoluyla alınan ısı kazancının kestiriminin yapılmasını kapsamaktadır. Sonuçları ısı kazancı verimliliği açısından karşılaştırılarak maliyet analizi yapıldıktan sonra en verimli cam filminin tespit edilmesi amaçlanmıştır.

3. YÖNTEM

Yöntem, Kirchoff radyasyon yasasına dayandırılmıştır. Verilen radyasyon yasası yinelemeli bir şekilde uygulanmıştır [20]. Yinelemeli adımlar, önerilen Boles prosedürü [21] takip edilerek Eşitlik 1'de verilmiştir.

$$\dot{Q}_{kazanç} = SHGC \cdot SC \cdot A_{cam} \cdot \dot{q}_{anlık} \quad (1)$$

Burada SHGC, SC ve A_{cam} sırasıyla güneş ısı kazanç katsayısını, gölgeleme katsayısını ve cam yüzey alanını ifade etmektedir. $\dot{Q}_{kazanç}$ ve Eşitlik 2'de verilen $\dot{q}_{anlık}$ ise W cinsinden net güneş ısı kazancını ve W/m^2 cinsinden anlık güneş ısı akışını ifade etmektedir.

$$\dot{q}_{anlık} = \alpha_s G_{solar} + \epsilon \sigma (T_{Hava}^4 - T_s^4) \quad (2)$$

Burada α_s , G_{solar} , ϵ ve σ sırasıyla yüzey güneş soğurma katsayısını, yüzeye gelen anlık toplam güneş enerjisini, yayılma katsayısını ve Stefan-Boltzmann katsayısını ifade ederken T_{Hava} ve T_s sıcak koşullarda etkin hava sıcaklığını ve yineleme adımlarının başındaki yüzey sıcaklığını ifade etmektedir.

$$Q_{kazanç,1sa} = \dot{Q}_{kazanç} \left(\frac{kJ}{s} \right) \times 3600(s) \quad (3)$$

Eşitlik 3'te verilen $Q_{kazanç,1sa}$ camdan geçen 1 saatlik toplam ısı kazancını ifade etmektedir.

$$T_{son} = f(Q_{kazanç}, V_{oda}, m_{kuru\ hava}, \rho_{hava}) \quad (4)$$

Eşitlik 4'te T_{son} odanın son sıcaklığını, $f(\cdot)$ ise odadaki hava yoğunluğunu yinelemeli olarak güncelleyen ve nem etkisini hesaba alarak T_{son} kestirimini yapan fonksiyondur. Bu çalışmada önerilen yöntemde $G_{kazanç}$ ve T_{son} kestirimleri uyarlanabilir bir şekilde yinelemeli olarak entegre edilmiştir.

Bu çalışmada, cam filmi tipleri için ilgili çalışmada kullanılan katsayı değerleri kullanılmıştır [20]. Bunlar arasında saydam camlar ve renkli camlar, ayrıca A, B ve C tipinde filmlerle kaplanmış her iki tipte camı içermektedir. Bu çalışma, G_{solar} ve T_{son} kestirimi için yeni bir yaklaşım önererek kestirim amacıyla yinelemeli bir yöntem yapısı geliştirilmiştir. Kestirim için gerekli hesaplamalara ait uyarlanabilir yapı ilerleyen bölümlerde ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Cam filmi özellikleri gölgeleme katsayısı (SC), güneş ısı kazancı katsayısı (SHGC) ve yüzey güneş soğurma katsayısı (α_s) parametrelerine bağlı olup bu parametreler Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan cam ve film SC, SHGC ve α_s katsayıları

Özellik	Saydam	Renkli	Filmler			Filmler		
			A	B	C	A	B	C
Film	-	-	A	B	C	A	B	C
SC	0,94	0,69	0,47	0,47	0,24	0,43	0,43	0,31
SHGC	0,82	0,60	0,41	0,41	0,21	0,37	0,38	0,27
α_s	0,88	0,50	0,39	0,36	0,09	0,23	0,21	0,05

3.1. Eğimli bir Yüzeyde Saatlik Güneş Radyasyon Miktarının Hesaplanması

Eşitlik 3'te verilen $Q_{kazanç,1sa}$, 1 saat içerisinde yüzeye gelen toplam güneş enerjisini temsil etmektedir. Eğimli yüzeyler üzerindeki saatlik küresel güneş radyasyonu kestirimi başka bir çalışmada verilen yöntemle göre yapılmıştır [22].

Deklasyon, $23,45^\circ$ kuzey ve $23,45^\circ$ güney arasında dalgalanan, güneşten dünyanın ekvatoruna olan açısal mesafedir. Bu dalgalanma, dünyanın güneşe göre eğik dönüş ekseninden kaynaklanmaktadır. δ ile gösterilen deklasyon açısı Eşitlik 5'te gösterilen şekilde hesaplanmaktadır [23].

$$\delta = (0.006918 - 0.399912\cos\Gamma + 0.070257\sin\Gamma - 0.006758\cos2\Gamma + 0.000907\sin2\Gamma - 0.002697\cos3\Gamma + 0.00148\sin3\Gamma) \quad (5)$$

Burada Γ gün açısına karşılık gelmektedir, n yılın günü olup Eşitlik 6'da verilen şekilde hesaplanır.

$$\Gamma = 2\pi \left(\frac{n-1}{365} \right) \quad (6)$$

Eşitlik 7'de verilen saat açısı, ω ile gösterilir ve dünyanın kutup eksenini etrafındaki dönüşünü tanımlar. Gözlemcinin meridyeni ile düzlemi güneş ışınlarına dik açıyla bakan meridyen arasındaki açısal mesafedir ve öğle vakti sıfır derecedir.

$$\omega = 15 \cdot (12 - ST) \quad (7)$$

$$ST = LT + \frac{ET}{60} + \frac{4}{60} (L_s - L_L) \quad (8)$$

Burada LT , L_s ve L_L sırasıyla yerel standart zaman, standart meridyen ve paralel değerleri olup Eşitlik 8'de ST sembolüyle gösterilen yerel zaman hesaplaması için kullanılırlar. ET zaman denklemi olup hesaplaması Eşitlik 9'da ve B açısının hesaplaması Eşitlik 10'da verilmiştir.

$$ET = 9.87\sin2B - 7.53\cos B - 1.5\cos B \quad (9)$$

$$B = 360 \cdot \frac{n-81}{365} \quad (10)$$

Azimut açısı γ , güneş radyasyonu projeksiyonu ile güney kutbu arasındaki açısal mesafe olarak tanımlanır. Enlem ϕ , dünyanın ekvatorunun kuzeyine veya güneyine göre konumudur.

Eşitlik 11, eğimli bir yüzey üzerindeki saatlik küresel güneş radyasyonunu hesaplamak için kullanılır ve I_β olarak gösterilir.

$$I_\beta = I_{d\beta} + I_{b\beta} + I_r \quad (11)$$

$I_{d\beta}$, $I_{b\beta}$ ve I_r sırasıyla yayılım radyasyonunu, ışın radyasyonunu ve yansıyan radyasyonu temsil eder, β ise yüzeyin eğim açısıdır [22].

