



Akıllı Cam Cephe Sistemleri ve Teknolojileri

Esmâ ERKOL^a, Selçuk SAYIN^b

^aYüksek Lisans Öğrencisi, KTÜN, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Konya, Türkiye. mimar_ee@hotmail.com

^bDr. Öğr. Üyesi, KTÜN, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Konya, Türkiye. ssayin@ktun.edu.tr

ÖZET

Cam yüksek U değerine sahip olması sebebiyle diğer yapı malzemelerine kıyasla daha çok enerji kaybına sebep olmaktadır. Binaların ısı kayıplarının %60'ını oluşturduğu tespit edilen camların bu kayıplarını gidermenin bina enerji tasarrufuna büyük katkısı vardır. Statik camlar olarak bilinen Low-E kaplamalı camlar, kaplamasız camlara oranla daha yüksek enerji performansı sağlayabilmektedir. Fakat enerji performansını ve konfor seviyesini aynı anda sağlamak konusunda değişen iklim özelliklerine uyum gösteremediğinden dolayı yetersiz kalmaktadırlar. Bundan dolayı gelişen teknolojilere paralel olarak enerji performansı ve konfor seviyesini aynı anda sağlayacak şekilde cam cephe sistemleri ve teknolojileri gelişerek "akıllı camlar" olarak mimaride yerini almıştır.

Bu çalışmada farklı çeşitlerdeki akıllı camların çalışma prensipleri, teknolojileri ve uygulama alanları incelenmiştir. 7 pasif akıllı cam, 10 aktif akıllı cam olmak üzere toplam 17 farklı akıllı cam cephe teknolojisinin avantaj ve dezavantajları karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur. Pasif akıllı cam sistemlerinin en büyük dezavantajı, karşılaşılan olumsuz durumlarda insan müdahalesine imkân vermemesidir. Bu sebeple, yapılarda kullanımları çok tercih edilmemektedir. Ancak pasif akıllı cam sistemlerinden arojel camların ve vakum tüp camların U değerlerini çok küçük değerlere çekebilme ihtimalinin olması, enerji kayıplarının önüne geçilmesi yolunda önemli bir buluştur. Elektrikle çalışan aktif akıllı cam sistemleri için daha çok gelişim söz konusudur. Kullanıcı kontrolüyle çalışmaları, yapılarda daha çok tercih edilmelerini sağlamıştır. En fazla kullanılan çeşidi elektrokromik camlardır. Aktif akıllı cam sistemlerinden likit kristal camlar ve asılı partiküllü camların aktif kalmaları için sürekli güç gerektirmeleri enerji tasarrufu açısından yapılarda daha az tercih edilmelerine sebep olmuştur.

Anahtar kelimeler: Akıllı camlar, cam teknolojisi, bina cephesi, cam cepheler

Smart Glass Facade Systems and Their Technologies

ABSTRACT

Glass has a high U value and cause more energy loss compared to other building materials. To decrease the energy losses of glass, which is determined to generate 60% of the heat losses of buildings, has a great contribution to the energy saving of the building. Low-E coated glasses, known as static glasses, can provide higher energy performance than regular glasses. However, they are insufficient as they cannot adapt to changing climate features in order to provide energy performance and comfort level at the same time. Therefore, parallel to the developing technologies, glass façade systems and technologies have been developed in order to provide energy performance and comfort level at the same time, and took their place in architecture as "smart glasses".

In this study, the working principles, technologies and application areas of the different types of smart glasses are examined. Advantages and disadvantages of 17 different smart glass façade technologies, 7 passive smart glasses and 10 active smart glasses, are presented in a comparative way. The biggest disadvantage of passive smart glass systems is that they do not allow human intervention in adverse situations. For this reason, their use in buildings is not preferred. However, the possibility of pulling U values of aerogel



glasses and vacuum tube glasses from passive smart glass systems to very small values is an important invention in preventing energy losses. There is more development for electrically powered smart glass systems. User compatibility has enabled them to be more preferred in buildings. The most used types are electrochromic glasses. The fact that liquid crystal glasses and suspended particulate glasses, which are active smart glass systems, require continuous power to remain active, have made them less preferred in buildings in terms of energy saving.

Keywords: *Smart glasses, glass technology, building facade, glass facades*

1. GİRİŞ

İnsanların tarih boyunca ışığı mekânlarda kullanmak için geliştirdikleri en önemli yapı malzemesinin cam olduğu düşünülmektedir. Cam, yaklaşık 4000 yıl önce doğu Mezopotamya'da bulunmuştur (Gültekin ve Farahbakhsh, 2015). Bulunduğu yıllarda cam yapı malzemesi, teknolojik imkânlar neticesinde sınırlı boyutlarda üretilmektedir. XIX. yüzyıla kadar üretim ve uygulama zorluklarından dolayı cam teknolojisinde önemli bir gelişme kaydedilememiştir. Endüstri devriminden sonra çelik ve dökme demirin yapılarda kullanılmaya başlanmasıyla daha büyük açıklıkların geçilmesi sağlanmıştır. Bu geniş açıklıkların kapatılmasında cam yapı malzemesinin önemli bir rolü olmuştur. Özellikle XX. yüzyılın başlarında teknolojik imkânlarının gelişmesiyle büyük ebatlarda üretilen camlar, yapılarda yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır (Altinkaya ve Özgen, 2004). XX. yüzyılın sonlarına doğru meydana gelen enerji krizi, enerjinin önemini daha iyi kavranmasını sağlayarak yapılarda enerji verimliliği sağlanması yolunda araştırmaların başlamasına neden olmuştur. Yapılarda yoğun kullanıma sahip olması ve yüksek "U" değerleri sebebiyle binaların ısı kaybına etkilerinin çok büyük değerlerde olması cam cepheler üzerine araştırmaların yoğunlaştırılmasını sağlamıştır. Cam cepheler üzerine araştırmalara başlamadan önce, camın termal dinamiklerinin ve aydınlatma potansiyelinin bina enerji hesaplamalarında ne yönde etki uyandıracığının bilinmesi gerekir. Bina kabuğundaki enerji verimliliği genellikle bir bina bölmesi ve ısı akışı (R-değeri) arasındaki sıcaklık farkının oranına veya belirli koşullarda bir yapı elemanından ısı geçiş hızına (U faktörü) göre hesaplanır. Soğuk iklimlerde, düşük U faktörleri veya yüksek R değerleri ısının binalardan kaçmasını önlerken, sıcak iklimlerde ısının binalara girmesini önlemektedir (Kamalisarvestani ve diğ., 2013). Her ne kadar pencerelerde kullanılan panjurlar ve güneşlikler ısı ve ışık transferini azaltsalar da enerji tasarrufu ve kullanıcı konforunu sağlamak konusunda yetersiz kalmaktadır (Azens ve Granqvist, 2003). Bu nedenle; havalandırma, aydınlatma, ısıtma ve soğutma vb. temel gereksinimleri karşılayarak enerji tasarrufunu sağlayan ve aynı zamanda kullanıcı konforunu da düşünen akıllı camlar ortaya çıkmıştır (Altinkaya ve Özgen,2004).

1970-1980 yılları arasında ortaya çıkan akıllı camlar, iç ve dış ortam koşullarına göre optik özelliklerini dinamik olarak değiştirebilen, ortama adapte olabilen camlardır. Isı kazancı istendiğinde güneş ışınımının geçmesine izin vermekte, güneş kontrolünün istendiği zaman ise bu ışınımı yansıtmaktadırlar. Mevsimlik ani değişimlere uyum sağlayabilme yeteneğine sahiptirler. Bu uyum sağlama yetenekleri bazı etkenlere duyarlılıklarıyla kendiliğinden gerçekleşebildiği gibi kontrollü olarak da gerçekleşebilmektedir (Sarışen Öztürk, 2018). "Akıllı camların tipik olarak; optik geçirgenlik kontrolü, termal geçirgenlik kontrolü, termal absorpsiyonun kontrolü, görüş kontrolü işlevlerinden bir veya daha fazlasına sahip olması beklenmektedir." (Yağlı, 2019, s:141-142). Ayrıca, "Objeleri görsel tanıma yetisi sergileyen ve yazıyı konuşmaya dönebilen teknolojileri kullanan akıllı camların çok yakın gelecekte görme engelli insanların hayatını daha da kolay ve konforlu hale getirmeleri de beklenmektedir." (Açıksarı ve Karasu, 2018, s:437).

2. AKILLI CAM SİSTEMLERİ

Akıllı camlar; ışık, ısı gibi çevresel etkilerle aktifleşen pasif sistemler ve elektriksel uyarı ile aktifleşen aktif sistemler olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Pasif sistemler, elektriksel uyarıya ihtiyaç duymazlar ve kullanıcıdan bağımsız çevresel bazı etmenlere duyarlılıkla tepki verirler. Herhangi bir kablo bağlantısına gerek olmadığı için daha kolay monte

edilebilmekte ve kullanıcının kontrolünün mümkün olmadığı durumlarda ideal bir çözüm olabilmektedir. Aktif sistemlerin ise bir kablo bağlantısı ve enerji beslemesine ihtiyaçları vardır. Bu durum montajlarının daha karmaşık olmasına neden olmaktadır. Aktif sistemlerle görünür ve kızılötesi ışınım yoğunluğu ayarlanabilmekte ve ısıtma, soğutma, aydınlatma sistemleri enerji tüketimlerinde büyük avantaj elde edilebilmektedir.

