


ENERJİ VERİMLİ BİNALAR İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR VE ÇEVRE DOSTU PENCERE VE CAM TEKNOLOJİLERİ: SON GELİŞMELER VE UYGULAMALAR

Pinar Mert CUCE * 

Tamer GUCLU ** 

Ahmet B. BESİR ** 

Erdem CUCE *** 

Alınma: 09.05.2019 ; düzeltme: 22.07.2019 ; kabul: 27.09.2019

Öz: Bu çalışmada enerji verimli düşük/sıfır karbon binalar için geliştirilen sürdürülebilir ve çevre dostu pencere ve cam teknolojilerinin kapsamlı bir analizi sunulmaktadır. Ortalama ısı transfer katsayısı (U-value), güneş ısı kazanç katsayısı, görünür ışık geçirgenlik katsayısı, UV ve IR ışık bloklama kapasitesi, termal konfor, maliyet ve ticarileşebilme potansiyeli gibi temel performans kriterleri üzerinden söz konusu yeni nesil pencere ve cam teknolojileri incelenmekte ve konvansiyonel ürünlerle karşılaştırılmaktadır. Pencere bina kabuğundan gerçekleşen toplam ısı kayıplarının yaklaşık %60'ından sorumlu olduğu için, çalışmalar çoğunlukla ısı direnci yüksek ürün geliştirme üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu manada vakum cam teknolojisi oldukça iyimser sonuçlar ortaya koymaktadır. Vakum camlar $0.50 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'in altında U değerlerine sahiptir. Bu değer hava ya da argon dolgululu çok katmanlı klasik pencere teknolojilerinde $2.00\text{-}2.70 \text{ W/m}^2\text{K}$ aralığındadır. Isıl dirençli fotovoltaik cam uygulamaları (TRPVG) yaklaşık $1.19 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'lik bir U değeri ile hem çift katmanlı camlara göre iki kat daha iyi ısı yalıtım ortaya koymakta hem de birim m^2 'den yaklaşık 100 W elektrik üretimine imkân tanımaktadır. Low-e camlar sert iklim koşullarında pencere orijinli ısı kayıpların etkin minimizasyonunda anahtar rol oynamaktadır. Aerogel camlar görsel kaliteyi etkilese de sınırlı bir et kalınlığında ortaya koyduğu benzersiz ısı direnç açısından farkındalık oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Binalar, enerji verimliliği, pencereler, U değeri, güneş ısı kazancı

Sustainable and Environmental Friendly Window and Glass Technologies for Energy Efficient Buildings: Recent Developments and Applications

Abstract: This study presents a comprehensive analysis of sustainable and environmentally friendly window and glass technologies developed for energy efficient low / zero carbon buildings. The new generation of window and glass technologies are examined over the basic performance criteria such as average heat transfer coefficient (U-value), solar heat gain coefficient, visible light transmission coefficient, thermal comfort, cost and commercialization potential. As the windows are responsible for

* Department of Energy Systems Engineering, Faculty of Engineering, Recep Tayyip Erdogan University, Zihni Derin Campus, 53100 Rize, Turkey

** Low/Zero Carbon Energy Technologies Laboratory, Faculty of Engineering, Recep Tayyip Erdogan University, Zihni Derin Campus, 53100 Rize, Turkey

*** Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Recep Tayyip Erdogan University, Zihni Derin Campus, 53100 Rize, Turkey

İletişim Yazarı: Erdem CUCE(erdem.cuce@erdogan.edu.tr)

the approximate %60 of heat loss from the building's shell, the works are mostly concentrated on the development of products with high thermal resistance. In this context, vacuum glass technology reveals quite optimistic results. Vacuum glasses have U values below 0.50 W/m²K. This value is in the range of 2.00-2.70 W/m²K in air or argon filled multi-layered classical window technologies. Thermal resistance photovoltaic glass applications (TRPVG) provide a U value of about 1.19 W/m²K. And thus, it provides twice as good thermal insulation compared to double-layer glass, and allows the production of approximately 100 W of electricity per m². Low-e glasses play a key role in the efficient minimization of window-based thermal losses in harsh climatic conditions. Although aerogel glasses affect visual quality, it is a very impressive technology because it offers a unique thermal resistance at a limited wall thickness.

Keywords: Buildings, energy efficiency, windows, U value, solar heat gain

1. GİRİŞ

Günümüzde enerji tasarrufu ve karbon salınımı, binalar için büyük bir öneme sahiptir. Bina yapı malzemelerinden biri olan pencereler, binalarda meydana gelen ısı kayıplarının yaklaşık % 60'ını oluşturmaktadır. Bu yüzden pencereler, binalardaki enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik çalışmalarda büyük bir potansiyele sahiptir ve bu konuda çok sayıda çalışma mevcuttur (Gago ve diğ., 2015, Jelle ve diğ., 2012).

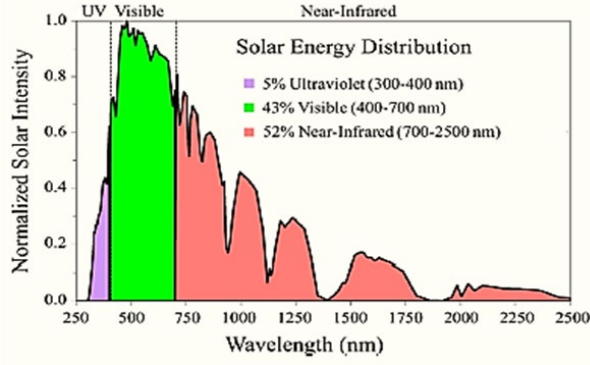
Pencereler, sahip oldukları estetik görünüş, havalandırma imkânı, pasif güneş enerjisi kazanımı, aydınlatma ve acil durumlarda binayı terk edebilme gibi özelliklerinden dolayı binaların önemli birleşenlerindedir. Bu özelliklerinden dolayı, bina cephelerinde kapladıkları alanlar gün geçtikçe artmaktadır (Cuce, 2018, Rezaei ve diğ., 2017). Pencerelerin ayrıca bina orijinli sera gazı salınımlarının azaltılmasında da etkin bir çözüm yolu olduğu düşünülmektedir. Hiç şüphe yok ki, küresel ısınma dünyayı tehdit eden en önemli sorunlardan birisidir ve bilim komisyonları, küresel ısınmanın temelinde insan aktivitelerine bağlı olarak atmosfere yayılan sera gazının olduğunu sıklıkla dile getirmektedirler (Cuce ve Cuce, 2013).

Pencereler diğer yapı malzemelerine kıyasla yüksek U değerlerine sahip oldukları için kış ve yaz mevsimlerinde binaların ısıtılması ve soğutulması için tüketilen enerji miktarında ciddi bir paya sahiptir (Cuce, 2014). Pencerelerin ısı yalıtım performanslarının artırılmasıyla bina enerji maliyetleri düşecek ve binalarda yüksek enerji tasarrufu sağlanmış olacaktır (Cuce, 2018). Bu amaçla 2000'li yılların başından itibaren bina standartlarını revize etmişlerdir. Bina yapımında kullanılan malzemelerin enerji verimliliğinin artırılmasını sağlayan bu standartlarla, yeni binaların ısıtılması için gerekli olan maksimum enerji ihtiyaçları önemli ölçüde azaltılmıştır. Birleşik Krallık'ta binalar için yıllık ısıtma yükünün 46 kWh/m²'den daha az olması hedeflenmektedir. Bu sebeple, binalarda kullanılan pencerelerin U değerinin 1.20-1.40 W/m²K veya daha aşağı olması ve böylece hedeflenen yıllık enerji tüketim miktarına ulaşabilmesi amaçlanmaktadır. Ne yazık ki, geleneksel pencere sistemlerini kullanarak yüksek termal standartlara ulaşılması pek mümkün değildir. Mevcut teknoloji ile hali hazırda çok enerji tüketilmekte ve bunun sonucunda karbon salınımı gün geçtikçe artmaktadır (Cuce ve diğ., 2018, Cuce ve Cuce, 2019).

Bina sakinlerinin görsel ve termal konforunu artıran verimli pencerelerin üretilmesinde uygun teknolojilerin belirlenmesi önemlidir. Bu hususta, İngiliz Fenestrasyon Derecelendirme Konseyi tarafından pencerelerin performansını değerlendirmek için Enerji İndeks olarak tanımlanan bir metot uygulanmaktadır. Pencerenin enerji indeksi hesaplanırken pencereyi oluşturan çerçeve, cam ve conta gibi bütün birleşenler incelenmektedir. Enerji indeksini hesaplamada üç faktör hesaba katılmaktadır bunlar sırasıyla termal iletim (U_w), güneş ısı kazanç katsayısı(g), ve hava sızdırmazlık (I_a) değeridir (Cuce ve Riffat, 2015). Bazı çalışmalarda ise bunlara ilave olarak görünür geçirgenlik ve salınım katsayısı pencerenin performans analizine dâhil edilmektedir (Jelle ve diğ., 2007, Cuce ve Riffat, 2015). Binaların enerji tüketimini azaltmak için yeni pencere teknolojilerinin sahip olması gereken özellikler şu şekilde ifade edilebilir: Mümkün mertebe düşük U değeri, uygun g-değeri, yüksek hava sızdırmazlığı ve ışık geçiş düzeyi.