Eşitlik 12'de görüldüğü üzere $I_{d\beta}$ hesaplanmasında eğimli bir yüzey üzerindeki güneş yayılım radyasyonunu belirlemek için geliştirilen izotropik bir model kullanılmıştır [24].

$$I_{d\beta} = \left(\frac{3+\cos2\beta}{4} \right) \times I_d \quad (12)$$

Burada I_d eğimli yüzeyde saatlik yayılım radyasyonunu ifade etmektedir ve hesaplanmasında parametrik bir model kullanılır [25]. Eşitlik 13'te gösterilen şekilde hesaplanır.

$$I_d = C \cdot I_{bN} \quad (13)$$

$$I_{bN} = A \cdot \exp\left\{-\frac{B}{\cos\theta_Z}\right\} \quad (14)$$

$$\theta_Z = \cos^{-1}(\sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega) \quad (15)$$

Eşitlik 14'te verilen I_{bN} normal güneş yayılım radyasyonu olup Eşitlik 15'te verilen θ_Z zenit açısıdır. A, B ve C ASHRAE algoritmasından alınan sabit değerlerdir [26]. Sabit A, B ve C değerleri yılın 12 ayı için Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. ASHRAE modelinde hesaplanan A, B ve C sabit değerleri

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
A	1230	1215	1186	1136	1104	1088	1085	1107	1152	1193	1221	1234
B	0,142	0,144	0,156	0,180	0,196	0,205	0,207	0,201	0,177	0,160	0,149	0,142
C	0,058	0,060	0,071	0,097	0,121	0,134	0,136	0,122	0,092	0,073	0,063	0,057

Öte yandan, eğimli bir yüzeye gelen doğrudan ışın radyasyonu Eşitlik 11'de $I_{b\beta}$ olarak gösterilmiştir. Eşitlik 16'da gösterildiği gibi hesaplanır [27].

$$I_{b\beta} = r_b \cdot I_b \quad (16)$$

Burada r_b eğimli yüzeyde alınan saatlik radyasyon miktarının eğimsiz yüzeyde alınan miktara oranını ifade eder. Hesaplaması Eşitlik 17'de verilmiştir. Eşitlik 18'deyse ekvatora bakan yüzeye geliş açısı verilmiştir.

$$r_b = \frac{\cos\theta_0}{\cos\theta_Z} \quad (17)$$

$$\cos\theta_0 = \sin\delta \sin(\phi - \beta) + \cos\delta \cos(\phi - \beta) \cos\omega \quad (18)$$

Eşitlik 11'de I_r ile gösterilen eğimli yüzeyden yansıyan radyasyon Eşitlik 19 ile hesaplanır.

$$I_r = (I_{d\beta} + I_{b\beta}) \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad (19)$$

Burada zemin yansıtma özelliği ρ genellikle 0,2 değerine sabitlenir [25].

3.2. Yinelemeli Oda Sıcaklığı Hesaplama

Kütle, ısı kapasitesi ve ilk sıcaklık gibi özellikleri verilen bir nesnenin veya maddenin son sıcaklığı, Eşitlik 20'de verilen termal enerji değişimi formülü kullanılarak kolayca hesaplanabilir.

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (20)$$

Burada Q ısı enerjisi değişimi olup m , C_p ve ΔT sırasıyla kütle, özısı kapasitesi ve sıcaklık değişimini temsil eder.

Ancak, sıcaklık değişimine bağlı olarak havanın yoğunluğunun değiştiği göz önüne alındığında, sıcaklığın değiştiği bir ısı iletimi sırasında odadaki havanın kütlesi sabit kalmaz. Sıcaklık değiştiğinde, sadece kuru hava ve nemli havanın yoğunluğu değil, aynı zamanda kuru hava ve nemli hava arasındaki oran da değişecektir. Bu nedenle, uyarlanabilir bir hesaplama prosedürü odadaki son sıcaklığının kestiriminin daha doğru yapılmasına yardımcı olacaktır. Son sıcaklık kullanılarak, odanın istenen sıcaklığa soğutulması için gereken elektrik enerjisi miktarı da daha doğru bir şekilde kestirilebilir. Eşitlik 20'ye T_{son} eklendiğinde Eşitlik 21 elde edilir.

$$T_{son} = \frac{Q_{kazanç}}{m_{hava} \cdot C_p} + T_{ilk} \quad (21)$$

$$m_{hava} = V_{oda} \cdot \rho_{hava} \quad (22)$$

Eşitlik 22'de m_{hava} , V_{oda} ve ρ_{hava} sırasıyla odadaki havanın kütlesi, odanın hacmi ve oda içindeki havanın yoğunluğudur.

Hava yoğunluğu kuru hava ve nem bileşenlerinden elde edilir. Bu durumda hava yoğunluğunu hesaplamak için sıcaklık değişikliğine bağlı olarak yinelemeli bir yöntem kullanılmıştır. Hava yoğunluğu Eşitlik 23'te verilen şekilde hesaplanır.

$$\rho_{hava} = \frac{P_d}{R_d \cdot T_{ilk}} + \frac{P_v}{R_v \cdot T_{ilk}} \quad (23)$$

Burada P_d ve P_v sırasıyla Pascal cinsinden kuru hava basıncı ve su buharı basıncıdır. R_d ve R_v kuru hava ve su buharı için verilen gaz sabitleridir [28].

3.3. Yinelemeli Oda Sıcaklığı Hesaplama

Örnek hacimde oluşan enerji birikimi ve son sıcaklık kestirildikten sonra bir maliyet analizi yapılmıştır. Maliyet analizi elektrik tüketimi, karbon emisyonu ve fiyat hesaplamalarını içermektedir. Söz konusu hacim soğutulduğunda karşılaşılabilecek elektrik tüketimi, karbon emisyonu ve fiyat için kestirim yapılmıştır. Kestirim için bir model [29] kullanılmıştır. Son sıcaklığı düşürmek için gereken enerji, soğutma yükü hesaplamasında iletim yükü ve sızma yükü kullanılarak hesaplanır. İletim yükü Eşitlik 24 ile verilmektedir.

$$Q_t = U \cdot S \cdot (T_f - T_i) \quad (24)$$

Burada Q_t ısı iletim yükü, T_f son sıcaklık, T_i hedef sıcaklık, U ısı aktarım sabiti ve S iletim kesit alanıdır. Sızma yükü Eşitlik 25'te verilmiştir.

$$Q_{sl} = q_v \cdot c_p \cdot \rho \cdot (T_f - T_i) \quad (25)$$

Burada c_p havanın özısıısı, ρ hava yoğunluğu ve q_v hacimsel hava akış hızıdır.

Karbon emisyonu kestirimi, elektrik tüketimi kestiriminden faydalanılarak gerçekleştirilmiştir. Karbon emisyonu kestirimi, elektrik üretmek için kullanılan üç enerji kaynağı için ayrı ayrı yapılmıştır. Enerji tüketiminden CO₂ emisyonuna dönüşüm, ABD Enerji Bilgi İdaresi tarafından sağlanan veri kaynağında verilen birim ölçütler kullanılarak yapılmış, Çizelge 3'te verilmiştir [30].