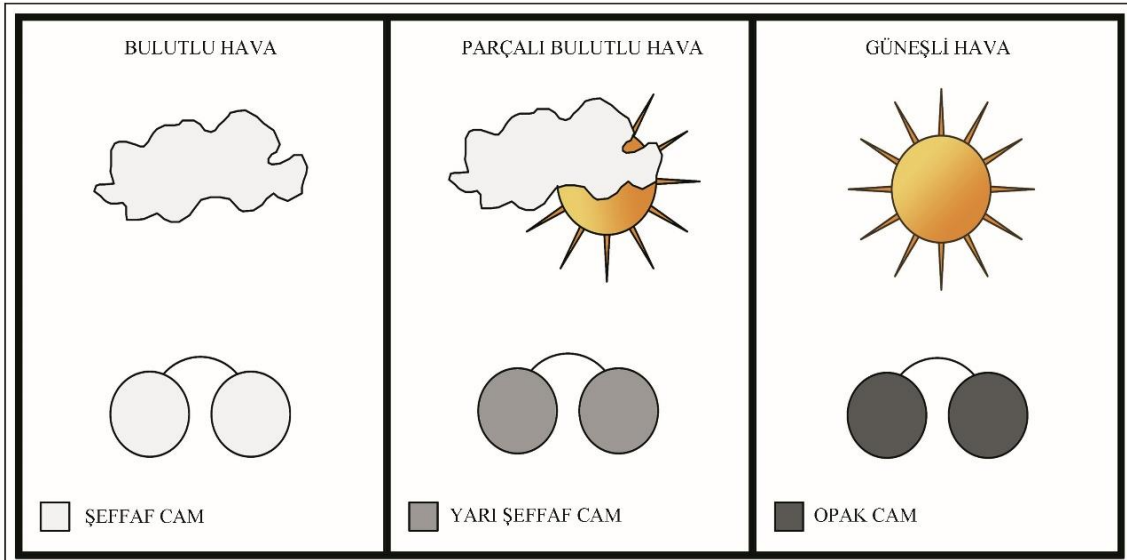
Pasif sistemler fotokromik camlar, termokromik camlar, termotropik camlar, faz dönüştürücü malzeme entegreli camlar, su sevmez ve su sever camlar, aerojel camlar ve vakum tüp camlar olarak sınıflandırılmaktadır. Aktif sistemler ise elektrokromik camlar, likit kristal camlar, asılı partiküllü camlar, gazokromik camlar, variokromik camlar, nanokristal cam içi kompozitler, elastomer-deformasyon ayarlanabilir cam, elektrokinetik piksel cam teknolojisi, akışkan doldurulmuş cam teknolojisi ve mikro blind kaplamalı camlar olarak sınıflandırılmaktadır. Akıllı camlar üzerine araştırmalar halen devam etmektedir.

2.1.Pasif Cam Sistemleri

2.1.1.Fotokromik Camlar

Fotokromik kelimesi, Yunanca kökenli olan "Photo" ve "Chroma" kelimelerinin bir araya gelmesiyle oluşmuştur. "Photo" kelimesi "ışık", "Chromo" kelimesi ise "renk" anlamına gelmektedir. Kelime kökeni itibariyle fotokromik camlar ışık etkisi ile renk değiştiren camlardır.

Fotokromik camlar, ışığın etkisiyle nitelik değişimi yapan akıllı malzeme sınıfındadır. Güneşten gelen ultraviyole (UV) ışınlarının cama yansması sonucu insan müdahalesi olmaksızın şekil 1'de gösterildiği gibi kendiliğinden koyulaşma göstererek zararlı UV ışınlarına karşı koruma sağlar. Yansıma kaynağından uzaklaştığında ise eski şeffaf haline geri döner (Karasu ve Sarıcaoğlu, 2018). Bu özelliğinden ötürü özellikle gözlük camlarında kullanımı yaygındır. Binalarda kullanımında ise, birden fazla durumda, özellikle dış sıcaklıklardaki büyük salınımlarla uğraşılması gerekir (Addington ve Schodek, 2005). Ayrıca bu fotokromik malzemeler, uzun süre yapı malzemesi olarak stabil olamadıkları için ısınmaya karşı duyarlıdır (Sultan Qurraie, 2019). Kamaşma ve aşırı ısınmaya karşı etkili bir çözüm olsa da yüksek maliyeti ve teknolojik sisteminin karmaşıklığı sebebiyle bina cephelerinde kullanımı çok tercih edilmemektedir. Şekil 2'de çatıda kullanımına bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 1: Fotokromik Cam Koyulaşma ve Saydamlaşma Süreçleri [(Kazanasmaz ve Diler, 2011)'den uyarlanmıştır]

Işığa duyarlı camlar için uygulamalar çok çeşitlidir. Birçok renk mümkün olduğundan, bu tür gözlükler genellikle yemek takımı, tatil süsleri ve sanatsal camlar için kullanılır. Işık

kontrolü gerektiren mimari kullanımlar için katkı maddesi sodyum florür ile beraber bir de katkılı camda yaklaşık 3,2 milimetre genişliğinde entegre panjurlar önerilmiştir (Trotter, 1991). Fotokromik camlar ayrıca ışığa duyarlı yiyecek ve ilaçların saklanacağı dolap ve kaplarda, araçlarda ve pilotları güneşin etkisinden korumak amacıyla uçakların burun kısımlarındaki camların yapımında kullanılmaktadır (Kazanasmaz ve Diler, 2011).



Şekil 2: Polonya'daki Gdańsk Teknoloji Üniversitesi'ndeki bir konferans salonunun çatısı (Karasu ve Sarıcaoğlu, 2018)

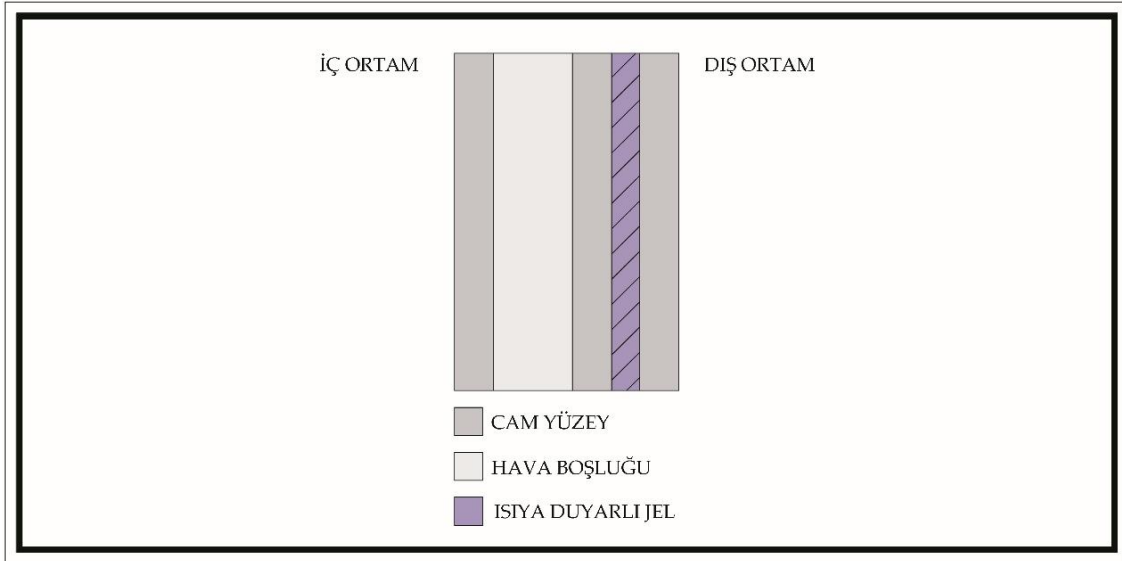
Fotokromik camlar kimyasallara karşı direnç gösterebilen dayanıklı camlardır (Sev ve diğ., 2004). Kamaşmayı ve aşırı güneş ışınlarını keserek güneşten yeterli düzeyde faydalanılmasını sağlarlar. Bu da soğutma sisteminin gereksiz fazla çalışmasına engel olur. Fotokromik camların en büyük problemi kışın ışınımın yüksek olduğu zamanlarda kararması ve böylece iç mekândaki ısı kazanımını düşürmesidir. Bu camlar, ışığı yutup karardığı zaman kahverengi ve gri renklerine dönüşerek estetik olarak da hoş bir görüntü oluşturmazlar (Döşemeciler, 2012). Estetik olarak ayrıca tepki süresindeki farklılıklar sebebiyle de hoş olmayan görüntüler sergilerler. Gün ışığına karşı kararması birkaç dakikada gerçekleşirken, tekrar berrak hale gelmesi iki kat sürede gerçekleşebilmektedir. Bu yüzden dış ortam ışığındaki ani ve sık değişimler ve yapıya düşen bölgesel gölgeler düzensiz gölge bölgeleri oluşturur ve estetiği bozacak şekilde homojen olmayan bir dağılım gösterir. Fotokromik camlar karardığı zaman soğurucu hal alırlar. Bu da aşırı ısınma sonucunda camda kırılmalara sebep olabilir. Doğrudan kullanıcı tarafından kontrol edilememesi ve cam katmanı içinde bulunan fotokromik malzemenin homojen dağılımının gerçekleşmesindeki zorluklar sebebiyle de yapıda kullanılması tercih edilmemektedir (Erdemli, 2018).