2. KONVANSİYONEL PENCERE VE CAM TEKNOLOJİLERİ

Güneş ışınları, pencerenin camına ulaştığında camın optik özelliklerine bağlı olarak ya iletilecek, ya geri yansıtılacak ya da absorbe edilecektir. Güneş ışınları görülebilir ve görülemeyen ışınımlardan oluşmaktadır ve geniş bir dalga boyuna sahiptir. Şekil 1’de gösterildiği üzere güneş ışınlarının %50 den daha fazla bir kısmı görünmez ışıklardan oluşmaktadır.



Şekil 1:

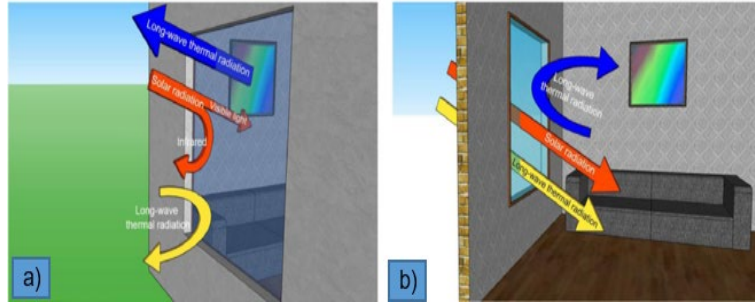
Güneş ışığı spektrumu (Rezaei ve diğ., 2017)

Güneş ışınlarının görülmeyen kısmının kontrolünün yeni nesil pencere teknolojilerinden faydalanarak yapılmasıyla bina enerji tüketim miktarı ciddi bir oranda azaltılabilir (Cuce ve Riffat, 2015). Pencere ve hane sakini arasında gerçekleşen ısı transferi üç farklı yolla meydana gelmektedir (uzun dalga ısı değişimi, kısa dalga güneş ışınımı ve hava akımı). Uzun-dalga ısı değişimi, insan vücudu ile pencerenin iç yüzeyi arasında gerçekleşen ısı değişimidir. Kısa-dalga güneş ışınımı pencereden geçen ışınımın insan vücuduna etkisini ifade eder. Hava akımı ise pencere yüzeyinde soğuk hava drenajının neden olduğu hava ceryanıdır (Fanger, 1970, Chaiyapinunt ve diğ., 2005, Heiselberg, 1994). Pencere hane sakininin termal konforunun çözümünde birincil etken olmamasına rağmen, iç ortam sıcaklığının yüksek ve düşük olmasına bağlı olarak pencerenin kişinin termal konforunun iyileşmesi adına yapmış olduğu pozitif etkiler ihmal edilemez (Cuce ve Riffat, 2015).

Pencerelerden ışığa ile meydana gelen ısı transferi gayet yüksek miktarlarda olup araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Mevsime bağlı olarak, güneş ışınımına dayalı kayıp ve kazançlar binaların soğutma ve ısıtma yükünü etkilemektedir. Pencerenin enerji performansı termal ve optik parametrelere bağlıdır. Optik parametreler ışığa geçişi ve ışık geçişi olmak üzere iki ana bölüme ayrılır (Cuce ve Riffat, 2015). Bazı araştırmacılar, pencerelerin performansını saptayabilmek için bahsedilen parametrelerin kullanılmasıyla elde edilen geliştirilmiş enerji standartlarını oluşturmuşlardır (Roos ve Karlsson, 1994, Karlsson ve diğ., 2001, Yohanis ve Norton, 1999). Araştırmacıların diğer bir kısmı ise, termal iletim seviyesi, g-değeri ve hava sızdırmazlık düzeyi gibi parametreleri iklim koşullarını da göz önüne alacak şekilde yeni enerji modelleri oluşturmuşlardır (Duer ve diğ., 2002, Maccari ve Zinzi, 2000).

Gün ışığı, bilindiği üzere doğal bir ışık kaynağıdır ve hane sakinlerine daha rahat bir görüş konforu ve huzurlu bir iç mekân sunmaktadır. Bununla beraber, gün ışığının efektif kullanımıyla iç mekânın aydınlatılmasında kullanılan enerji miktarının azaldığı görülmektedir (Li ve Lam, 2000, Li ve diğ., 2005, Li ve diğ., 2009, Krarti ve diğ., 2005). Bu nedenlerden dolayı yeni yapılan binalarda iç mekânın doğal yollarla aydınlatılabilmesi adına pencerelerin kullanımı artmıştır (Bansal ve diğ., 1994). Lakin piyasada bulunan mevcut pencerelerin ısı

transfer katsayılarının yüksek olması cam cephe uygulamalarında binanın soğutma ve ısıtma yüklerinin artmasına sebebiyet vermiştir (Cuce ve Riffat, 2015). Camların yetersiz optik özelliklerinden dolayı yazın yüksek ısı kazanımları, kışın da bunun tam tersi olarak aşırı ısı kayıpları görülmektedir. İdeal pencereler farklı iklim koşullarına bağlı olarak farklı özelliklere sahip olmalıdırlar. Sıcak iklim bölgesindeki pencereler kızılötesi ışınları (hem güneşten hem de çevreden meydana gelen) yansıtmaları gerekmektedir ve ayrıca görülebilir ışık iç mekânı aydınlatmalıdır. Aşırı soğuk kış koşullarının hüküm sürdüğü bölgelerde ise, pencereler UV dışında tüm dalga boyundaki ışınların iç mekâna girişini kolaylaştırmalıdır. Buna ilaveten Şekil 2’de gösterildiği gibi iç mekândaki tüm uzun dalga boyundaki ışınları da geri yansıtmalıdır (Long ve Ye, 2014).

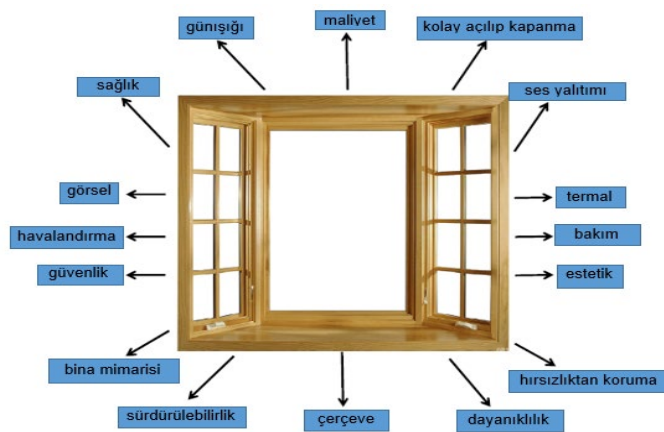


Şekil 2:

Pencerelerden beklenen optik özellikler: a. yaz durumu b. kış durumu (Long ve Ye, 2014)

3. PENCERE TASARIMI VE PERFORMANS PARAMETRELERİ

Evsel amaçlı kullanılan birçok pencere tasarımı vardır ve Şekil 3'te gösterildiği gibi, bu pencerelerin tasarımını ve performansını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu bölümde konutlar için pencerelerin enerji verimliliği kriterlerine odaklanılmıştır. Pencerenin camı ve çerçevesi yüksek iletkenliğe sahiptir ve genel enerji verimliliğinin belirlenmesinde önemli faktörler olarak kabul edilir.

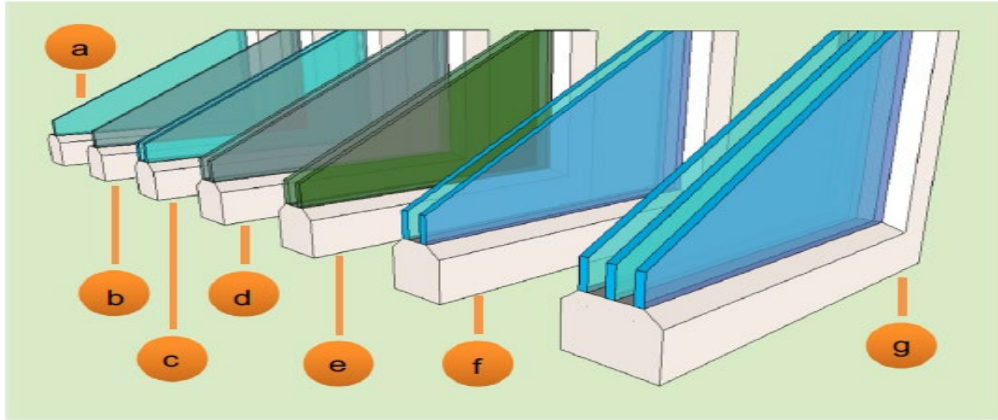


Şekil 3:

Pencere tasarımını ve performansını etkileyen pencere parametreleri (Cuce ve Riffat, 2015)