Çizelge 3. 2021 yılında ABD elektrik net üretimi ve karşılığında sebep olunan CO₂ emisyonu

	Elektrik üretimi (milyon kWh)	CO ₂ emisyonu (milyon metrik ton)	kWh başına libre
Kömür	897.885	919	1,03
Doğalgaz	1.579.361	696	0,44
Petrol	19.176	21	1,11

Referans elektrik fiyatları, ABD doları cinsinden küresel petrol fiyatlarından alınmıştır. Toplam fiyat, şehirlerdeki hane sayısı kullanılarak hesaplanmıştır.

3.4. Yöntem Uygulaması

Belirtilen parametreler ile belli hacimde bir bina odasının ısı kazancının tahmin edilmesi amaçlanmaktadır. Belirli geçirgenlik ve yansıtma özelliklerine ve boyutlara sahip pencerenin belli özelliklere sahip bina hacmi içinde güneş ısı kazancı kestirimini yapmak için ısı kazancı kestirimi yapılmıştır. Yöntem uygulaması İstanbul, Ankara, İzmir ve Adana için yapılmıştır. Ayrıca, bina hacimlerinin dört ana yöne baktığı durumlar için yaz aylarının belirli günlerinde ayrı ayrı simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Camların yüzey eğiminin $\beta = 90^\circ$ 'ye eşit olduğu varsayılmıştır. Hesaplamalar, standart yerel saate göre sabah, öğlen ve akşam olmak üzere üç yaz ayının ortasındaki gün için yapılmıştır. Bu şekilde, saatlik güneş ışınımının hesaplanmasında gerekli olan şehirlerin özellikleri, verilen tarih ve saatte LL boyları, ϕ enlemi, n gün sayısı, LT yerel standart saat ve γ azimut açısı Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Örnek binanın konumlandırıldığı şehirlerin coğrafi özellikleri

	LL	ϕ	LT	$n = 165^\circ$ γ	$n = 195^\circ$ γ	$n = 225^\circ$ γ
İstanbul	28,95	41,01	9	89,44	90,38	97,57
Ankara	32,85	39,92	9	91,13	92,33	99,71
İzmir	27,14	38,41	9	86,45	87,46	94,86
Adana	35,32	37,00	9	90,20	91,39	99,50
İstanbul	28,95	41,01	12	137,61	137,45	146,05
Ankara	32,85	39,92	12	144,38	143,73	152,07
İzmir	27,14	38,41	12	129,37	129,94	140,31
Adana	35,32	37,00	12	145,64	144,91	154,43
İstanbul	28,95	41,01	15	242,63	238,24	229,93
Ankara	32,85	39,92	15	248,84	244,67	235,97
İzmir	27,14	38,41	15	244,59	239,80	230,35
Adana	35,32	37,00	15	255,64	251,54	241,97

Azimut hesabı için Eşitlik 26 kullanılmıştır [28].

$$\cos \gamma = \frac{\cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega - \sin \delta \cdot \sin \phi}{\cos \gamma} \quad (26)$$

Burada δ , ϕ , ω ve γ sırasıyla deklinasyon açısı, enlem açısı, saat açısı ve güneş yükselti açısıdır. A , B ve C parametreleri ilgili n değerleri için Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarına karşılık gelen değerler Çizelge 2'den alınarak I_{bN} fonksiyonunun hesaplaması yapılmıştır. Standart meridyen L_s İzmit enlem derecesi 30° 'dir.

Güneşten gelen anlık ısı akşını ifade eden $\dot{q}_{anlık}$ değişkeninin hesaplanması Eşitlik 2'de verilmiş olup gerekli parametreler arasında yer alan yüzeye gelen toplam anlık güneş enerjisi G_{solar} bu çalışma kapsamında Çizelge 4'te verilen coğrafi nitelikler ve Çizelge 1'de verilen cam filmi tipleri baz alınarak yinelemeli olarak hesaplanmıştır. Yayımla katsayısının ϵ değeri Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Enerji Teknolojileri Laboratuvarı Departmanı'na sunulmuş bir proje raporuna [31] göre seçilmiş olup Eşitlik 1'in yinelemeli olarak hesaplanması için gerekli diğer elemanlarla birlikte Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. $\dot{q}_{anlık}$ hesaplaması için gerekli parametre değerleri

$\epsilon \left(\frac{J}{m^2 \cdot s} \right)$	$\sigma \left(\frac{W}{m^2 K^4} \right)$	$T_{hava} (K^\circ)$	$T_s (K^\circ)$	$A_{cam} (m^2)$
0,84	$5,67 \times 10^{-8}$	285	298,15	50

Son olarak, bina hacminin son sıcaklığının hesaplanmasında bazı ek parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır ve bu parametreler de bu çalışma kapsamında geliştirilen yinelemeli adımlar aracılığıyla uyarlamalı olarak kestirilmektedir. İlgili parametreler arasında Eşitlik 3 kullanılarak elde edilen 1 saat içindeki toplam ısı kazancının ($Q_{kazanç}$) hesaplanmasında kullanılan bina boşluğunun işgal ettiği hacmi $V_{oda} (m^3)$, odanın başlangıç sıcaklığı $T_{ilk} (K)$ ve odadaki kuru hava kütlesi $m_{kuru} (kg)$ vardır. Ayrıca, gerekli sabit parametreler sırasıyla havanın özgül ısı kapasitesi $C_p \left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$, kuru havanın özgül gaz sabiti $R_d \left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$, buharın özgül gaz sabiti $R_v \left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$, ideal gaz sabiti $R \left(\frac{kJ}{K \cdot mol} \right)$ ve havanın molar kütesidir $M \left(\frac{kg}{mol} \right)$. İlgili parametreler Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. T_{son} hesaplaması için gerekli parametre değerleri

V_{oda}	T_{ilk}	m_{kuru}	C_p	R_d	R_v	R	M
480	298,15	600	1,005	0,2871	0,4615	$3,145 \cdot 10^{-4}$	$28,9647 \cdot 10^{-3}$

Türkiye'nin dört büyük şehri İstanbul, Ankara, İzmir ve Adana simülasyon için seçilmiştir. Bu dört şehir yerleşimin yoğun olmasının yanında farklı coğrafi konuma ve iklim özelliklerine sahiptir. Bu bakımdan

simülasyonun tutarlı sonuçları kolaylıkla gözlemlenebilir. Şehirlerin ortalama sıcaklıkları Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7. Şehirlerin K cinsinden ortalama sıcaklıkları.