2.1.2. Termokromik Camlar

Termokromik kelimesi, Yunanca kökenli olan "Thermos" ve "Chroma" kelimelerinin bir araya gelmesiyle oluşmuştur. "Thermos" kelimesi "ılık ya da sıcak", "Chroma" kelimesi ise "renk" anlamına gelmektedir. Kelime kökeni itibarıyla termokromik camlar sıcaklık etkisi ile renk değiştiren camlardır (Açıksarı ve Karasu, 2018).

Termokromik camlar, sıcaklığın etkisiyle nitelik değişimi yapan akıllı malzeme sınıfındadır (Şekil 4). Çalışma prensibi, iki cam tabaka arasına sıkıştırılmış jeller vasıtasıyla camın opaklığının değişim göstermesidir. Cam, soğuk hava şartlarında bu jelin saydam halde bulunmasıyla şeffaf bir hal alırken, havanın ısınmasıyla bu jelin yansıtıcı özellik kazanması dolayısıyla opak bir hale dönüşür (Kazanasmaz ve Diler, 2011). Termokromik camın kesiti Şekil 3'de gösterilmiştir. Termokromik camlarda da fotokromik camlarda olduğu gibi herhangi bir insan müdahalesi olmaksızın camın geçirgenliğinde değişim meydana gelmektedir. Sıcaklık değişimi termokromik camda iki farklı hal arasında geçişe veya

kimyasal bir tepkimeye neden olarak camın yapısını değiştirmektedir. "En çok bilinen termokromik kaplama malzemesi vanadium dioksit (VO_2) esaslı olmaktadır." (Açıksarı ve Karasu, 2018, s:439).



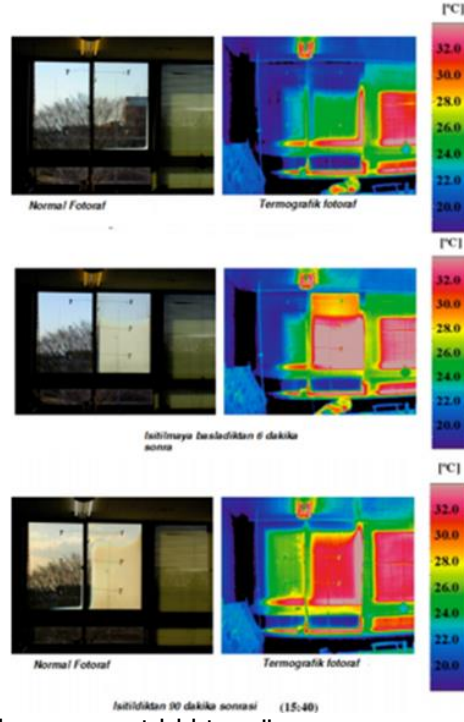
Şekil 3: Termokromik Camın Kesiti [(Kazanasmaz ve Diler, 2011)'den uyarlanmıştır]



Şekil 4: Termokromik bir camın günün farklı saatlerindeki görünümü (Erdemli, 2018)

Termokromik camlar, aşırı miktarda ısınımın kısmen ayarlanmasını sağlayarak ısı kazançlarını kontrol ederler. Termokromik camların en büyük problemi kışın sıcaklığın azaldığı zamanlarda güneşin yüksekliği azalıp ışımaya arttığına, iç mekânın aşırı ısınması ve bazı bölgelerde parlaklığın artmasından dolayı yaşanan rahatsızlıktır. Yaz aylarındaki problem ise, sıcaklığın artmasıyla kritik sıcaklık değerinin aşılmasına bağlı olarak malzemenin opaklaşması ve iç mekânda yapay aydınlatma gereksinimleri doğurmasıdır. Termokromik camlarda istenmeyen sorunlardan bir diğeri ise malzemede kararın sonucu oluşan sarı renktir (Döşemeciler, 2012). Bu sarı renk camın bazı bölümlerine gölge vurması durumunda da homojen olmayan bir dağılım göstererek cephede estetik açıdan olumsuz bir görünüm oluşturur (Şekil 5). İç mekânda da bazı bölgelerin görüşü engellemesine ve istenmeyen bir görüntü bozukluğuna sebep olur (Şekil 6). Termokromik camların opaklığındaki kendiliğinden değişim zamanla azalma gösterebilir. Bütün bu nedenlerden ötürü yapılarda çok tercih edilmemektedir (Kazanasmaz ve Diler, 2011).

Termokromik malzeme camların yanı sıra akıllı boyalarda da uzun süreden beri kullanılmaktadır. Örneğin; Tokyo Modern Sanat Müzesi'nin önünde duran Kiyoyuki Kikutake'nin tasarımı olan "Dünya" isimli paslanmaz çelik heykelde, çevre sıcaklığı ile etkileşerek gün boyu sarı ve kırmızı arasında renk değiştiren termokromik boya kullanılmıştır (Orhon, 2012). (Şekil 7) Günümüzde mevcut olan termokromik boyalar ile ilgili sorun, dış cephede kullanımında güneş ışığındaki ultraviyole dalga boylarına maruz kalınması durumunda, malzemenin bozulmasına ve renk değişim özelliklerini kaybetmesine neden olabilmektedir (Yağlı, 2019).



Şekil 5: Termokromik camın ısıtıldıktan önce ve sonra normal ve temografik görünümleri (Kazanasmaz ve Diler, 2011)



Şekil 6: Termokromik camın değişik durumlarda görünümleri (Karasu ve Sarıcaoğlu, 2018)

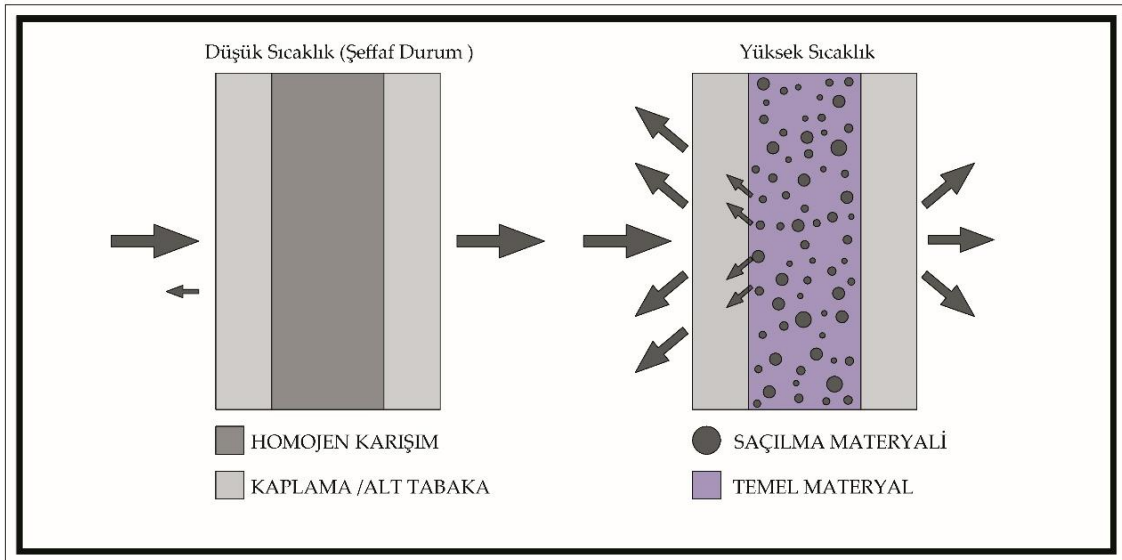


Şekil 7: Kiyoyuki Kikutake'nin "Dünya" heykeli (Orhon, 2012)

2.1.3. Termotropik Camlar

Termotropik camların çalışma prensipleri termokromik camlar ile aynıdır. Sıcaklığa bağlı olarak camın opaklığında değişim söz konusudur. Termokromik camlara kıyasla olumlu yanları iç mekanizmalarındaki farklardır. Bu fark termotropik camlara daha geniş uygulama potansiyeli sunmaktadır.