4. GELENEKSEL CAM MALZEMELERİ VE KAPLAMALARI

Konut sektöründe kullanılmakta olan pencere teknolojileri Şekil 4'te gösterilmektedir (Cuce ve Riffat, 2015). Yapılan bir araştırmada, farklı iklim koşullarında bulunan birbirinden farklı camların enerji performansları incelenmiş; ahşap ve vinil olmak üzere iki tip pencere çerçevesi kullanılmıştır. Analizlerde güneş enerjisi ısı kazanç katsayısından yararlanılmıştır. Bu analizler yürütülürken çerçevenin etkisi ve görünür geçirgenliği (visible transmittance) ihmal edilmemiştir (Cuce ve Riffat, 2015). Görünür geçirgenlik, bir cam malzemeden geçen spektrumun görünür kısmındaki ışık miktarı olarak ifade edilir. Görünür geçirgenliğe etki eden faktörler cam türü, cam katman sayısı ve cam kaplamaları olarak sıralanabilir. Araştırmada kullanılan on farklı cam türünden elde edilen veriler Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 4:

Pencere için çeşitli cam teknolojileri: a. tek cam, b. gri tonlu tek cam, c. çift şeffaf cam, d. gri renk tonlu çift cam, e. seçici tonlu çift cam, f. low-e kaplamalı çift cam ve g. low-e kaplamalı üçlü cam (Cuce ve Riffat, 2015)

Tablo 1. Çeşitli cam tiplerinin performans parametreleri (Cuce ve Riffat, 2015)

Pencere	Cam tipi	U değeri	Isı kazanç katsayısı	Görünür geçirgenlik
A	Tek, açık	0.84	0.64	0.65
B	Tek, renkli	0.84	0.54	0.49
C	Çift, açık	0.49	0.56	0.59
D	Çift, renkli	0.49	0.47	0.44
E	Çift, yüksek renkli	0.49	0.39	0.50
F	Çift, yüksek ısı kazançlı, low-e kaplamalı	0.37	0.53	0.54
G	Çift, orta ısı kazançlı, low-e kaplamalı	0.35	0.44	0.56
H	Çift, düşük ısı kazançlı, low-e kaplamalı	0.34	0.30	0.51
I	Üçlü, orta ısı kazançlı, low-e kaplamalı	0.29	0.38	0.47
J	Üçlü, düşük ısı kazançlı, low-e kaplamalı	0.28	0.25	0.40

İngiltere'de, "Geleceğin Evi: Konfor Evi" projesi ile yüksek performanslı cam konsepti ele alınmıştır. Comfort House'un ısıtma sistemi bulunmamasına rağmen, kış aylarında ılık ve yaz

aylarında serin kalmaktadır. Bahsi geçen evin yalıtımı, İngiltere'deki mevcut bina standartlarından üç kat daha iyi bir yalıtıma sahiptir. Hane sakinlerinden, evde kullanılan elektrikli cihazlardan ve güneşten elde edilen ısı korunarak tüm bir yılı kaplayan konforlu bir sıcaklık sağlanmaktadır. Süper yalıtımlı hava geçirmez çerçevelerle donatılmış üç katmanlı cam kullanılan Komot-House'ta pencerelere ait ortalama U değeri $0.73 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak hesap edilmiştir (Cuce ve Cuce, 2018).

Mevcut piyasada kullanılmakta olan pencere teknolojilerinde en çok tercih edilen ürün çok katmanlı cam uygulamalarıdır. Çok katmanlı cam uygulamalarında çift cam teknolojileri oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Çift cam uygulamasının ortalama U değeri 1.80 ile $2.60 \text{ W/m}^2\text{K}$ bandında değişmektedir. Bu değişimin sebebi sıklıkla hava tabakası kalınlığı ve low-e kaplama özellikleri ile açıklanmaktadır. Buna ilave olarak, üç katmanlı camların minimum U değeri ise yaklaşık olarak $1.00 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'dir. Bu rakamlar bina standartlarında belirlenen hedeflerin çok uzağındadır. Yenilikçi pencere teknolojilerinin ortaya çıkabilmesi için konvansiyonel pencere teknolojilerinin pozitif ve negatif yönlerinin tam anlamıyla bilinmesi gerekmektedir. Bu bölümde, konvansiyonel camla ilgili malzemeler ve kaplamalar incelenmiştir. İlerleyen bölümlerde şeffaf cam, renkli cam, düşük emisyonlu kaplamalar, çok bölmeli camlar, vakumlu camlar, gazlı camlar ve filmler ele alınmıştır.

5. AKILLI CAM TEKNOLOJİLERİ

Akıllı cam teknolojisi, güneş enerjisinden istenilen seviyede aydınlatma veya ısıtma elde edebilmek için, camın görünür ve termal geçirgenlik özelliklerini değiştirmeyi sağlayan benzersiz bir teknolojidir. Elektrik akımı, voltaj, ısı ve ışık gibi harici uyarılar ile bazı malzemelerin optik özelliklerinin değiştirilmesi esasına dayanır (Baetens ve diğ., 2010b). Akıllı cam teknolojileri öncelikli olarak pasif ve aktif olmak üzere iki türe ayrılabilir.

5.1. Pasif Cam

Bu camlar için, ısıya maruz kaldıklarında termal özellikleri değişen malzemeler kullanılır. Uygulama alanı açısından oldukça geniş bir konseptte sahiptirler.

5.1.1. Termokromik Cam

Termokromik pencere kavramı, görüntü kaybı olmaksızın, renk tonunu değiştirmek için cam panel üzerinde nano kalınlıkta kaplamayı temel alır (Cuce ve Riffat, 2015). Termokromik malzemelerin renk ve optik özellikleri sıcaklık değişimleriyle değişmektedir (Parkin ve Manning, 2006). Termokromik kaplı pencereler, ışık geçirgenliğini ve ısı kazancını kontrol ederek binalarda önemli oranlarda enerji tasarrufu sağlarlar (Zhou ve Milbrandt, 2014). En yaygın kullanılan termokromik malzeme vanadyum oksittir ancak polimerler gibi başka malzemeler de kullanılmaktadır (Granqvist, 2014b, Chen ve diğ., 2012).

5.1.2. Faz Dönüştürücü Malzeme Entegreli Camlar

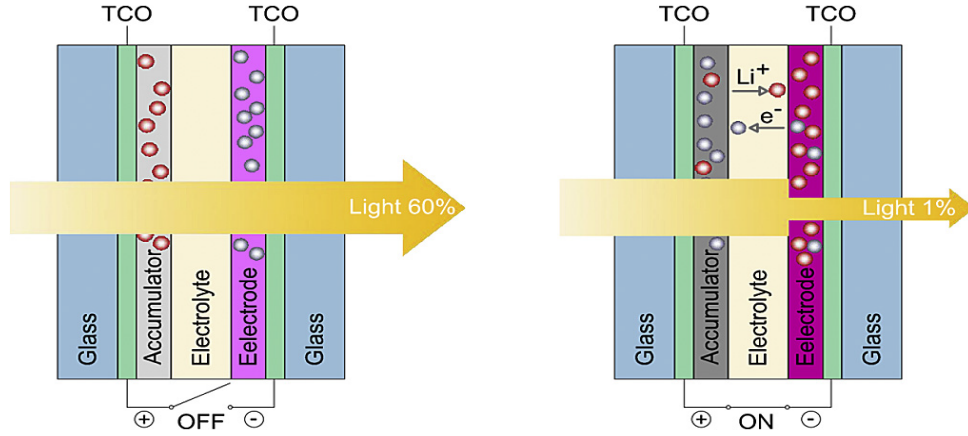
Faz dönüştürücü malzemeler, özellikle son yıllarda binalarda enerji tüketiminin azaltılmasını sağlayarak binaların enerji verimliliğini artırmada öncelikli ilgi alanı haline gelmiştir. Faz dönüştürücü malzemeler, ısı kaynağından gelen enerjiyi emerek katı halden sıvı hale döndürürler (Farid ve diğ., 2004). Sıcaklık düştüğünde ise, daha önce depolanmış olan enerjiyi bırakarak sıvı halden katı hale geçerler (Hasnain, 1998). Çeşitli faz dönüştürücü malzeme türleri arasında parafin, düşük maliyetli olması sebebiyle daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, düşük ısıl iletkenlik değeri ve faz dönüşümü sırasında büyük hacim değişimi göstermesi, bina uygulamalarında kullanımını sınırlamaktadır (Demirbas, 2006, Baetens ve diğ., 2010a).

5.2. Aktif Cam

Aktif cam sistemleri, kullanıcının talebini karşılamak için elektrik alanı, ısı veya iyon difüzyonu gibi harici bir uyarı kullanarak camın optik özelliklerinin ayarlanması prensibine dayanır (Casini, 2018).