	Haziran	Temmuz	Ağustos
İstanbul	296	298	299
Ankara	293	297	297
İzmir	298	301	300
Adana	299	302	302

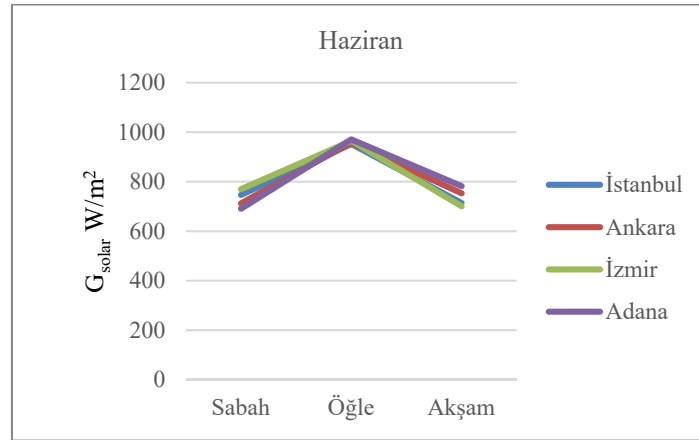
Şehirlerin büyüklükleri hane sayılarıyla ölçülmüştür. Hane sayıları elektrik tüketiminin ve karbon emisyonunun kestiriminin yapılmasında farklı büyüklükler sağlayarak karşılaştırmalı analiz yapılmasına imkân vermektedir. Hane sayıları Çizelge 8'de verilmiştir.

Çizelge 8. Şehirlerdeki hane sayıları.

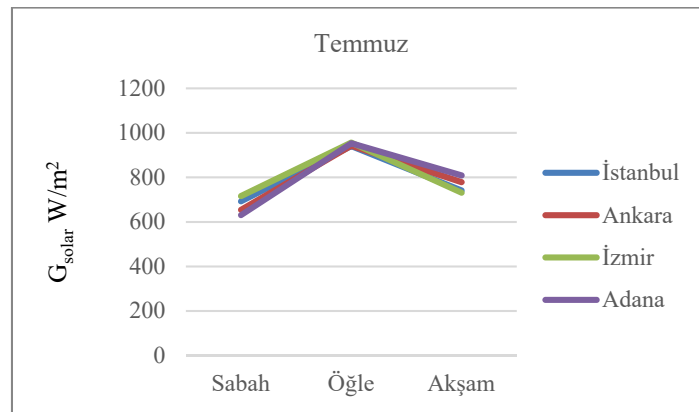
	Hane sayısı
İstanbul	3.886.890
Ankara	1.512.188
İzmir	1.263.312
Adana	535.719

4. BULGULAR

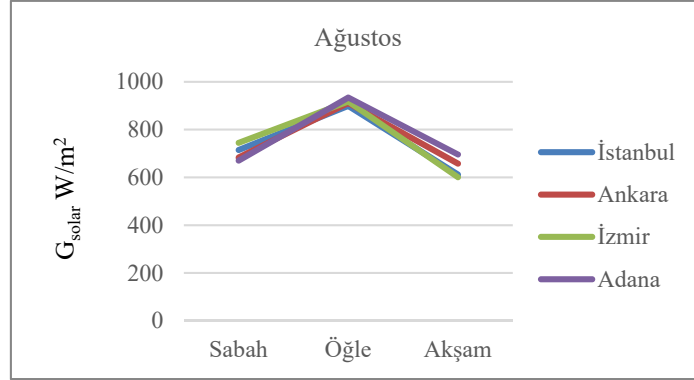
Her şehir için, yüzeye gelen toplam enerji G_{solar} ve tüm cam tipleri için odanın son sıcaklığını T_{son} hesaplanmıştır. T_{son} hesaplaması için gerekli olan $Q_{kazanç}$, anlık ısı kazancı G_{solar} kullanılarak hesaplanmıştır. G_{solar} hesaplamaları Şekil 1, 2 ve 3'te verilmiştir.



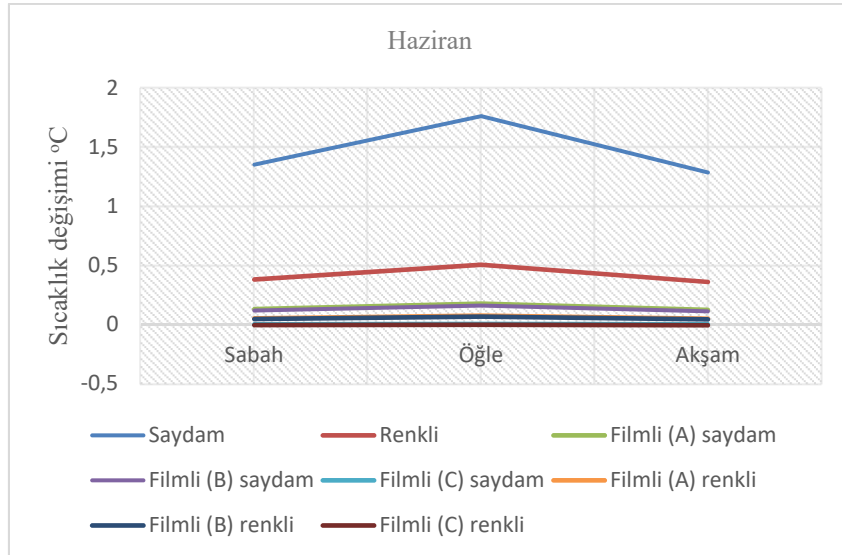
Şekil 1. 15 Haziran günü için anlık ısı kazancı G_{solar} hesaplamaları



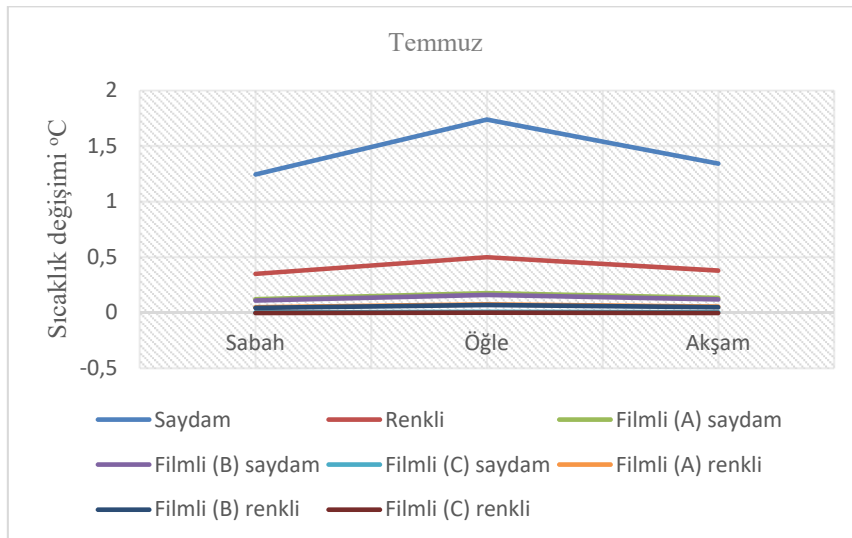
Şekil 2. 15 Temmuz günü için anlık ısı kazancı G_{solar} hesaplamaları