Termotropik camlar iki cam katmanı arasına yerleştirilen farklı kırılma indeksine sahip iki bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler, temel materyal olan su ve plastik malzeme veya iki farklı plastik (polimer karışım) malzemeden oluşmaktadır (Erturan, 2010). Düşük sıcaklıkta iken iki bileşen homojen dağılım göstererek şeffaf bir görünüm oluşturur. Yüksek sıcaklıkta ise cam şekil 8’de de gösterildiği gibi heterojen bir dağılım göstererek beyazlaşmaktadır (Şekil 9). Beyazlaşarak yansıtıcı duruma geçen termotropik sistemlerde ışık, mikroskobik parçacıklardan, kristalitlerden veya damlacıklardan (alanlardan) saçılır ve çevredeki ortamdan farklı bir kırılma indeksine sahiptir. Saydamlık ve opaklık arasındaki geçiş ya bu alanların tersinir oluşumu, agrega durumundaki bir değişiklik ya da her iki bileşenin sıcaklıkla kırılma endeksindeki bir değişiklik ile elde edilir (Nitz ve Hartwig, 2005).



Şekil 8: Evrelere Ayrılmış Termotropik Tabakaların Aktarma Prensibinin Şematik Gösterimi. [(Erturan,2010)'den uyarlanmıştır]



Şekil 9: Termotropik tabakalar ile gölgelendirme (Erturan, 2010)

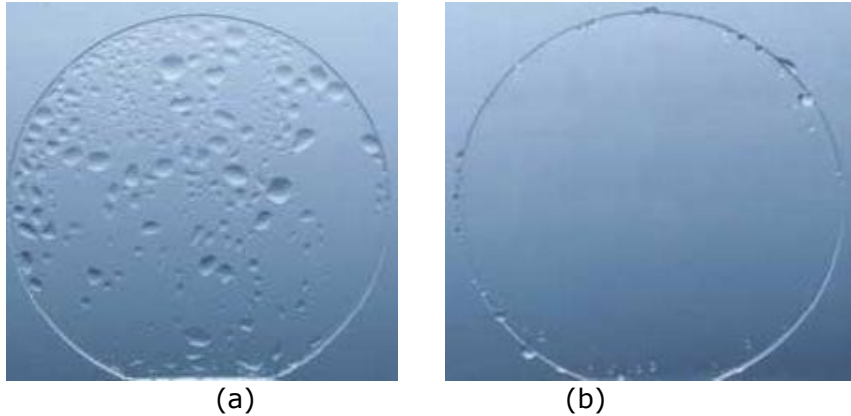
Termotropik camların, gelecekte tavan pencereleri ve şeffaf panellerle kullanımının artacağı tahmin edilmektedir.

2.1.4. Faz Dönüştürücü Malzeme Entegreli Camlar

Faz dönüştürücü malzemeler, iki cam paneli arasına faz dönüştürücü malzemenin entegre edilmesi ile oluşur. Isı kaynağından gelen enerjiyi emerek katı halden sıvı hale geçişini sağlar. Sıcaklık azaldığında ise depoladığı enerjiyi bırakarak tekrar sıvı halden katı hale değişim yapar. Düşük maliyetli olmasından dolayı faz dönüştürücü malzeme olarak en çok parafin tercih edilmektedir. Faz dönüşümü gerçekleşirken büyük bir hacim değişimi göstermesinden dolayı yapılarda sınırlı kullanıma sahiptir. Fakat son yıllarda yapılardaki enerji tüketiminin azaltılmasını sağlaması ve yapının enerji verimliliğini artırmasından dolayı büyük bir ilgi görmektedir (Cüce ve diğ., 2019).

2.1.5. Su sevmez ve su sever camlar

Su sever kaplamalarda toksik olmayan, kararlı bir malzeme olan Titanyum dioksit (TiO_2) kullanılmaktadır. TiO_2 'in en önemli özelliği UV altında yüzeyde ve havada bulunan organik kalıntıları parçalayabilmesidir. Bu kaplama sayesinde yüzey kendi kendini temizleyebilmektedir (Şekil 10a). Su sevmez kaplamalar da ise Lotus bitkisinden ilham alınarak, tıpkı bitkinin yapraklarındaki gibi küçük ebatlarda yüzeye pürüzlülük kazandırılarak suyu itmesi sağlanmıştır. Böylece su damlaları yüzeyde yayılamaz, dairesel halde bir bütün şeklinde durarak yüzeyden yuvarlanarak düşerler (Şekil 10b). Ayrıca su damlaları yuvarlanarak yüzeyden düşerken yüzeyde bulunan kirleri de sürükleyerek yüzeylerin temiz kalmasını sağlarlar (Karasu ve Sarıcaoğlu, 2018).



Şekil 10: Su sever (a) ve su sevmez (b) yüzeyler (Karasu ve Sarıcaoğlu, 2018)

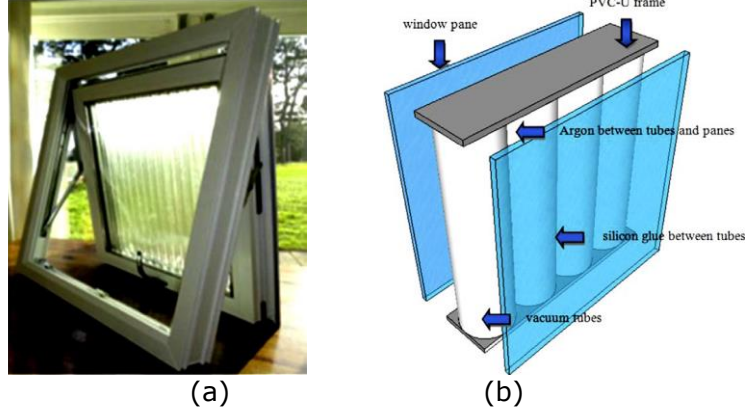
2.1.6. Aerojel Camlar

Aerojel camlar, çift cam tabakası arasına yoğunluğu düşük silika aerojel doldurulması yoluyla oluşturulmuştur. 'Aerojel; silisyum esaslı, % 4 silisyum, %96 hava içeren köpük gibi, açık hücreli yapıya sahiptir' (Yurttakal, 2007, s:36). Aerojeller, ışığın geçişine izin verir ve mikroskobik hücrelerde var olan hava sayesinde taşınım yoluyla ısı kayıplarını önler. Silika aerojeller, silika partiküllerinin görünür ışığın dalga boyundan daha küçük olmasından dolayı şeffaf olarak hissedilmektedir. Isı yalıtımına ve ışık geçişine karşı şeffaf olmalarından ötürü şeffaf izolasyon olarak adlandırılmaktadır. Bu cam türünün en büyük avantajı, cam merkezinde U değerini 0,05 gibi çok düşük değerlere çekebilme ihtimalinin olmasıdır (Yurttakal, 2007).

2.1.7. Vakum Tüp Cam

Ayrı ayrı vakumlanmış tüplerin yan yana getirilmesi ve aralarında kalan boşlukların uygun bir inert gazla doldurulması yoluyla oluşan cam teknolojisi vakum tüp camlar olarak isimlendirilmiştir. Vakum tüp camın U değeri, tüpün çapı ve kalınlığına göre değişim göstermektedir. Buna ek olarak camın U değeri, tüpler içerisindeki vakum basıncının önemli bir fonksiyonudur Vakum basıncının 0.1 Pascal (Pa)'ın altında olması gerekmektedir.

Vakum tüp cam uygulaması (Şekil 11a) ve şematik çizimi (Şekil 11b) gösterilmiştir.(Şekil 11)



Şekil 11: Vakum tüp cam teknolojisinin uygulaması (a) ve şematik çizimi (b) (Cüce ve diğ., 2019)

Optimum tüp çapı 60 mm olarak belirlenmiş, bu çap için vakum tüp camın U değeri 0.40W/m²K olarak belirlenmiştir. Görüş kalitesini düşürmesi en büyük dezavantajdır. Bu sebeple ofis yapılarında kullanımı daha uygundur (Cüce ve diğ.,2019).