5.2.1. Elektrokromik Cam

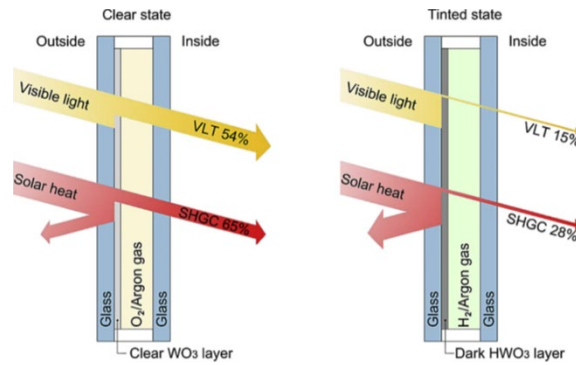
Elektrokromik malzemenin rengi ve optik özellikleri uygulanan küçük bir DC voltajı ile değiştirilebilir. Bu sayede, görünür ve kızıl ötesi spektrumların geçirgenliğinde bir değişim meydana gelir (Goia ve diğ., 2015). İki çeşit elektrokromik malzeme vardır. Organik elektrokromikler oksidasyon süreçleri sırasında renklerini değiştirebilen moleküllerdir. İnorganik elektrokromikler ise çoğunlukla metal oksitlerden elde edilir (Cupelli ve diğ., 2009, Granqvist, 2014a, Granqvist, 2014b). Basit bir elektrokromik cam şeması Şekil 5'te gösterilmiştir (Casini, 2018).



Şekil 5:
Elektrokromik cam şeması (Casini, 2018)

5.2.2. Gazkromik Cam

Gazkromik cam, tungsten oksit in seyreltilmiş hidrojene maruz bırakılmasıyla 1 mm'den daha ince gözenekli bir katman oluşturularak elde edilir ve böylece camın rengi ve saydamlığı değiştirilir. Şeffaflık seviyesi hidrojen hacmine bağlıdır (Wittwer ve diğ., 2004, Ghosh ve diğ., 2010). Gelişen tüm aktif cam teknolojileri arasında, elektrokromiklerden sonra, piyasada bulunan ürünlerde en çok kullanılan gazkromiklerdir. Elektrokromiklerle karşılaştırıldığında, daha basit bir montaj ve üretim süreci nedeniyle daha ucuzdur ve daha hızlı çalıştırma süreleri vardır (en az 10 kat daha hızlıdır), ancak şu anda daha dar bir çalışma alanına sahiptirler ve kurulum için ek boru tesisatı gereklidir (Delalat ve diğ., 2016). Gazkromik cam şeması Şekil 6'de gösterilmiştir (Smith ve Granqvist, 2010)



Şekil 6:
Gazkromik cam şeması (Smith ve Granqvist, 2010)

5.2.3. Asılı Parçacıklı Cam

Asılı parçacıklı camlar elektroaktif camlardır. Asılı parçacıklı camlara bir AC voltajı uygulandığında, rastgele saçılmış ve yönlendirilmiş parçacıklar hizalanır ve pencere şeffaf hale gelir. Elektrik alan yokluğundaysa ışık iletimi azalır. Genellikle 3-5 katmana sahiptirler ve pencere şeffaflığı akışkan film kalınlığına ve parçacık yoğunluğuna bağlıdır (Lampert, 1993, Baetens ve diğ., 2010b). Elektrokromik pencerelerden farklı olarak bu pencerelerin saydamlığı farklı seviyelerde ayarlanabilir ve tepki süresi çok daha hızlıdır. Bununla birlikte, enerji tüketimi elektrokromik pencerelerden daha fazladır. Sonuç olarak enerji tüketimi açısından, pencerelerin çoğu zaman opak olarak kullanıldığı yerler için tercih edilirler. Görünür geçirgenlik, voltajın açık durumunda yaklaşık % 55, kapalı durumda ise % 1.5'tir (Lemarchand ve diğ., 2014). Asılı parçacıklı camlar binalarda, havacılık ve uzay endüstrisinde sıkça kullanılmaktadır ve Şekil 6'da bu teknolojinin kullanıldığı örnekler gösterilmiştir (Rudolph ve diğ., 2009).



Şekil 6:

Asılı parçacıklı cam kullanılan yerler (Rudolph ve diğ., 2009)

5.2.4. Nanokristal Cam İçi Kompozitler

Nanokristal cam içi kompozitler, şu anda elektrokromik camların genel performanslarını geliştirmek için en umut verici teknolojiyi temsil etmekte olup, camların şeffaflıklarının renkli durumdan ayrı olarak ve bağımsız bir şekilde düzenlenebilmesine olanak tanımaktadır (Llordes ve diğ., 2013).

5.2.5. Elastomer-Deformasyon Ayarlanabilir Pencere

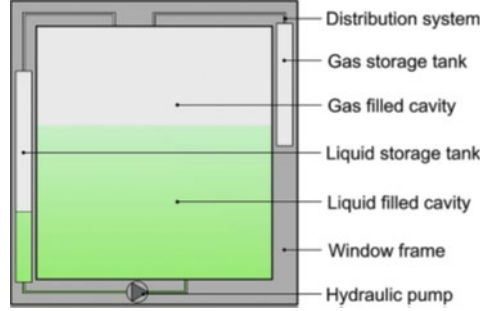
Elektrokromik camlara alternatif olarak ortaya çıkan yeni bir dinamik cam teknolojisi, elastomer-deformasyonlu ayarlanabilir pencerelerdir ve LCD camlara benzer özellik gösterir. Bu teknoloji, camın şeffaflığını ayarlayarak, ışık saçılımını kontrol etmek için camlı yüzeyin geometrik deformasyonunu kullanır. Nano boyutları (birkaç nm uzunluğunda ve 90 nm çapında) nedeniyle, nanoteller gözle görülmezler ve ışık geçişini önemli ölçüde değiştirmezler, ancak elektromanyetik uyarılara karşı son derece reaktiftirler. Pencereye voltaj uygulandığında, nanoteller enerji yüklenir ve elastomer katmanları sıkıştırarak ve deforme ederek coulombic kuvvetleri vasıtasıyla birbirlerine doğru hareket etme eğilimi gösteren elektrotlara dönüşürler (Shian ve Clarke, 2016).

5.2.6. Elektrokinetik Pıksel Pencere Teknolojisi

Elektrokinetik pıksel pencere teknolojisi, gelen görünür ışığın renk tonunun ve sıcaklığının kontrol edilebilmesini sağlar. Sistem, LCD ekranlarda ve elektrokromik camlarda bulunanlardan farklı olarak iki düzlemsel elektrot ile çalışmaktadır. Tamamlayıcı renkler ise karşıt elektrik yükleri ile karakterize edilir (Mukherjee ve diğ., 2015).

5.2.7. Akışkan Doldurulmuş Pencere Teknolojisi

Dinamik pencerelere tamamen alternatif bir yaklaşım olarak geliştirilmiştir. Elektrokimyasal sistemlere göre daha iyi bir maliyet elde etmeyi amaçlamaktadır. Isıl regülasyon açısından oldukça verimli sistemlerdir. Sistemin şeması Şekil 7’de gösterilmiştir (Casini, 2018).



Şekil 7:

Akışkan doldurulmuş pencere teknolojisi (Casini, 2018)

Elektrokromik camlara kıyasla binalarda kullanılmaya başlanan yeni aktif dinamik cam teknolojilerinin temel avantajları ve dezavantajları Tablo 2’de özetlenmiştir (Casini, 2018).

Tablo 2. Dinamik cam teknolojilerinin temel avantajları ve dezavantajları (Casini, 2018)

Teknoloji	Avantaj	Dezavantaj
Gazokromik Cam	Daha düşük maliyet Daha hızlı tepki verme süresi	Görünür ve kızılötesi ışık için daha dar kontrol aralığı Elektrolizör ve boru gereksinimi
Nanokristal Cam İçi Kompozitler	Geniş kontrol aralığı Daha düşük maliyet	
Elektrokinetik piksel teknolojisini	Hem renk hem ışık modülasyonu Daha düşük maliyet	Görünür ve kızılötesi ışık için daha dar kontrol aralığı
Elastomer-Deformasyon Ayarlanabilir Pencere	Anlık anahtarlama süresi Daha düşük maliyet Renk nötrlüğü	Görünür ve kızılötesi ışık için daha dar kontrol aralığı
Akışkan Doldurulmuş Pencere	Geliştirilmiş dayanıklılık Daha düşük maliyet Daha hızlı geçiş süreleri	Görünür ve kızılötesi ışık için daha dar kontrol aralığı Ağır boru ve tankların gereksinimi Kısmen dolu pencerenin pürüzlü görünümü

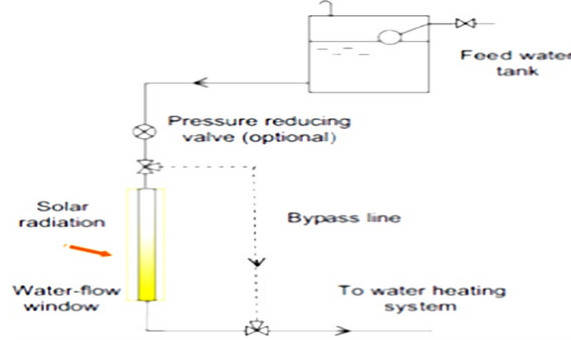
6. PENCERE TEKNOLOJİLERİ İÇİN YENİLİKÇİ ÇÖZÜMLER

Her cam teknolojisinin termal geçirgenliği, ışık geçirgenliği, maliyet, görünüm, temizlenme kolaylığı, bakım kolaylığı gibi kendine özgü özelliklerine bağlı olarak bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Bu bakımdan, temel olarak farklı cam konseptlerinin bir kombinasyonu

olan çok işlevli pencereleri geliştirmek için alternatif çözümler aranmaktadır (Chow ve diğ., 2010).