Şekil 3. 15 Ağustos günü için anlık ısı kazancı G_{solar} hesaplamaları

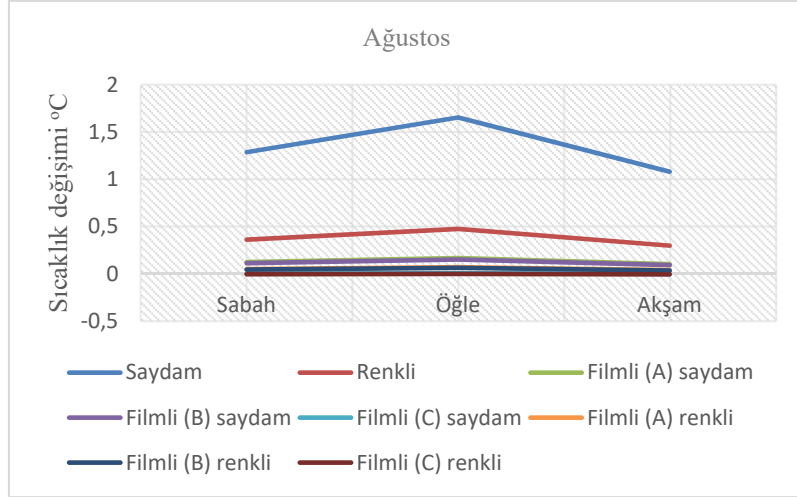
Hesaplanan G_{solar} değerleri güneş ışığının kuzey yarımküreye en dik açıyla geldiği haziran ayında buna paralel olarak en yüksek değerleri alıp ilerleyen aylarda değeri giderek azalmaktadır. Günün üç periyodu için hesaplama yapılmıştır. Sabah periyodu saat 9-12 aralığını; öğlen periyodu saat 12-15 aralığını ve akşam periyodu saat 15-18 aralığını kapsamaktadır.



Şekil 4. 15 Haziran günü için İstanbul'da son sıcaklığın referans sıcaklıktan farkı

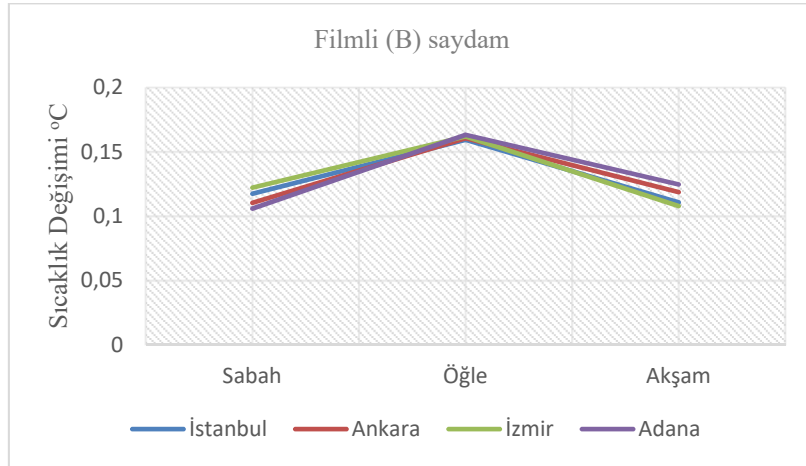


Şekil 5. 15 Temmuz günü için İstanbul'da son sıcaklığın referans sıcaklıktan farkı

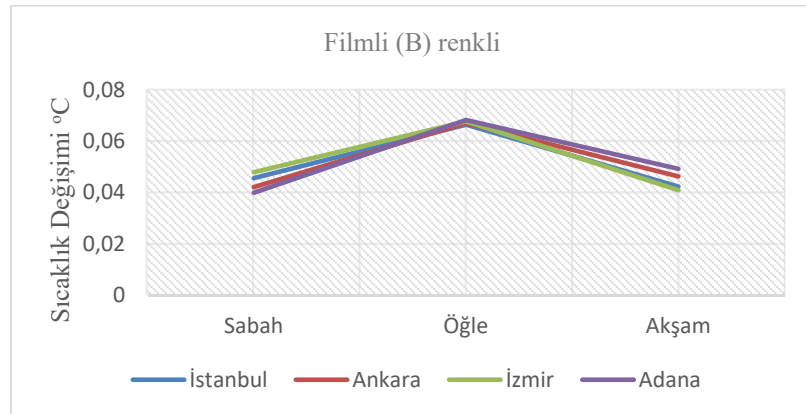


Şekil 6. 15 Ağustos günü için İstanbul'a göre son sıcaklığın referans sıcaklıktan farkı

Şekil 4, 5 ve 6'da 8 tipte cam filmi kullanımında sırasıyla 15 Haziran, 15 Temmuz ve 15 Ağustos günlerinde İstanbul coğrafi konumunda son iç hacim sıcaklığı ile referans sıcaklık arasındaki fark gösterilmiştir. Renkli camda saydam cama göre sıcaklık yükselişi daha düşük seviyelerdedir. Ancak film kullanımıyla birlikte sıcaklık yükselişleri ciddi miktarda azalmaktadır. C tipi film kullanımında sıcaklık farkının en düşük seviyede olduğu gözlemlenmektedir.

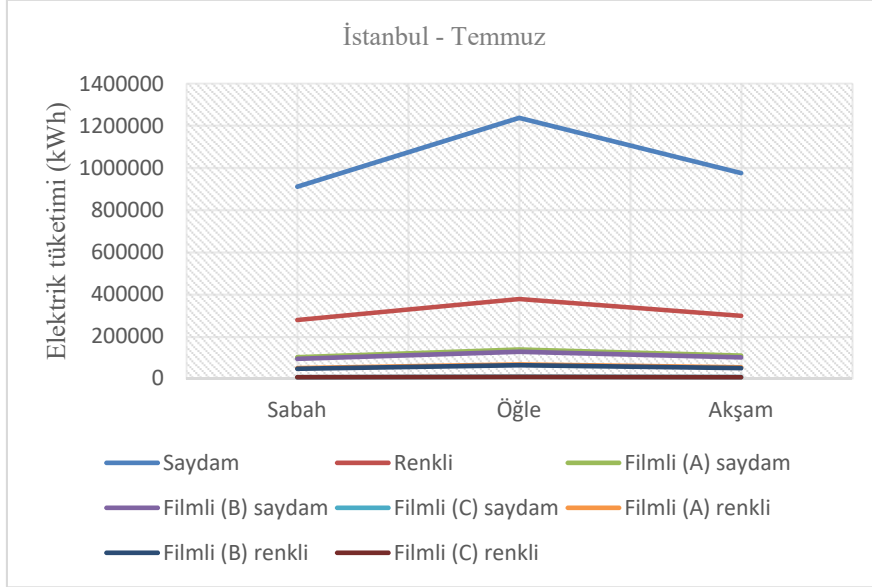


Şekil 7. 15 Haziran günü için saydam camda B tipi film kullanılması durumunda son sıcaklığın referans sıcaklıktan farkı