2.2.Aktif Cam Sistemleri

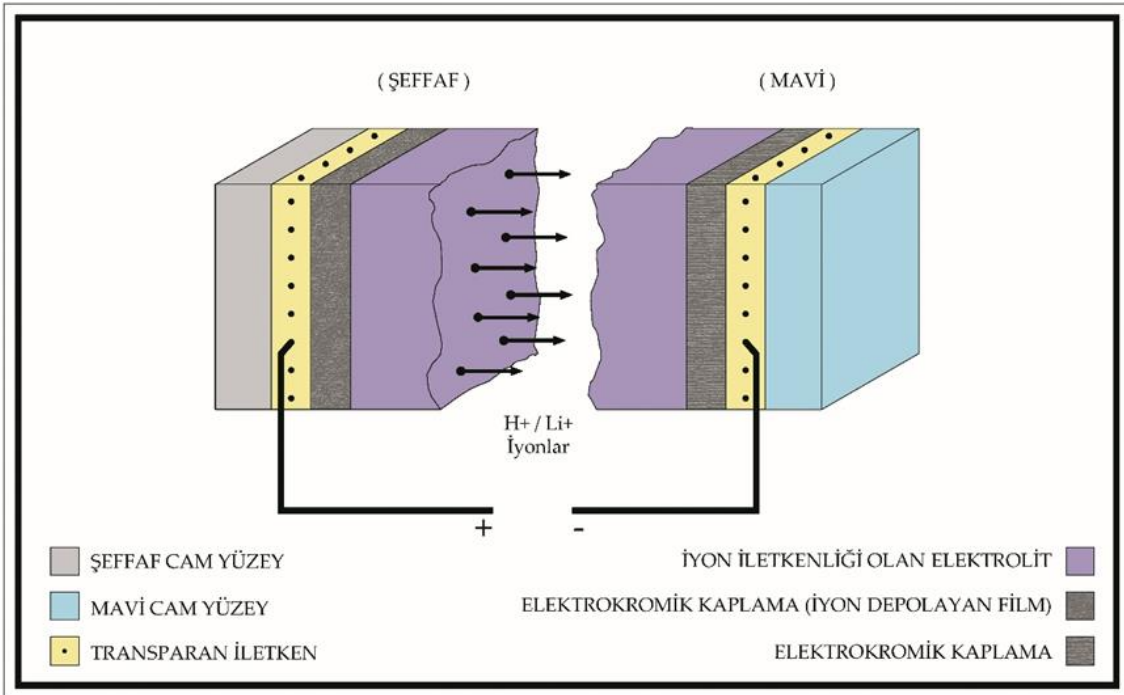
Akıllı cam sistemlerinden pasif sistemlerin en büyük dezavantajı "durdurma" ve "başlatma" yetersizliğidir. İnsan kontrolünün olmaması yukarıda da belirtildiği gibi bazı durumlarda olumsuz sonuçlara neden olabilmektedir. Işık, ısı ve görünüm cam cepheler için önemlidir. Tek bir çevresel faktörün optimizasyonunun diğer çevresel faktörlerde istenen tepkiyle çakışmaması muhtemeldir. Sonuç olarak, kullanıcı kontrolünde elektrik ile aktifleşen kromik malzemeler için daha çok gelişim mevcuttur. Elektrikle çalışan sistemler karmaşık bir altyapı gerektirdiği için doğrudan pencere veya yapıya monte edilebilen pasif cam sistemlerine göre kurulumu karmaşık ve uğraştırıcıdır. Camın her bir parçasına elektrik gücü sağlanmalı ve donanım özel olarak tasarlanıp monte edilmelidir. Ayrıca bir sensör ve mantık kontrol sistemi olmalıdır (Addington ve Schodek, 2005).

2.2.1.Elektrokromik Camlar

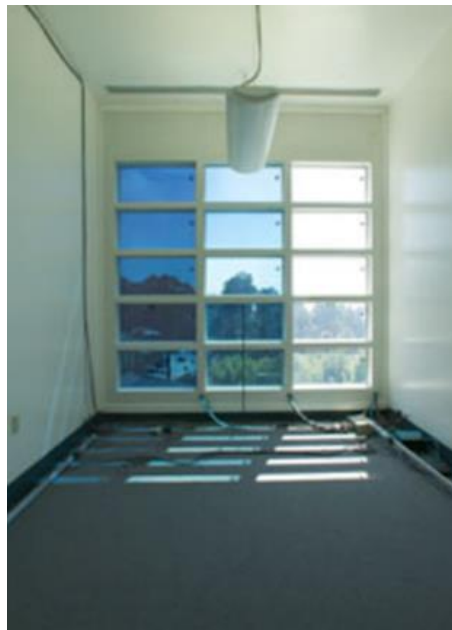
Elektrokromik kelimesi, Fransızca kökenli olan "Elektro" ve "Chroma" kelimelerinin bir araya gelmesiyle oluşmuştur. "Elektro" kelimesi "elektrik", "Chroma" kelimesi ise "renk" anlamına gelmektedir. Kelime kökeni itibarıyla elektrokromik camlar elektrik enerjisi ile renk değiştiren camlardır.

Elektrokromik camların çalışma prensibi, malzeme üzerine 1-5 volt arasında elektrik akımı uygulanarak camın opaklığında değişimin gerçekleşmesidir (Tavil, 2004). Elektrik akımı sonucu malzemenin kimyasal yapısında değişiklik meydana getiren elektrokimyasal bir reaksiyon oluşmaktadır. İki şeffaf iletken arasına elektrik akımı uygulandığında, toplanma katmanından çıkan iyonlar (genellikle lityum ve hidrojen) iletken bölümü geçerek elektrokromik kısma doğru harekete geçer ve cam opak bir hal alır. Elektrik akımı kesildiğinde ise bu durumun tersi görülür. Elektrokromik katmana geçmiş olan iyonlar iletken kısım üzerinden toplanma kısmında depolanmak üzere çıkış yaparlar ve cam yeniden şeffaf bir hale dönüşür (Erdemli, 2018). Elektrokromik camların çalışma prensibi şekil 12'da gösterilmiştir. Elektrokromik cam kaplamalarda saydamlığın oluşması ve opaklaşması 30 saniye ile 5-10 dakika arasında gerçekleşmektedir (Karasu ve Sarıcaoğlu, 2018). Elektrokromik camlar, bu şeffaflık ve opaklık arası geçiş sırasında, enerji iletimini %20 oranında azaltmaktadır (Kutlu, 2010). Elektrokromik kaplamalar genellikle nikel veya tungsten oksit (WO₃) metalinden oluşmaktadır. Metal oksit seçeneğine bağlı olarak renk değişimi olmaktadır (Erturan, 2010). Genellikle yeşil ve mavi renklerde oluşumu söz konusudur (Şekil 13). Tungsten oksit ince filmlerinin saydamlığının, geri dönüşlü bir şekilde

küçük elektrik gerilimleri uygulanarak kontrol edilmesi olasılığı, elektrokromik camları avantajlı hale getirmektedir (Cui ve diğ., 2003).



Şekil 12: Elektrokromik Camın Çalışma Prensibi [(Açıksarı ve Karasu, 2018)'den uyarlanmıştır]



Şekil 13: Elektrokromik camın sağdan sola renk değişimi aşamalarının gözlemlenebileceği saha testleri (Erdemli, 2018)

Elektrokromik camlar, pasif sistemlerdeki homojen olmayan dağılımların aksine kusursuz bir eşdağılımlılık gösterme potansiyeline sahiptir. Renk değişimi kenarlardan başlayıp orta kısımlara doğru yavaş bir şekilde ilerler. Anahtarlama hızı her ne kadar kontrollü olsa da camın sıcaklığına da bağlıdır (Erdemli, 2018). Elektrokromik camlarda, kademeli bir şekilde renk değişimi olanağı vardır (Şekil 14). Bu da ışık seviyelerindeki değişikliklere rahatsızlık duymadan doğal bir şekilde alışılmasını sağlar. Işık geçirgenliği ortalama sonuçlara göre

şeffaf halde %60 iken, opak halde %1'e düşmektedir. Yani opak haldeyken bile az da olsa görünüme izin verir (Erdemli, 2018).



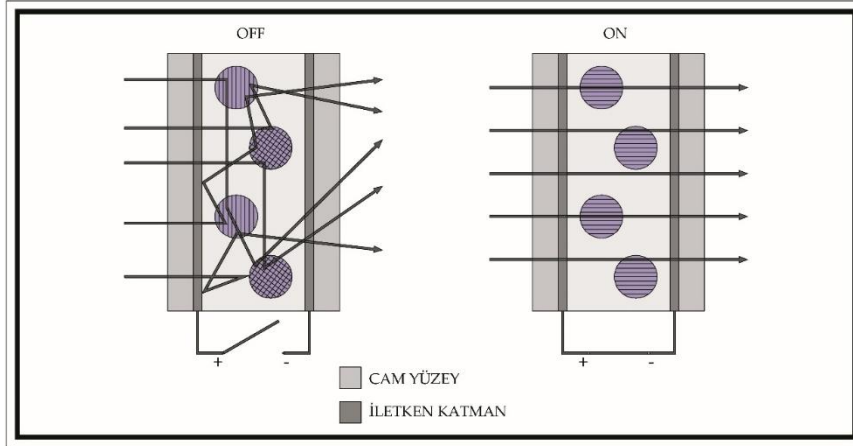
Şekil 14: Elektrokromik camın katman katman renk değişimine olanak sağlaması (URL-1)

Elektrokromik kaplamalar farklı cam katmanlarında yer alabildiği gibi cam paneller tasarımda esneklik, sergi yüzeyi, işaret panosu, tuvalet kabini, mağaza vitrini gibi farklı işlevler için kullanılabilir (Karasu ve Sarıcaoğlu, 2018). Özellikle bulutlu havalardan günışığından maksimum yararlanmak için tercih edilerek aydınlatma konforu sağlamaktadır. Çevre koşulları ve hava şartlarının hızlı bir şekilde değiştiği bölgeler için de geniş ışık geçirgenlik aralığı sunmasından dolayı kullanımı tercih edilmektedir (Kazanasmaz ve Diler, 2011).

Elektrokromik camlar,, renkli ve şeffaf durumları arasında istenilen düzeye ayarlanabiliyor olması, çalışması için çok az bir güç gerektirmesi, bütün değil de birimsel olarak değişikliğe olanak sağlaması, sadece anahtarlama sırasında güç gerektirmesi, uzun vadeli belleğe ve imalatı geniş bir alan potansiyeline sahip olmasından ötürü en çok gelecek vaad eden akıllı cam teknolojisi olarak kabul edilmektedir (Lampert, 1993). Yapılan test sonuçlarına göre 20-30 yıldan daha fazla bir süre içinde performansında herhangi bir düşüş olmayacağı gözlemlenmiştir (Kızıltoprak, 2019).