6.1. Güneş Emici Pencere

Sistem, Şekil 8'de gösterildiği gibi bir besleme suyu tankından su akışı yoluyla penceredeki boşluğun içinde emilen ısının uzaklaştırılması fikrine dayanmaktadır. Sistemdeki su akışı ile cam bölgenin sıcaklığı düşürülerek, odanın daha az ısınması sağlanır ve dolayısıyla klimaların tükettiği elektrik miktarı etkili bir şekilde azaltılabilir (Chow ve diğ., 2010).



Şekil 8:

Güneş emici pencere şeması (Chow ve diğ., 2010)

6.2. Çift Taraflı Pencere

Çift taraflı pencereler, çoğunlukla dış yüzeyleri yüksek yansıtıcı kaplama malzemeleriyle kaplanmış çift camlı pencerelerdir. Güneş ısısını çok fazla absorbe etmedikleri için, yaz aylarında verimli bir şekilde kullanılmaktadırlar. Kış dönemindeyse güneş ısısını daha fazla toplayabilmek için tersine dönerler, ancak bu pencerelerin kış performansları, yaz performanslarından daha düşüktür (Feuermann ve Novoplansky, 1998).

6.3. Saydam Yalıtım Malzemesi Dolgulu Pencere

Hem ışık geçirgenliğinde oluşacak kayıpları en aza indirmek hem de termal enerji ihtiyaçlarını azaltmak için yapı elemanı olarak saydam yalıtım malzemeleri kullanımını ele alır. İki cam levha arasına sıkıştırılmış cam veya plastik kılcal kısımlardan veya bal peteği yapılarından oluşur. Bu sistemler, özellikle parlamayı ve gölgelemeyi azaltırken ışığı iyi dağıtır (Lien ve diğ., 1997)

6.4. Havalandırma Çift Camlı Pencere

Havalandırılmalı çift camlı pencere, dışarıdan gelen temiz havanın, yüzdürme etkisinin bir sonucu olarak yükseldiği ve bir havalandırma yoluyla yaşam alanına yönlendirildiği bir kanal oluşturan iki paralel pencereden oluşmaktadır. Bu pencere teknolojisinin çalışma prensibi, dinamik yalıtım yaklaşımına benzer olarak düşünülebilir. Özellikle kış mevsiminde, havalandırılmalı çift camlı pencereler, gelen taze hava dışarıdan içeriye ön ısıtma ile alındığından binaların ısınma ihtiyacını azaltmada oldukça verimlidirler (Carlos ve diğ., 2010).

7. PV CAM TEKNOLOJİLERİ

Yenilenebilir enerji teknolojileri, binaların enerji tüketiminin azaltılmasında ve sıfır-karbonlu binaların geliştirilmesinde etkin rol oynamaktadır. PV cam, elektrik üretiminin yanı sıra soğutma, ısıtma ve yapay aydınlatma açısından enerji tüketimini azaltan yenilikçi bir teknolojidir (Skandalos ve Karamanis, 2015).

Mimarlar, cam endüstrisindeki gelişmelerden dolayı, camı bina cephelerinde yaygın olarak kullanılan önemli bir yapı malzemesi olarak ele almaktadırlar. Cam cephe uygulamaları gün

içerisindeki yapay aydınlatma talebini azaltmaktadır ve bununla beraber yapay aydınlatmada tüketilecek olan enerji miktarını da azaltarak enerji tasarrufu sağlamaktadır. Lakin bina cephelerinde camın yaygın kullanımı, yaz aylarında binanın aşırı ısınması, klima yüklerinin artması, görsel ve termal konforun azalması ve kış aylarında termal kayıpların artması gibi problemlere neden olmaktadır. Binaların ortalama soğutma yükünün %33'ü pencere kaynaklı güneş ısı kazancına atfedilmektedir (Manz ve Menti, 2012).

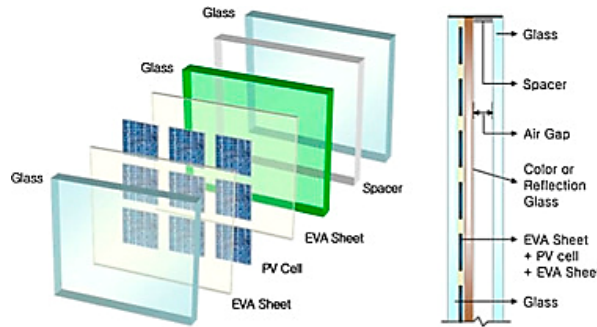
Geliştirilen farklı teknolojiler arasında, bina entegreli PV camlar, binaların yüzey alanının büyük olması ve PV hücrelerin güneş ışınlarını elektrik enerjisine dönüştürebilmelerinden dolayı önemi diğer teknolojilere göre biraz daha ağır basmaktadır. Düşük maliyetli PV teknolojileri ile binalarda temiz enerji üreterek enerji maliyetleri ve hava kirliliği dikkate değer ölçüde azaltılabilir. PV hücreler geleneksel yapı malzemelerinin yerini almakta ve aktif şekilde bu hücrelerden faydalanılmaktadır. PV hücreler genellikle çatı, dış duvar ve tavan pencerelerinde kullanılmalarına rağmen, cam entegreli PV sistemleri de piyasada kendi pazarını oluşturmaktadır (Skandalos ve Karamanis, 2015).

Sonuç olarak bina entegreli PV camlar elektrik üretimin yanında bina ısıtma ve soğutma yükleri ve yapay aydınlatma ile bağlantılı olan yenilikçi bir teknoloji olarak ele alınmaktadır (Norton ve diğ., 2011). Mimari yapılarda kullanılan geleneksel camların geçirgenlik oranı % 55 ile % 90 arasında değişmektedir (Tuchinda ve diğ., 2006). Yarı-geçirgen PV teknolojisi binalarda gölgeleme ve elektrik üretimi yaparken ışık geçirgenliğini azaltmaktadır.

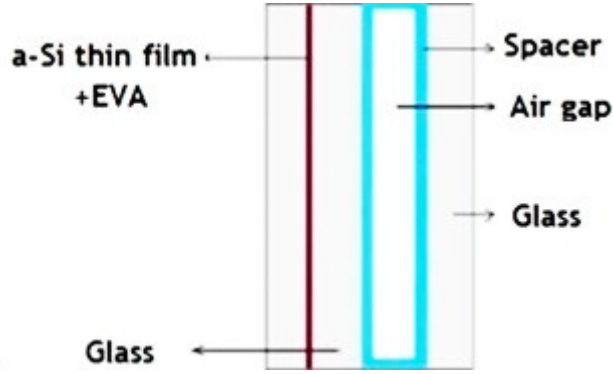
Kristal silikonlu güneş hücreleri üzerinde olabildiğince çok çalışma yapılmış bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Binalarda geleneksel cam ürünlerinin yerine yarı-geçirgen c-Si PV hücrelerin kullanıldığı literatürde yer almaktadır ve bu alanda kayda değer çalışmalar yapılmıştır. Bu teknolojiye c-Si güneş hücreleri saydam cam panellerinin arasına etilen venil asetat filmle beraber Şekil 9'da gösterildiği gibi konulmaktadır.

Bu teknolojinin verimi % 16 ile % 22 arasında değişmektedir ve yüksek maliyetli silikon tabakadan dolayı bu teknolojinin pahalı olduğu düşünülmektedir. Buna ilave olarak, kullanılan hücreler opak olduğundan dolayı aydınlanma açısından binanın iç ortamını gölgelendirmektedir ve ayrıca dış görünüşü de kısıtlamaktadır. Diğer yandan, ışık geçirgenlik özelliği ve modüller arası sıcaklık farkı elektrik üretimini etkilediği gibi binanın soğutma ve ısıtma yükünü de etkilemektedir (Skandalos ve Karamanis, 2015, Miyazaki ve diğ., 2005)

PV cam teknolojisinde, PV verimi düşürmeden doğal ışığın geçişini artırmak için daha hafif ve yarı-saydam ince film PV hücreler, bilhassa amorf silikon bazlı güneş hücreleri üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Amorf silikon güneş hücreleri Şekil 10'da gösterildiği gibi camın üzerine entegre edilebilmektedir. Teknoloji maliyeti büyük ölçekli üretimde ciddi bir oranda düşüş görülmektedir. İnce film teknolojisinin çift cam uygulamalarıyla üretilen ve piyasada bulunan ticari ürünlerin saydamlık oranı yaklaşık olarak %50'den daha fazladır. Bu yarı geçirgen a-Si PV cam teknolojisi, c-Si PV camlarla kıyaslandığında, iç mekânı gün ışığı ile aydınlatmada daha başarılı olduğu görülmektedir (Chae ve diğ., 2014).