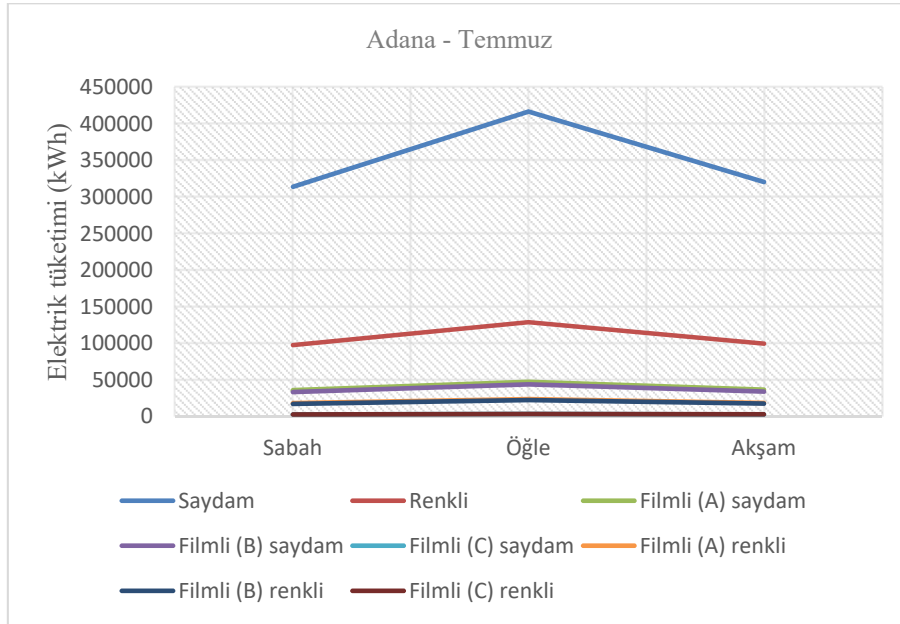


Şekil 8. 15 Haziran günü için renkli camda B tipi film kullanılması durumunda son sıcaklığın referans sıcaklıktan farkı

Şekil 7 ve 8’de sırasıyla saydam ve renkli cam üzerine B tipi film uygulamasında 15 Haziran gününün farklı periyotlarında farklı şehirler için son sıcaklık T_{son} ile referans sıcaklık T_S arasındaki fark verilmiştir. Renkli camda bu fark daha az olmakla birlikte film uygulamalarında sıcaklık farkının oldukça azaldığı gözlemlenmektedir. En yüksek ısı kazancı C tipi filmde görülmüştür.



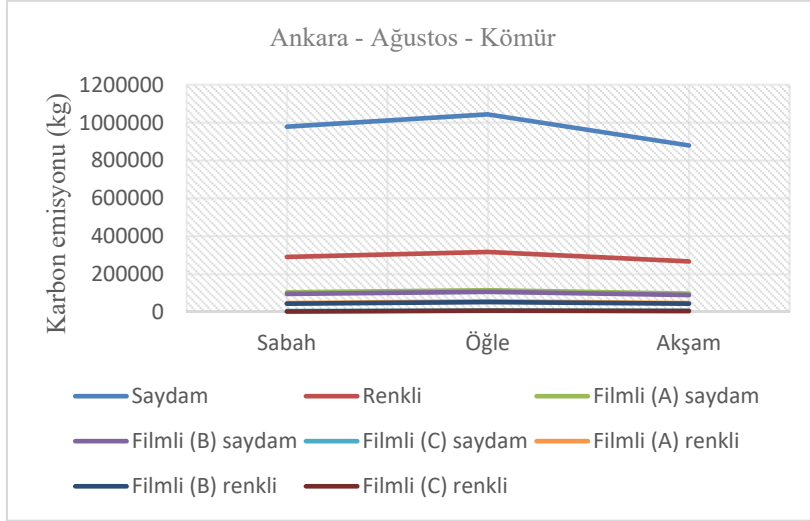
Şekil 9. İstanbul’da 15 Temmuz günü sıcaklık kontrolü sağlamak için gerekli enerji tüketimi



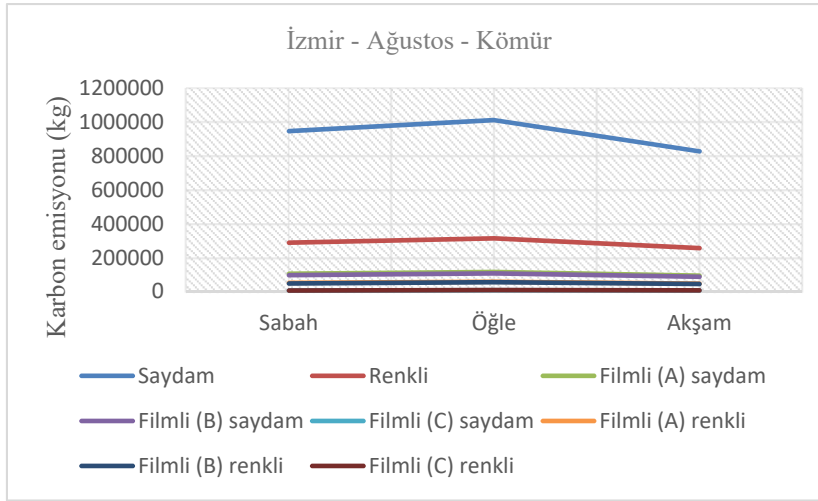
Şekil 10. Adana’da 15 Temmuz günü sıcaklık kontrolü sağlamak için gerekli enerji tüketimi

Şekil 9 ve 10’da İstanbul ve Adana’da 15 Temmuz gününde kestirilen son sıcaklığı referans sıcaklığa düşürmek için gerekli elektrik enerjisi tüketimi farklı cam filmi tipleri için verilmiştir. Görüldüğü üzere cam filmi uygulamalarında enerji tüketimi cam filmsiz duruma göre önemsiz sayılabilecek seviyelere düşmektedir.

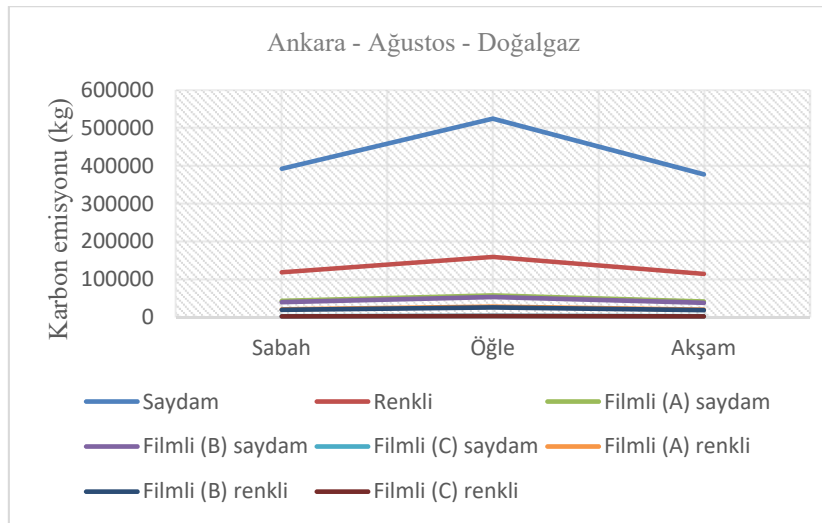
Şekil 11, 12, 13 ve 14’te Ankara ve İzmir’de enerji tüketimi sebebiyle ortaya çıkan karbon emisyonu Şekil 11 ve 12’de kömür kaynaklı üretim ve Şekil 13 ve 14’te doğalgaz kaynaklı üretim için verilmiştir. Şehirlerin coğrafi konumlarının farkı sebebiyle günün farklı periyotlarında karbon emisyonu miktarı farklılık gösterirken cam filmi uygulamalarında karbon emisyonu miktarında ciddi düşüşler gözlemlenmektedir.