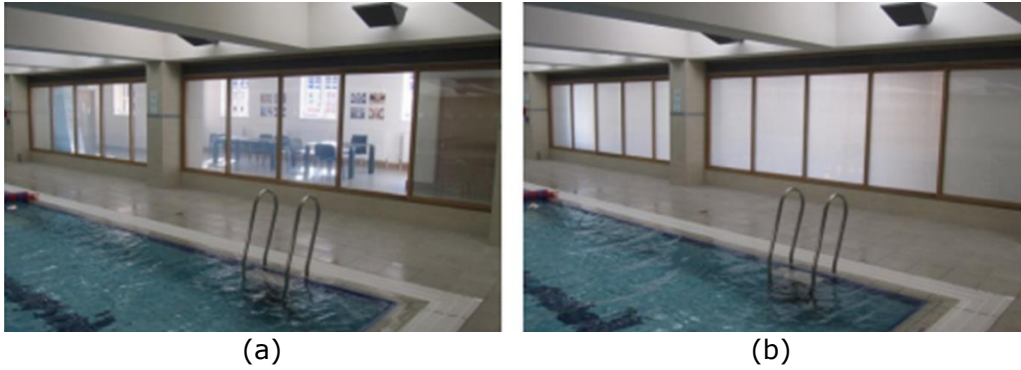
2.2.2. Likit Kristal Camlar

Likit kristalli camlar da elektrokromik camlar gibi elektrik akımı ile aktifleşerek camın optik özelliklerinde değişime neden olurlar. Çalışma prensipleri, iki cam katmanı arasına yerleştirilen ısıl performansı çok yüksek sıvı kristallerin elektrik akımı ile oluşan gerilim sonucu camın geçirgenliğinin değişmesi ilkesine dayanır. Elektrik akımı verilmesi sonucu sıvı kristaller, düzenli hale gelerek cam saydamlaşır ve ışık geçişini sağlar. Elektrik akımının kesilmesiyle ise sıvı kristaller harekete geçerek dağınık bir hal alırlar ve cam opak hale gelir, geçirgenlik kaybolur (Kazanasmaz ve Diler, 2011). Likit kristal camların çalışma prensipleri şekil 15'de gösterilmiştir. Görünürlüğün koyu-açık ,yarı şeffaf- şeffaf gibi çeşitli durumlara göre ayarlanması mümkündür (Manav ve diğ., 2009).



Şekil 15: Sıvı Kristalli Cam Parçacıklı Camın Çalışma Prensibi [(Manav ve diğ., 2009)'den uyarlanmıştır]

Likit kristal cam sistemleri, kol saatleri gibi elektronik cihazlarda, mağaza pencerelerinde, toplantı odalarında, banyolarda, yoğun bakım ünitelerinde ve yüzme havuzlarında mahremiyet amaçlı kullanılmaktadır (Şekil 16). Ayrıca büyük panel ekranlarda ve saydam duvarlarda kısa süreli projeksiyon ekranı olarak da kullanılmaktadır (Erdemli, 2018).

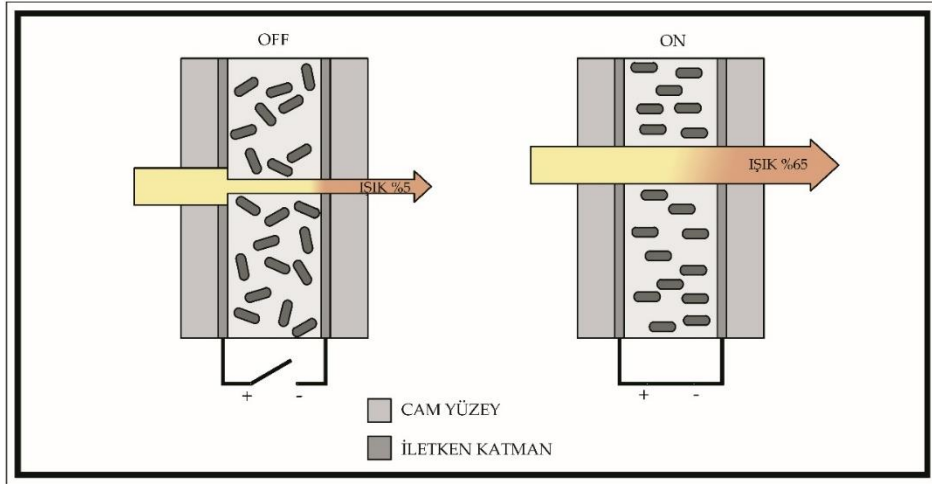


Şekil 16: Likit kristal film kaplamalı cam uygulanmış pencerelerin, elektrik akımı verilmiş (a) ve elektrik akımı kesilmiş (b) görünüşleri (Erdemli, 2018)

Bu camların yapışkan akıllı film olarak piyasada bulunması sonradan camlara uygulanmasına olanak sağlamaktadır. "Sistem; standart ev aletleri gibi, 120 voltluk bir voltajda çalışmaktadır." (Yurttakal, 2007, s:36). Kızılötesi iletimi azaltmada etkili değildirler. En büyük dezavantajı elektrik akımı verildiği süre boyunca şeffaf kalabilmesidir. Yani aktifleşmesi için sürekli bir güce ihtiyacı olup, elektrokromik camlar gibi kararlı hal göstermezler. Buna rağmen günümüzde UV dayanımı ve maliyeti halen sorun olsa da, en çok tercih edilen cam teknolojisi likit kristal camlardır (Manav ve diğ., 2009). Tamamen test ve rafine edilerek mimari uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır.

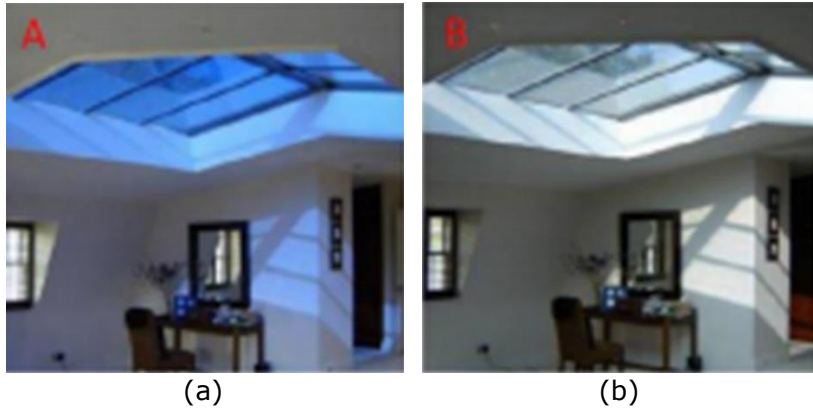
2.2.3.Asılı Partiküllü Camlar

Asılı partiküllü camların çalışma prensibi likit kristal camlara benzemektedir. İki cam paneli arasına askıda duran çubuğa benzeyen taneciklerin bulunduğu ince bir laminasyon yerleştirilmesi esasına dayanır. Askıda duran tanecikler bu laminasyon içinde saydam iki elektriksel iletken ince film tabakası arasında bulunmaktadır. Aynı likit kristal camlar gibi elektrik akımı verildiğinde bu tanecikler düzgün bir şekilde sıralanarak cam şeffaflaşır, geçişe izin verir (Şekil 18b). Aksine elektriksel akım kesildiğinde tanecikler Şekil 17'de gösterildiği gibi dağınık bir pozisyona gelerek camın opaklaşmasını ve geçirgenliğin kaybolmasını sağlarlar (Erdemli, 2018). Cam koyulaştığında aldığı renk genel olarak koyu mavidir (Şekil 18a). Fakat son yıllardaki çalışmalar ve gelişmeler sonucunda gri ve siyah renkte bir hal alabilmektedir. Yeşil, mor ve kırmızı renkte olanlarını elde edebilmek için de çalışmalar halen sürmektedir (Kızıltoprak, 2019).



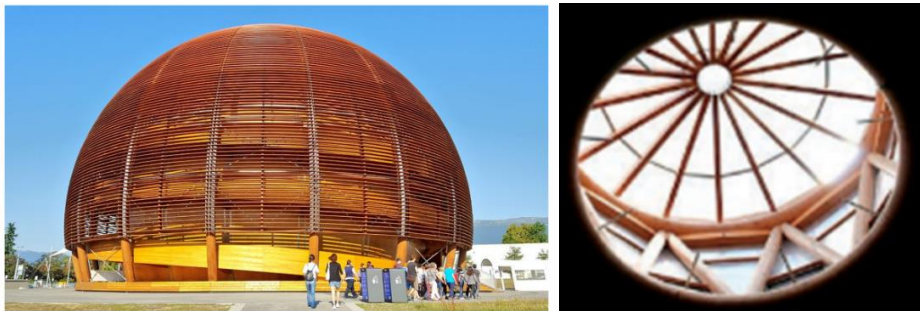
Şekil 17: Asılı Partiküllü Camın Çalışma Süreci [(Erdemli, 2018)'den uyarlanmıştır]

Asılı partiküllü camlar elektrik akımı kesildiğinde yarı saydam durumda kalma özelliğine sahiptir. Bu özelliğinden dolayı otomotiv endüstrisinde, deniz ve hava taşıtlarında kullanılmaktadır (Erdemli, 2018).