Şekil 9:
Karakteristik bir c-Si PV camın şematik gösterimi (Chae ve diğ., 2014)



Şekil 10:

Yarı-saydam a-Si PV camın şematik gösterimi (Skandalos ve Karamanis, 2015)

Yarı-saydam a-Si PV hücrelerin, geleneksel çift katmanlı cephe uygulamalarına kıyasla daha uygun bakım maliyetlerine sahip olmaları ve gölgeleme sorununa sundukları çözümler çift cam endüstrisinin ilgisini çekmektedir. Bu ilginin nedeni, PV hücrenin çift cama kolay bir şekilde entegre olmasıdır (Stegou-Sagia ve diğ., 2007, Iqbal ve Al-Homoud, 2007, Hien ve diğ., 2005). Skandalos ve Karamanis (2016) yaptıkları çalışmada aynı şartlar altında bulunan a-Si PV ve c-Si PV cam ürünlerinin termal ve optik davranışlarını incelemiştir. Görünür bölgedeki geçirgenlik incelendiğinde maksimum geçirgenlik standart camla kıyaslandığında sırasıyla % 42 (a-Si PV) ve % 14 (c-Si PV) olarak tespit edilmiştir. PV camların sıcaklık farkı normal camla kıyaslandığında sıcaklık farkı açısından en iyi performansı c-Si PV cam teknolojisi göstermesine rağmen, a-Si PV cam teknolojisi ışınım altındaki en iyi homojen sıcaklık dağılımını göstermiştir. Bununla birlikte, a-Si PV camın U değeri c-Si PV camın U değerinden yaklaşık olarak % 10 daha düşüktür. Binanın cephesinin a-Si PV cam ile kaplanması ve c-Si PV cam ile kaplanmasıyla üretilen elektrik enerjisinin bina enerji tasarrufuna katkısı sırasıyla 531 kWh ve 482 kWh olarak hesap edilmiştir.

Li ve diğ. (2009) a-Si PV modüllerinin hem saha ölçümlerini hem de simülasyon analizlerini gerçekleştirmiştir. Yarı saydam PV panellerin binanın yıllık elektrik ve azami soğutma yükünü sırasıyla 1203 MWh ve 450 kW azaltabileceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmalara ilave olarak diğer çalışmalar da şunu göstermektedir ki yarı saydam PV cam geleneksel camlara kıyasla %19 ile 59 arasında enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu enerji tasarrufunu sağlayan en büyük etken yapay aydınlatma ve soğutma yükünün önemli ölçüde azaltılmasıdır (Olivieri ve diğ., 2014).

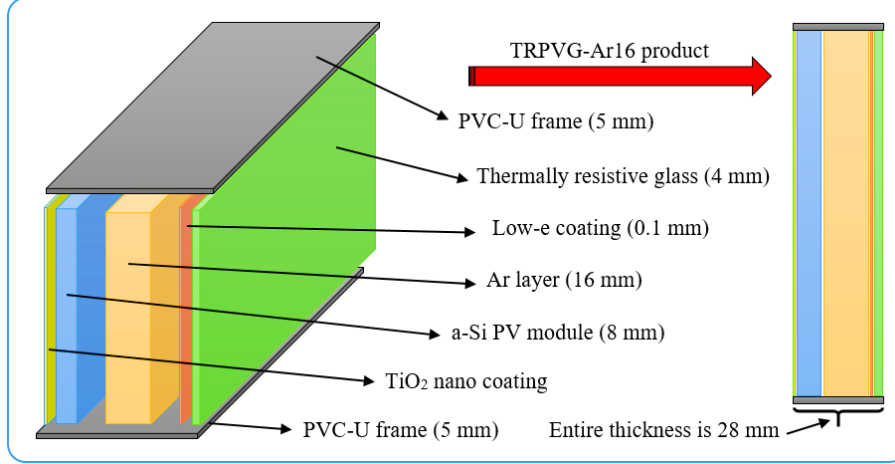
Zhang ve diğ (2016) yaptığı çalışmada dört farklı cam türünün Hong Kong'da bulunan bir binaya entegre edilmesi halinde binanın enerji performansındaki değişiklikler incelenmiştir. Tek katmanlı cam ve çift katmanlı camlarla kıyaslandığında, yarı-saydam a-Si PV cam kullanarak elde edilen yıllık elektrik tasarrufu % 16 ile % 18 arasında değişmektedir. Low-e kaplamalı cam ile PV camın toplam enerji performansları incelendiğinde her iki cama ait enerji performanslarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Lakin yarı saydam PV camın enerji verimliliği diğer camlara göre daha yüksektir.

8. YENİLİKÇİ CAM TEKNOLOJİLERİ ALANINDAKİ SON GELİŞMELER

8.1. TRPVG (Thermally resistive PV glazing)

TRPVG, 216M531 numaralı TÜBİTAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) projesi kapsamında geliştirilen yeni nesil bir PV cam uygulamasıdır. Çalışmada Şekil 11'de konstrüksiyon detayları verilen TRPVG teknolojisinin optimum tasarım ve işletme parametrelerin elde edilmesi amaçlanmıştır. TRPVG için inert gaz olarak argon

seçilmiştir ve optimum argon kalınlığı CFD analizleri ile belirlenmiştir. Buna göre 16 mm argon kalınlığında TRPVG yaklaşık $1.19 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'lık bir U değerine sahiptir. TRPVG a-Si PV hücreler kullanmaktadır ve hücrelerin üstü TiO_2 nano kaplama ile kaplıdır. Bu sayede kendi kendini temizleyebilme özelliğine sahiptir. TRPVG standart test koşulları altında birim m^2 'den 100 W 'ın üzerinde elektrik üretme potansiyeline sahiptir.

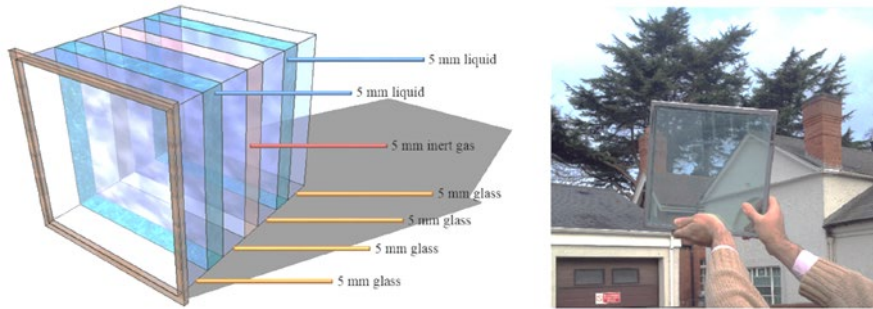


Şekil 11:

Yeni nesil TRPVG teknolojisinin şematik gösterimi (Cuce, 2019)

8.2. Sıvı Dolgulu Cam (solar pond glazing)

Sıvı dolgulu cam teknolojisinde aşırı sıcak iklim bölgelerinde pasif ısı kazancını minimum yapabilmek için optimize edilmiş sıvı ve inert gaz tabakalarından oluşmuş kompozit bir yapı mevcuttur. Yapı içerisindeki inert gaz tabakaları konstrüksiyona ısı direnç temin ederken sıvı katmanlar ise ısı regülasyon sağlar. Şekil 12'de karakteristik tip bir sıvı dolgulu camın detayları ve görüş etkinliği gösterilmektedir (Cuce ve Cuce, 2017). 35 m kalınlığındaki prototip numunenin U değeri $2.10 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak hesaplanmıştır. Öte yandan 4 adet 5 mm kalınlığında cam, iki adet 20 mm kalınlığında su ve bir adet 20 mm kripton kullanan tasarımın U değerinin yaklaşık $0.40 \text{ W/m}^2\text{K}$ olacağı belirtilmiştir.



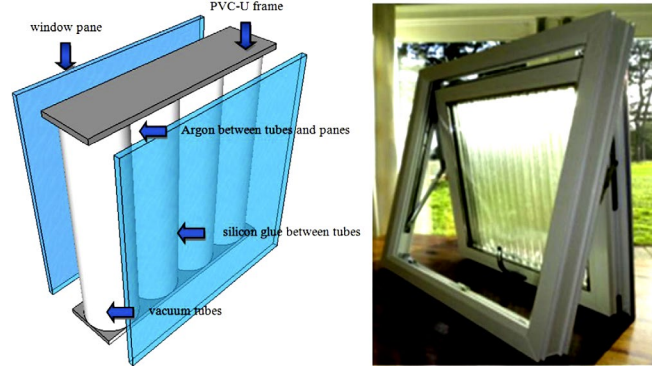
Şekil 12:

Yeni nesil sıvı dolgulu cam teknolojisinin şematik gösterimi (Cuce ve Cuce, 2017)

8.3. Vakum Tüp Cam (vacuum tube glazing)

Vakum tüp camlar ayrı ayrı vakumlanmış tüplerin yan yana getirilmesi ve tüpler arası boşluğun uygun bir inert gazla doldurulması neticesinde oluşturulan yeni nesil bir cam teknolojisidir. Tüp çapı ve tüp kalınlığına bağlı olarak vakum tüp camın U değeri hatırı sayılır

biçimde değişir (Cuce, 2014, Cuce ve Riffat, 2015, Cuce ve diğ., 2016). İlaveten vakum tüp camın U değeri, tüpler içerisindeki vakum basıncının önemli bir fonksiyonudur. Tüpler içerisinde iletim ve taşınım etkilerinin tamamen ortadan kalkabilmesi için vakum basıncının 0.1 Pa'nın altında olması gerekmektedir. Geliştirilen vakum tüp cam Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 13:
Vakum tüp cam teknolojisinin şematik gösterimi (Cuce, 2014)

60 mm tüp çapı için vakum tüplü camın U-değeri $0.40 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu çap çalışmada optimum tüp çapı olarak tayin edilmiştir. Vakum tüp camın en büyük dezavantajı görüş kalitesini düşürmesidir. Bu sebeple daha çok ofis binalarında kullanılması tavsiye edilmektedir.