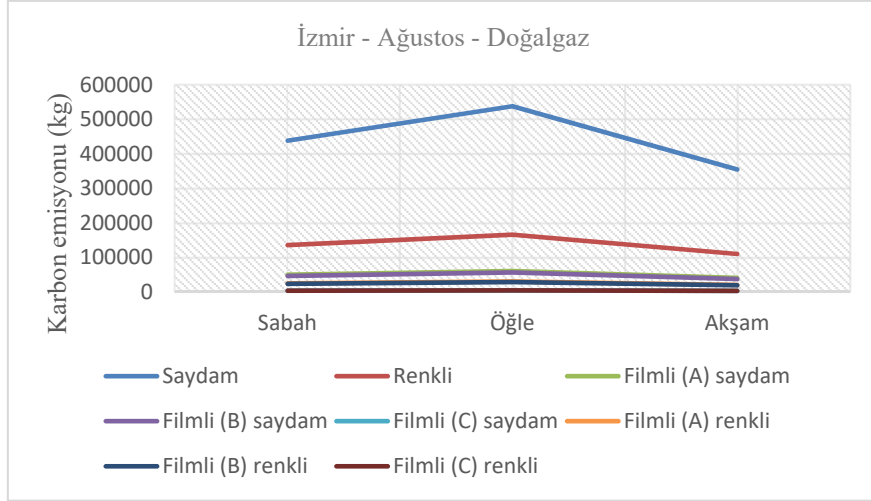
Şekil 11. Ankara'da 15 Ağustos günü sıcaklık kontrolü sağlamak için sebep olunan kömür kaynaklı karbon emisyonu



Şekil 12. İzmir'de 15 Ağustos günü sıcaklık kontrolü sağlamak için sebep olunan kömür kaynaklı karbon emisyonu



Şekil 13. Ankara'da 15 Ağustos günü sıcaklık kontrolü sağlamak için sebep olunan doğalgaz kaynaklı karbon emisyonu



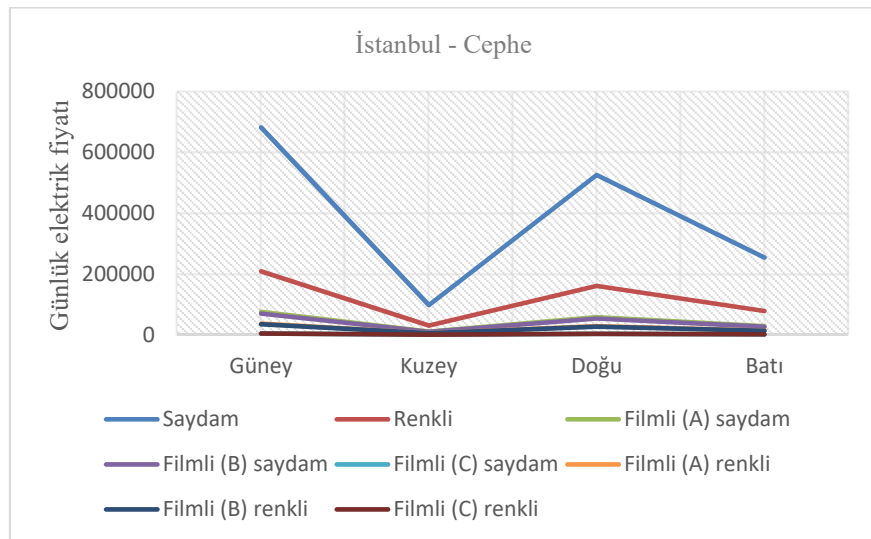
Şekil 14. İzmir’de 15 Ağustos günü sıcaklık kontrolü sağlamak için sebep olunan doğalgaz kaynaklı karbon emisyonu

Renkli cam uygulamasında saydam cama göre elektrik tüketimi ve karbon emisyonu bakımından avantaj sağlanırken cam filmli uygulamalarında tüketim ve emisyon önemli ölçüde azalmaktadır. Tüm cam filmli tipleri büyük oranda avantaj sunar ve özellikle C tipi film uygulamasında son sıcaklık ve referans sıcaklık arasındaki değişim en aza indirgenirken bu farktan dolayı tüketilen enerji miktarı ve karbon emisyonu buna paralel olarak azalmaktadır.

Çizelge 9’da farklı şehirlerde film uygulama maliyetleri verilmiştir. İstanbul en kalabalık şehir olduğu için buradaki film maliyeti en yüksek çıkmaktadır. Maliyet hesaplaması farklı zaman aralıkları için yapılmıştır. Film uygulamasının süreç içinde bağımsız bir maliyeti vardır. En az 5 yıllık garanti varsayımıyla maliyetin m² başına 40 \$ olacağı tahmin edilmektedir [32]. Bu nedenle, film uygulamasının maliyeti, çeşitli zaman aralıkları için 5 yıllık bir garanti varsayılarak tahmin edilmiştir.

Çizelge 9. Film uygulama maliyeti

	5 yıl (mn \$)	1 yıl (mn \$)	1 ay (mn \$)	1 gün (bin \$)	1 saat (bin \$)
İstanbul	2538,38	253,84	21,15	695,45	28,98
Ankara	987,55	98,76	8,23	270,56	11,27
İzmir	825,02	82,50	6,88	226,03	9,42
Adana	349,86	34,99	2,92	95,85	3,99



Şekil 15. İstanbul’da 15 Ağustos günü sıcaklık kontrolü sağlamak için tüketilen enerjinin maliyeti

Şekil 15'te farklı cephelere bakan bina yüzlerinde farklı cam filmi tipi uygulamalarında 15 Ağustos gününde faturaya yansıtacak toplam tüketim miktarı verilmiştir.

Çizelge 9'da İstanbul için verilen film uygulama günlük maliyetleriyle günlük elektrik tüketim maliyeti karşılaştırıldığında güney cephesinde cam filmi kullanımının özellikle fayda sağlayacağı söylenebilir. Karbon emisyonunda sağlanan büyük düşüş sayesinde dolaylı maliyetlerde uzun vadeli faydalar sağlanacağı aşikardır.