Şekil 18: Binalarda uygulanan asılı partiküllü cam örneği. (a) voltaj uygulanmamış, (b) voltaj uygulanmış (Açıksarı ve Karasu, 2018)

Bu camlar, geçen ısı ve ışığı anlık kontrol edebilme kapasitesine sahiptir. Likit kristaller gibi şeffaf kalabilmesi için sürekli güç gerektirmektedirler. Kızılötesi iletimi azaltmada likit kristal camlar gibi yetersizdirler. Likit kristal camlara göre avantajı eğik görüş açlarına daha çok görüş imkânı sağlamasıdır. Optik özellikleri ve uzun süredeki dayanımı henüz test edilmemiştir. Mimari kullanımda yeni bir ürün olmasından dolayı yüksek maliyeti tercih edilmeme sebeplerindedir (Erdemli, 2018).

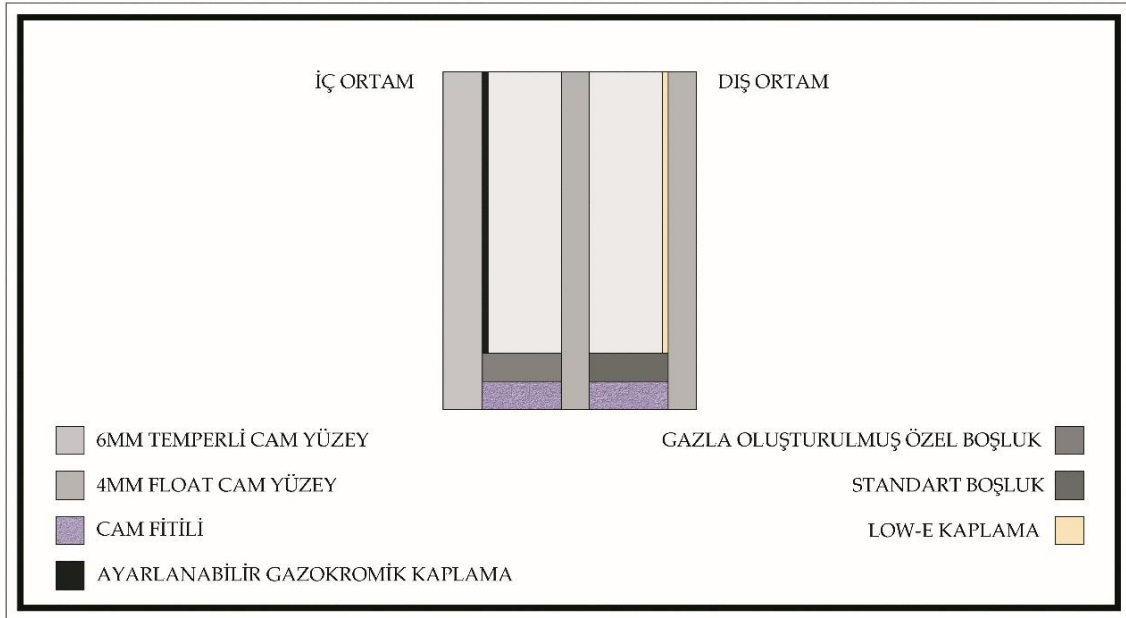


Şekil 19: T. Büchi ve H. Dessimoz tarafından tasarlanmış CERN Bilim ve Yenilik Küresi

'T. Büchi ve H. Dessimoz tarafından tasarlanmış CERN Bilim ve Yenilik Küresi yapısında asılı partiküllü cam sistemi kullanılmıştır. Manuel elektrik düğmesinden veya otomatik olarak cam saydamlık oranı değişmekte ve bu sayede kürenin içine giren ışık ve ısı miktarı ayarlanabilmektedir.'(Döşemeciler, A., 2012, s:16)(Şekil 19).

2.2.4. Gazokromik (Gaschromic) Camlar

Gazokromik camların çalışma prensipleri, katalizör görevi gören tungsten oksit film kaplamasının hidrojen ve oksijen gazlarıyla etkileşimi sonucu camın opaklığının değişmesi ilkesine dayanır. Gazokromik cam şeması şekil 20'de gösterilmiştir. Belli bir yoğunluğa ulaşan hidrojen gazı ile temasa geçen tungsten oksit film tabakası camın geçirgenliğini azaltarak mavileşmesine, oksijen gazıyla temasa geçerek ise camın geçirgenliğini artırarak şeffaflaşmasını sağlamaktadır (Demir, 2011). Katalizör ve gazların temasıyla 1 mm'den daha ince gözenekli bir katman oluşarak renk değişimi sağlanmaktadır (Şekil 21). Gazların bulunma yoğunlukları camın şeffaflık derecesinde etkilidir. Camın şeffaflaşma süresi renklenme süresine oranla saniyelik bir farkla biraz daha uzun sürmektedir. Renklenme süresi 20 sn iken şeffaflaşma süresi 60 sn den azdır. "Gazkromik cam sistemlerinde cam boşluğu cam ünitesinin dışında kontrol aygıtlarına bağlıdır."(Erturan, 2010, s:183)



Şekil 20: Gazokromik Cam Şeması [(Demir, 2011)'den uyarlanmıştır]

Uygulamada elektrokromik camlardan sonra en çok tercih edilen akıllı cam türü gazokromik camlardır. Elektrokromik camlara kıyasla montajı ve üretim süreci daha kolaydır ve renk değişimi daha hızlı gerçekleşmektedir. Kurulum için ek boru tesisatı gereklidir. Elektrokromik camlara göre daha uygun bir maliyete sahiptir (Cüce ve diğ., 2019).



Şekil 21: Gazkromik cam görünüşü (Erturan, 2010)

Gazokromik camlar son zamanlarda geliştirilmekte ve umut verici sonuçlar vermektedir. Basit cihaz yapısı ve şeffaf iletkenlerin bulunmaması nedeniyle, kısa araştırma süresine kıyasla çok yüksek geçirgenlik modülasyon aralıkları elde edilmiştir. Bu aynı zamanda gelecekteki ticari gazokromik camların ekonomik olarak mevcut akıllı cam teknolojileri için cazip yüksek performanslı bir alternatif olacaktır. Ancak, gaz kullanımı ve sınırlı sayıda kullanılabilir döngü gibi olumsuz yönleri bulunmaktadır (Baetens ve diğ., 2007). Deneysel çalışmaları halen devam etmektedir (Maçka, 2008).

2.2.5. Variokromik (Variochromic) Camlar

Variokromik camlar, henüz üretim aşamasında olup üretimin sonuçlanması beklenmektedir. Camın geçirgenliği ve yansıtıcılığı konusunda daha çeşitli kontrollere imkân veren bir cam türü olarak tasarlanmaktadır. Kullanıcının yayılan ışık ve radyasyon miktarını çeşitlendirmesine olanak sağlayan cam teknolojisidir. Yani kontrollü gölgelendirmenin yapılabilmesi için bir çözüm önerisidir (Erturan, 2010). (Şekil 22-23)



Şekil 22-23: Variokromik cam örnekleri (Erturan, 2010)

2.2.6. Nanokristal Cam İçi Kompozitler

Nanokristal cam içi kompozitler, camın şeffaflığının renkli durumdan ayrı olarak ve bağımsız bir şekilde düzenlenebilmesine olanak tanıyan cam teknolojisidir. Elektrokromik camların genel performanslarını geliştirmek için kullanılacak teknoloji olarak görülmektedir (Cüce ve diğ., 2019).

2.2.7. Elastomer-Deformasyon Ayarlanabilir Cam

Elastomer-deformasyon ayarlanabilir cam teknolojisi, camın şeffaflığını ayarlayarak, ışık saçılımını kontrol etmek için camlı yüzeyin geometrik deformasyonunu kullanan cam teknolojisidir. Nano boyutları birkaç mm uzunluğunda ve 90 mm çapındadır. Çok küçük ebatlarda olması nedeniyle, nanoteller gözle görülmezler ve ışık geçişini önemli ölçüde değiştirmezler. Ancak elektromanyetik uyarılara karşı oldukça reaktiftirler. Cama voltaj

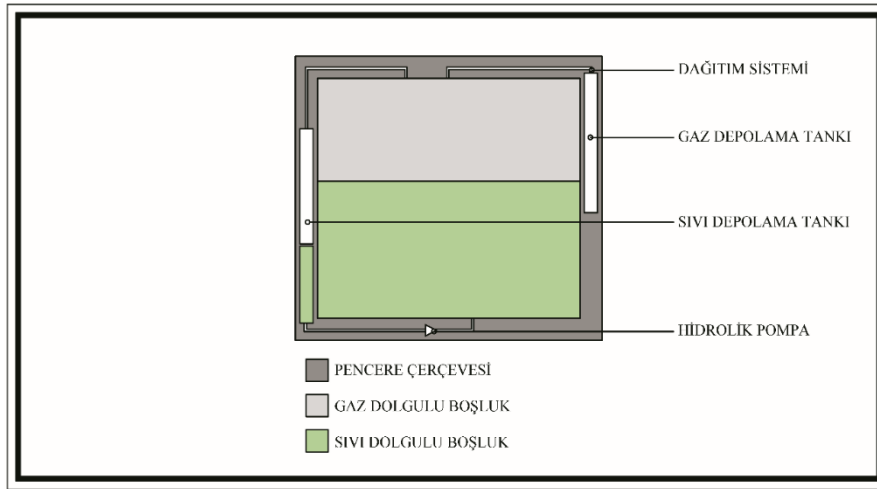
uygulandığında, nanoteller enerji yüklenir ve elastomer katmanları sıkıştırarak deforme ederler ve coulombic kuvvetleri vasıtasıyla birbirlerine doğru hareket etme eğilimi gösteren elektrotlara dönüşürler (Cüce ve diğ., 2019).