9. SONUÇLAR

Bu çalışmada yeni nesil pencere ve cam teknolojileri ile ilgili kapsamlı bir literatür analizi sunulmuştur. Cam endüstrisindeki hemen hemen tüm teknolojiler belirli performans parametreleri üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu parametreler temel olarak ortalama U değeri, görünür ışık geçirgenliği, güneş ısı kazanç katsayısı, maliyet ve kullanılabilirliktir. Literatür analizinden elde edilen bazı karakteristik sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Çok katmanlı camlar ve bunlar içerisinde hava ve argon dolgululu çift camlar mevcut pazarda hala en yüksek paya sahiptir. Hava ya da argon dolgululu çift camların U değeri, düşük/sıfır karbon bina standartlarını karşılayabilecek düzeyde değildir ve sıklıkla $2.00 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'in üzerindedir.
- Low-e kaplamalı çift cam teknolojileri U değeri açısından standart çift cam teknolojilerine göre daha iyi bir performans sunmaktadır.
- Aerogel cam ısı direnç açısından emsalsiz bir teknolojidir. Ancak yüksek maliyeti teknolojinin önündeki en büyük engeldir.
- Vakum cam yüksek ısı direnç ve yüksek görünür ışık geçirgenliği açısından caziptir. Ancak cam katmanları arasındaki vakum zaman içerisinde azalmakta bu da ortalama U değerini hatırı sayılır ölçüde etkilemektedir.
- Vakum tüp camlarda optimum tüp basıncı 0.1 Pa'dır. Bu değer iletim ve taşınım etkilerinin tamamen ortadan kalkması için sınır değeri teşkil eder.
- Vakum tüp camlar görsel estetik açısından fakir ısı direnç açısından oldukça zengin performans karakteristiğine sahiptir.
- Aşırı sıcak iklim bölgelerinde yüksek ısı dirençli ve termal regülasyonlu cam teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır ve bu bağlamda sıvı dolgululu camlar emsalsiz performans çıktıkları sunmaktadır.
- Sıvı dolgululu camlarda U değeri $0.40 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'in altına düşebilmektedir.

- TRPVG m²'den 100 W'ın üzerinde elektrik üretebilen, kendi kendini temizleyebilen ve ısı direnç açısından oldukça iyimser (U değeri yaklaşık 1.19 W/m²K) bir teknolojidir.
- Yakın gelecekte farklı cam teknolojilerinin üstün özelliklerinin tek bir sistemde toplandığı kompozit cam yapıların pazarda söz sahibi olacağı tahmin edilmektedir.

TEŞEKKÜR

Sorumlu yazar bu çalışmaya 216M531 numaralı proje kapsamında sunduğu maddi desteğinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

1. Baetens, R. Jelle, B. P. ve Gustavsen, A. (2010a) Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review, *Energy and Buildings*, 42(9), 1361–1368. doi:10.1016/J.ENBUILD.2010.03.026
2. Baetens, R. Jelle, B. P. ve Gustavsen, A. (2010b) Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(2), 87–105. doi:10.1016/J.SOLMAT.2009.08.021
3. Bansal, N. K. Garg, S. N. Lugani, N. ve Bhandari, M. S. (1994) Determination of glazing area in direct gain systems for three different climatic zones, *Solar Energy*, 53(1), 81–90. doi:10.1016/S0038-092X(94)90608-4
4. Carlos, J. S. Corvacho, H. Silva, P. D. ve Castro-Gomes, J. P. (2010) Real climate experimental study of two double window systems with preheating of ventilation air, *Energy and Buildings*, 42(6), 928–934. doi:10.1016/J.ENBUILD.2010.01.003
5. Casini, M. (2018) Active dynamic windows for buildings: A review, *Renewable Energy*. doi:10.1016/j.renene.2017.12.049
6. Chae, Y. T. Kim, J. Park, H. ve Shin, B. (2014) Building energy performance evaluation of building integrated photovoltaic (BIPV) window with semi-transparent solar cells, *Applied Energy*. doi:10.1016/j.apenergy.2014.04.106
7. Chaipapinunt, S. Phueakphongsuriya, B. Mongkornsaksit, K. ve Khomporn, N. (2005) Performance rating of glass windows and glass windows with films in aspect of thermal comfort and heat transmission, *Energy and Buildings*, 37(7), 725–738. doi:10.1016/J.ENBUILD.2004.10.008
8. Chen, X. Lv, Q. ve Yi, X. (2012) Smart window coating based on nanostructured VO₂ thin film, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 123(13), 1187–1189. doi:10.1016/J.IJLEO.2011.07.048
9. Chow, T. Li, C. ve Lin, Z. (2010) Innovative solar windows for cooling-demand climate, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(2), 212–220. doi:10.1016/J.SOLMAT.2009.09.004
10. Cuce, E. (2014) Development of innovative window and fabric technologies for low-carbon buildings, *Ph.D. Thesis, The University of Nottingham, 2014*.
11. 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. doi:10.1016/J.ENBUILD.2018.04.036
12. Cuce, E. Besir, A. B. ve Cuce, P. M. (2018) Low/Zero-Carbon Buildings for a Sustainable Future, *Low Carbon Transition - Technical, Economic and Policy Assessment: Low*

Carbon Transition - Technical, Economic and Policy Assessment, InTech.
doi:10.5772/intechopen.74540

13. Cuce, E. ve Cuce, P. M. (2018) Smart retrofit solutions of buildings toward a low carbon world, *Energy Research Journal*, 9, 78–87.
doi.org/ 10.3844/erjsp.2018.78.87
14. Cuce, E. ve Cuce, P. M. (2013) A comprehensive review on solar cookers, *Applied Energy*, 102, 1399–1421. doi:10.1016/J.APENERGY.2012.09.002
15. Cuce, E. ve Cuce, P. M. (2017) Solar Pond Window Technology for Energy-Efficient Retrofitting of Buildings: An Experimental and Numerical Investigation, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(5), 1909–1916. doi:10.1007/s13369-016-2375-0
16. Cuce, E. ve Cuce, P. M. (2019) Optimised thermal insulation performance of a novel photovoltaic (PV) glazing technology called TRPVG through a comprehensive CFD research: An experimental validation, *Energy Reports*, 5, 1185–1195.
doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.046
17. Cuce, E. Cuce, P. M. ve Young, C. H. (2016) Energy saving potential of heat insulation solar glass: Key results from laboratory and in-situ testing, *Energy*.
doi:10.1016/j.energy.2015.12.134
18. Cuce, E. ve Riffat, S. B. (2015) A state-of-the-art review on innovative glazing technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:10.1016/j.rser.2014.08.084
19. Cupelli, D. Nicoletta, F. P. Manfredi, S. Filpo, G. De ve Chidichimo, G. (2009) Electrically switchable chromogenic materials for external glazing, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(3), 329–333. doi:10.1016/J.SOLMAT.2008.11.010
20. Delalat, F. Ranjbar, M. ve Salamati, H. (2016) Blue colloidal nanoparticles of molybdenum oxide by simple anodizing method: decolorization by PdCl₂ and observation of in-liquid gasochromic coloration, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 144, 165–172.
doi:10.1016/J.SOLMAT.2015.08.038
21. Demirbas, M. F. (2006) Thermal Energy Storage and Phase Change Materials: An Overview, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 1(1), 85–95.
doi:10.1080/009083190881481
22. Duer, K. Svendsen, S. Moller Mogensen, M. ve Birck Laustsen, J. (2002) Energy labelling of glazings and windows in Denmark: calculated and measured values, *Solar Energy*, 73(1), 23–31. doi:10.1016/S0038-092X(02)00031-2
23. Fanger, P. O. Thermal Comfort, Analysis ve Application in Environmental Engineering, Danish Technical Press, Copenhagen, Denmark, 1970, .
24. Farid, M. M. Khudhair, A. M. Razack, S. A. K. ve Al-Hallaj, S. (2004) A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management*, 45(9–10), 1597–1615. doi:10.1016/J.ENCONMAN.2003.09.015
25. Feuermann, D. ve Novoplansky, A. (1998) Reversible low solar heat gain windows for energy savings, *Solar Energy*, 62(3), 169–175. doi:10.1016/S0038-092X(98)00015-2
26. Gago, E. J. Muneer, T. Knez, M. ve 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. doi:10.1016/J.RSER.2014.08.002
27. Ghosh, R. Baker, M. B. ve Lopez, R. (2010) Optical properties and aging of gasochromic WO₃, *Thin Solid Films*, 518(8), 2247–2249. doi:10.1016/J.TSF.2009.08.003