5. SONUÇLAR

Sonuçlar incelendiğinde, toplam güneş enerjisi öğle vaktinde en fazla, sabah ise en az miktardadır. Şehirler farklı konumlar ve nüfuslar göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Bu nedenle farklı iklim koşullarına sahiptirler ve sonuçları farklı nüfus ölçeklerinde gözlemlemeye olanak sağlar. Sonuçlar, şehirlerin ülkenin standart meridyenine göre konumları ve güneş ışığının geliş açısı doğrudan enleme ilişkili olduğu için ekvator dan uzaklığın etkisi nedeniyle karmaşık bir model izlemektedir. Karbon emisyonu açısından sonuçlar enerji tüketimleri ile paralellik göstermektedir. Ayrıca, artan nüfus değerleri ile emisyon farkı daha büyük hale gelmektedir. Yine emisyon ve enerji tüketimine paralel olarak, enerji fiyatı dikkate alındığında filmsiz saydam cam ile filmli cam arasında belirgin bir fark vardır. Cephelerin ana yönlere ortogonal baktığı varsayılarak dört cepheye farklı film türleri uygulandığında enerji tüketimi, sıcaklık etkisi, emisyon ve ekonomik sonuçlar gösterilmiştir. Film uygulamasının maliyeti göz önünde bulundurulduğunda, film uygulamasının başarılı bir yatırım olabilmesi için maliyet açısından etkin ve uygulanabilir olması gerekmektedir. Verilere bakılarak, film uygulama maliyetinin, C tipi saydam cam düşünüldüğünde, elektrik fiyatı açısından oldukça yüksek bir tasarruf sağladığı söylenebilir. Tasarruf edilen elektrik enerjisi maliyetinin, film uygulama maliyetinden önemli ölçüde daha düşük olduğu da anlaşılmaktadır. Ek olarak, düşük karbon emisyonunun küresel ısınmanın olası etkileri nedeniyle gelecekteki maliyetlerin yükünü hafiflettiği unutulmamalıdır.

6. KAYNAKLAR

1. Ulaş, A. (2010). Binalarda TS 825 hesap yöntemine göre ısı kaybı, yakıt tüketimi, karbondioksit emisyonu hesabı ve maliyet analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 155.
2. Bektaş, B. ve Aksoy, U.T. (2005). Soğuk iklimlerdeki binalarda pencere sistemlerinin enerji performansı. *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der.*, 17(3), 499-508.
3. Gago, E.J., Muneer, T., Knez, M. & Köster, H. (2015). Natural light controls and guides in buildings. Energy saving for electrical lighting, reduction of cooling load. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1-13.
4. Rezaei, S.D., Shannigrahi, S. & Ramakrishna, S. (2017). A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 159, 26-51.
5. Cuce, E. (2018). Accurate and reliable U-value assessment of Argon-filled double glazed Windows: a numerical and experimental investigation. *Energy and Buildings*, 171, 100-106.
6. Aycam, I. (1999). Farklı malzemelerle üretilen pencere tiplerinin ısı performanslarının incelenmesi ve enerji etkin pencere seçimi. *1999 IV. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi (TESKON'99)*, Türkiye, 61-73.
7. Cuce, E. & Riffat, S.B. (2015). A state-of-the-art review on innovative glazing technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 41, 695-714.
8. Huang, Y., Niu, J.-L. & Chung, T.-M. (2014). Comprehensive analysis on thermal and daylighting performance of glazing and shading designs on office building envelope in cooling-dominant climates. *Appl. Energy*, 134, 215-228.
9. Wang, L. & Greenberg, S. (2015). Window operation and impacts on building energy consumption. *Energy Build*, 92, 313-321.
10. Meszaros, R., Merle, B., Wild, M., Durst, K., Göken, M. & Wondraczek, L. (2012). Effect of thermal annealing on the mechanical properties of low-emissivity physical vapor deposited multilayer-coatings for architectural applications. *Thin Solid Films*, 520, 7130-7135.
11. Li, C., Tan, J., Chow, T.T. & Qiu, Z. (2015). Experimental and theoretical study on the effect of window films on building energy consumption. *Energy Build*, 102, 129-138.

12. Yousif, K. M. (2012). Control of solar heat gain to reduce the energy consumption of buildings in Iraq. *2012 Proceedings of the World Renewable Energy Forum*, Denver, CO, USA, 13-17.
13. Yin, R., Xu, P. & Shen, P. (2012). Case study: energy savings from solar window film in two commercial buildings in Shanghai. *Energy Build*, 45, 132-140.
14. Dussault, J.-M., Gosselin, L. & Galstian, T. (2012). Integration of smart windows into building design for reduction of yearly overall energy consumption and peak loads. *Solar Energy*, 86, 3405-3416.
15. Chen, B., Ji, Y. & Xu, P. (2012). Impact of window shading devices on energy performance of prototypical buildings. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, 3(11), 5994-5999.
16. Vanhoutteghem, L., Skarning, G.C.J., Hvii, C.A. & Svendsen, S. (2015). Impact of façade window design on energy, daylighting and thermal comfort in nearly zero-energy houses. *Energy Build*, 102, 149-156.
17. Hee, W., Alghoula, M.A., Bakhtyar, B., Elayeba, O., Shameri, M.A. & Alrubaih, M.S. (2015). The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 42, 323-343.
18. Yang, Q., Liu, M., Shu, C., Mmereki, D., Hossain, U. & Zhan, X. (2015). Impact analysis of window-wall ratio on heating and cooling energy consumption of residential buildings in hot summer and cold winter zone in China. *J. Eng.*, 538254, 1-17.
19. Jelle, B.P., Gustavsen, A., Nilsen, T.N. & Jacobsen, T. (2007). Solar material protection factor (SMPF) and solar skin protection factor (SSPF) for window panes and other glass structures in buildings. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(4), 342-354.
20. Gure, N. & Yilmaz, M. (2016). Alternative solution via car window filming implementation to combat global warming and resulted benefits around geographic Europe and the European Union. *Int. J. Global Warming*, 10(1-3), 263-290.
21. Cengel, Y.A. & Boles, M.A. (2007). *Thermodynamics: an engineering approach*. McGraw-Hill, New York, 1009.
22. Maleki S.A.M., Hizam H. & Gomes C. (2017). Estimation of hourly, daily and monthly global solar radiation on inclined surfaces: models re-visited. *Energies*, 10, 134.
23. Spencer, J.W. (1971). Fourier series representation of the position of the sun. *Applied Optics*, 10, 2569-2571.
24. Badescu, V. (2002). 3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces. *Renew. Energy*, 26, 221-233.
25. Gueymard, C. (1993). Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data. *Sol. Energy*, 51, 385-397.
26. ASHRAE, (1997). Handbook: fundamentals, Chapter 29, *Fenestration*, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta GA.
27. Iqbal, M. (1983). An introduction to solar radiation. Academic Press, Toronto, ON, Canada, 408.
28. Picard, A., Davis, R.S., Glaser, M. & Fujii, K. (2008). Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007). *Metrologia*, 45, 149-155.
29. Wang, N., Zhang, J. & Xia, X. (2013). Energy consumption of air conditioners at different temperature set points. *Energy and Buildings*, 65, 412-418.
30. U.S. Energy Information Administration, State Electricity Profiles, U.S. Profile, Table 5 and 7, <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11>, Erişim tarihi: 21.12.2023, 2023, Washington DC.
31. Winckler, L., & DeBusk, S. (2012). Final report on work performed under agreement. (DE-FOA-0000115).
32. Cengel, Y.A. & Ghajar, A. (2010). *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. McGraw-Hill, New York, 991.