28. Goia, F. Zinzi, M. Carnielo, E. ve Serra, V. (2015) Spectral and angular solar properties of a PCM-filled double glazing unit, *Energy and Buildings*, 87, 302–312. doi:10.1016/J.ENBUILD.2014.11.019
29. Granqvist, C. G. (2014a) Electrochromics for smart windows: Oxide-based thin films and devices, *Thin Solid Films*, 564, 1–38. doi:10.1016/J.TSF.2014.02.002
30. Granqvist, C. G. (2014b) Oxide-based chromogenic coatings and devices for energy efficient fenestration: Brief survey and update on thermochromics and electrochromics, *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 32(6), 060801. doi:10.1116/1.4896489
31. Hasnain, S. M. (1998) Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques, *Energy Conversion and Management*, 39(11), 1127–1138. doi:10.1016/S0196-8904(98)00025-9
32. Heiselberg, P. (1994) Draught risk from cold vertical surfaces, *Building and Environment*, 29(3), 297–301. doi:10.1016/0360-1323(94)90026-4
33. Hien, W. N. Liping, W. Chandra, A. N. Pandey, A. R. ve Xiaolin, W. (2005) Effects of double glazed facade on energy consumption, thermal comfort and condensation for a typical office building in Singapore, *Energy and Buildings*, 37(6), 563–572. doi:10.1016/J.ENBUILD.2004.08.004
34. Iqbal, I. ve Al-Homoud, M. S. (2007) Parametric analysis of alternative energy conservation measures in an office building in hot and humid climate, *Building and Environment*, 42(5), 2166–2177. doi:10.1016/J.BUILDENV.2006.04.011
35. Jelle, B. P. Gustavsen, A. Nilsen, T. N. ve 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. doi:10.1016/J.SOLMAT.2006.10.017
36. Jelle, B. P. Hynd, A. Gustavsen, A. Arasteh, D. Goudey, H. ve diğ. (2012) Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 96, 1–28. doi:10.1016/J.SOLMAT.2011.08.010
37. Karlsson, J. Karlsson, B. ve Roos, A. (2001) A simple model for assessing the energy performance of windows, *Energy and Buildings*, 33(7), 641–651. doi:10.1016/S0378-7788(00)00131-6
38. Krarti, M. Erickson, P. M. and Hillman, T. C. (2005) A simplified method to estimate energy savings of artificial lighting use from daylighting, *Building and Environment*, 40(6), 747–754. doi:10.1016/J.BUILDENV.2004.08.007
39. Lampert, C. M. (1993) Optical switching technology for glazings, *Thin Solid Films*, 236(1–2), 6–13. doi:10.1016/0040-6090(93)90633-Z
40. Lemarchand, P. Doran, J. ve Norton, B. (2014) Smart Switchable Technologies for Glazing and Photovoltaic Applications, *Energy Procedia*, 57, 1878–1887. doi:10.1016/J.EGYPRO.2014.10.052
41. Li, D. H. ve Lam, J. C. (2000) Measurements of solar radiation and illuminance on vertical surfaces and daylighting implications, *Renewable Energy*, 20(4), 389–404. doi:10.1016/S0960-1481(99)00126-3
42. Li, D. H. W. Lam, T. N. T. Chan, W. W. H. and Mak, A. H. L. (2009) Energy and cost analysis of semi-transparent photovoltaic in office buildings, *Applied Energy*, 86(5), 722–

729. doi:10.1016/J.APENERGY.2008.08.009
43. Li, D. H. W. Lau, C. C. S. ve Lam, J. C. (2005) Predicting daylight illuminance on inclined surfaces using sky luminance data, *Energy*, 30(9), 1649–1665. doi:10.1016/J.ENERGY.2004.04.038
 44. Lien, A. G. Hestnes, A. G. ve Aschehoug, Ø. (1997) The use of transparent insulation in low energy dwellings in cold climates, *Solar Energy*, 59(1–3), 27–35. doi:10.1016/S0038-092X(96)00120-X
 45. Llordés, A. Garcia, G. Gazquez, J. ve Milliron, D. J. (2013) Tunable near-infrared and visible-light transmittance in nanocrystal-in-glass composites, *Nature*, 500(7462), 323–326. doi:10.1038/nature12398
 46. Long, L. ve Ye, H. (2014) How to be smart and energy efficient: A general discussion on thermochromic windows, *Scientific reports*, 4, 6427.
 47. Maccari, A. ve Zinzi, M. (2000) Simplified algorithms for the Italian energy rating scheme for fenestration in residential buildings, *Solar Energy*, 69, 75–92. doi:10.1016/S0038-092X(01)00045-7
 48. Manz, H. ve Menti, U.-P. (2012) Energy performance of glazings in European climates, *Renewable Energy*, 37(1), 226–232. doi:10.1016/J.RENENE.2011.06.016
 49. Miyazaki, T. Akisawa, A. ve Kashiwagi, T. (2005) Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows, *Renewable Energy*, 30(3), 281–304. doi:10.1016/J.RENENE.2004.05.010
 50. Mukherjee, S. Hsieh, W. L. Smith, N. Goulding, M. ve Heikenfeld, J. (2015) Electrokinetic pixels with biprimary inks for color displays and color-temperature-tunable smart windows, *Applied Optics*, 54(17), 5603. doi:10.1364/AO.54.005603
 51. Norton, B. Eames, P. C. Mallick, T. K. Huang, M. J. McCormack, S. J. ve diğ. (2011) Enhancing the performance of building integrated photovoltaics, *Solar Energy*, 85(8), 1629–1664. doi:10.1016/J.SOLENER.2009.10.004
 52. Olivieri, L. Caamaño-Martín, E. Moralejo-Vázquez, F. J. Martín-Chivelet, N. Olivieri, F. ve diğ. (2014) Energy saving potential of semi-transparent photovoltaic elements for building integration, *Energy*. doi:10.1016/j.energy.2014.08.054
 53. Parkin, I. P. ve Manning, T. D. (2006) Intelligent Thermochromic Windows, *Journal of Chemical Education*, 83(3), 393. doi:10.1021/ed083p393
 54. Rezaei, S. D. Shannigrahi, S. ve 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. doi:10.1016/J.SOLMAT.2016.08.026
 55. Roos, A. ve Karlsson, B. (1994) Optical and thermal characterization of multiple glazed windows with low U-values, *Solar Energy*, 52(4), 315–325. doi:10.1016/0038-092X(94)90138-4
 56. Rudolph, S. E. Dieckmann, J. ve Brodrick, J. (2009) Technologies for smart windows, *ASHRAE Journal*, 51(7), 104–106. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-69749088341&partnerID=40&md5=498818b186eeba0f27a763bcbef485ad>
 57. Shian, S. ve Clarke, D. R. (2016). Electrically tunable window device, *Optics Letters*, 41(6), 1289. doi:10.1364/OL.41.001289
 58. Skandalos, N. ve Karamanis, D. (2015) PV glazing technologies, *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews. doi:10.1016/j.rser.2015.04.145

59. Skandalos, N. ve Karamanis, D. (2016) Investigation of thermal performance of semi-transparent PV technologies, *Energy and Buildings*. doi:10.1016/j.enbuild.2016.04.072
60. Smith, G. B. ve Granqvist, C. G. Green Nanotechnology: Solutions for Sustainability and Energy in the Built Environment (CRC, Boca Raton, FL, 2010), *Google Scholar*.
61. Stegou-Sagia, A. Antonopoulos, K. Angelopoulou, C. ve Kotsiavelos, G. (2007) The impact of glazing on energy consumption and comfort, *Energy Conversion and Management*, 48(11), 2844–2852. doi:10.1016/J.ENCONMAN.2007.07.005
62. Tuchinda, C. Srivannaboon, S. ve Lim, H. W. (2006) Photoprotection by window glass, automobile glass, and sunglasses, *Journal of the American Academy of Dermatology*, 54(5), 845–854. doi:10.1016/J.JAAD.2005.11.1082
63. Wittwer, V. Datz, M. Ell, J. Georg, A. Graf, W. ve diğ. (2004) Gasochromic windows, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 84(1–4), 305–314. doi:10.1016/J.SOLMAT.2004.01.040
64. Yohanis, Y. G. ve Norton, B. (1999) Utilization factor for building solar-heat gain for use in a simplified energy model, *Applied Energy*, 63(4), 227–239. doi:10.1016/S0306-2619(99)00032-X
65. Zhang, W. Lu, L. Peng, J. ve Song, A. (2016) Comparison of the overall energy performance of semi-transparent photovoltaic windows and common energy-efficient windows in Hong Kong, *Energy and Buildings*. doi:10.1016/j.enbuild.2016.07.016
66. Zhou, X. ve Milbrandt, R. (2014) Demonstration with Energy Assessments of Thermochromic Window Systems., *ASHRAE Transactions*, 120(1), 330–339. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=96045434&site=eds-live&authtype=ip,uid>