2.2.8. Elektrokinetik Piksel Cam Teknolojisi

Elektrokinetik piksel cam teknolojisi, gelen görünür ışığın sıcaklığının ve renk tonunun kontrol edilebilmesine imkân sağlayan cam teknolojisidir. Sistem, iki düzlemsel elektrot ile çalışmaktadır. Tamamlayıcı renkler zıt elektrik yükleri ile ayırt edilebilmektedir (Cüce ve diğ., 2019).

2.2.9. Akışkan Doldurulmuş Cam Teknolojisi

Isıl regülasyon açısından oldukça verimli bir sistem olan akışkan doldurulmuş cam teknolojisi, elektrokimyasal sistemlere göre daha uygun bir maliyet elde etmek amacıyla akıllı camlara bir alternatif yaklaşım olarak geliştirilmektedir (Cüce ve diğ., 2019). (Şekil 24)



Şekil 24: Akışkan Doldurulmuş Cam Teknolojisi Şematik Gösterimi [(Cüce ve diğ., 2019)'den uyarlanmıştır]

2.2.10. Mikro Blind Kaplamalı Camlar

İnorganik dairesel öngerilmeli elektrotlar içeren camlar, mikro blind kaplamalı camlar olarak isimlendirilmiştir. Elektrostatik bir etkiye maruz kaldıklarında, çıplak gözle görülemeyecek kadar küçük (100 mikrometre) olan bu elektrotlar gevşerler ve sarımlı şekillerinde açılma gözlenir. Bu mikro elektrik mekanik sistemler (MEMS), cam levha üzerine magnetron tabakanın depolanması ile gerçekleşmektedir. Bu durum Low-e camlardaki kaplama ve sonradan lazerle şekillendirme durumuna benzemektedir. Şu anda deneme aşamasında bir ürün olmasına rağmen, ürünün performansı elektrik kontrollü camlarla kıyaslanabilir. En büyük avantajı yüksek fiyata sahip indium-tin oksit iletken tabakasına gerek duymaması ve aktivasyon ve deaktivasyon sürelerinin milisaniyeler mertebesinde olmasıdır. Ayrıca MEMS'lerin basit bir yapıda olması, üretiminin kolaylığı ve düşük maliyete sahip olması sebebiyle sektörde önemli yer tutacak ürünler arasında olması beklenmektedir (Erdemli, 2018).

“Yakın zamanda laboratuvar ortamında camı yapıdaki niobium oksit matriksine gömülü indium-tin oksit kristallerinin bulunduğu yeni bir teknoloji geliştirilmiştir. Ortaya çıkan bileşik elektriksel darbe ile bağımsız olarak görünür ışık ve kızıl ötesi ısınım kontrolüne olanak verebilmektedir. İstenmeyen enerjiyi engellerken aynı zamanda herhalde mümkün olan en iyi görünür ışık geçişini sağlanması üzerinde çalışmalar sürmektedir”(Erdemli, 2018, s:61).

Elektrikle çalışan tüm kromatikler için en büyük sorun bir elektrik beslemesine ihtiyaç duymalarıdır. “Her ne kadar optik özelliklerde gözle görülür bir bozulma meydana gelmeden

önce döngü sayısını belirlemek için sayısız test yapılırsa da, gerçek kullanımdaki çevrimi incelemek için yeterli alan çalışması henüz yapılmamıştır." (Addington ve Schodek, 2005, s:171). Gerilim veya akımın ne zaman verilmesi gerektiği iyi ayarlandığında elektrikle aktifleşen camların önemi artmaktadır. Camların rutin bakımları göz önünde bulundurulduğunda ise çevreyle aktifleşen camların daha uzun ömürlü olacakları gerçektir. Elektrokromiklerin sadece bir durumdan diğerine geçmek için güce ihtiyaçları bulunmaktadır. Herhangi bir durumda kalmaları için sürekli güce ihtiyaçları olmadığından pille çalışması da mümkündür. Fakat likit kristalleri ve asılı partiküller şeffaf konumda kalabilmek için sürekli güç gerektirmektedirler. Bunu sağlamak için bir elektrik alt yapısının sağlanması gerekmektedir. Sürekli güce ihtiyaç duymaları enerji tasarrufu sağlamalarını engellemektedir.

3. AKILLI CAMLARIN KULLANIMI VE KARŞILAŞTIRILMASI

Akıllı camların günümüzde en çok kullanıldığı alan yapı sektörüdür. İnsanların çalışma ve yaşam alanlarında konfora duydukları ihtiyaç ve artan enerji talebine karşılık enerjinin değerlendirilmesi düşüncesi yapılarda akıllı cam kullanma talebini de artırmıştır. Havaçılık ve uzay sanayisinde de akıllı cam teknolojisinin kullanımı görülmektedir. Uçaklarda kullanıcı konforu düşünülerek, uçakların değişik yönlerde manevraları sonucu yoğun güneş ışınımına karşı oluşabilecek olası kamaşmayı önlemek için akıllı cam tercih edilmektedir. Boeing ve Airbus gibi dünyaca ünlü firmalarda kullanımları görülmektedir. Boeing 787 Dreamliner ve Airbus A380 isimli modellerde akıllı camlar kullanılmıştır. Akıllı camlar otomotiv sektöründe güvenlik açısından kullanılmaktadır. Uçaklarda olan mantıkla güneş ışınlarının aynalara farklı açılarla yansması sonucu oluşabilecek kamaşmalara karşı önlem amaçlı kullanılmaktadır. Toyota, Donnelly, Ichikoh, Gentex gibi sektör üreticileri araçlarda kullanılan aynalar için akıllı malzeme üretimini sağlamaktadırlar. Akıllı camların diğer bir kullanım alanı ekran teknolojilerindeki kullanımınıdır. Günümüzde tablet, telefon ve bilgisayarlarda akıllı cam kaplama teknolojileri yoğun bir şekilde görülmektedir (Açıksarı ve Karasu, 2018).

Akıllı cam sistemlerinden özellikle elektrokromik camlar üzerine son 35 yılda çeşitli araştırma ve geliştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar; elektrokromik camların çalışma prensiplerinin incelenmesi, film katmanında kullanılan malzemelerin değerlendirilmesini, çeşitli simülasyon çalışmalarını ve tam ölçekli saha değerlendirmelerini içermektedir. Günümüzde elektrokromik camların performansları üzerine çalışmalar halen devam etmekle beraber özellikle ABD ve Avrupa'da olmak üzere üretim ve satışı büyük oranda artmıştır. Yeni yapılardaki tercih talebinin yanı sıra eski yapılarda ve hatta tarihi yapıların mevcut camlarının elektrokromik camlarla değiştirildiği birçok örnek yapı bulunmaktadır. Örneklerdeki kullanımları incelendiğinde daha çok kütüphane, ofis, müze gibi görsel konforun ön planda olduğu yapılarda, iç mekânda aydınlık seviyesini ayarlamak için elektrokromik camların tercih edildiği tespit edilmiştir. Yine örneklerin inceleme sonuçlarına göre bir gölgeleme elemanı kullanarak dış estetiğin bozulmasının istenmediği yapılarda daha çok elektrokromik camların tercih edildiği gözlemlenmiştir (Sarışen Öztürk, 2018).

Çalışmada pasif ve aktif cam sistemlerinden on yedi tanesine yer verilmiştir. Bu cam sistemlerinin avantaj ve dezavantajlarına göre karşılaştırılması aşağıda sunulmuştur. Pasif akıllı cam sistemlerinin avantaj ve dezavantajları Tablo 1'de, aktif akıllı cam sistemlerinin avantaj ve dezavantajları ise Tablo 2'de listelenmiştir.

Tablo 1: Pasif akıllı cam teknolojilerinin temel avantajları ve dezavantajları

Pasif Akıllı Cam Sistemleri	Avantajları	Dezavantajları
Fotokromik Camlar	<ul style="list-style-type: none">✓ Birçok renk seçeneğine sahip olması✓ Kimyasallara karşı dirençli olması	<ul style="list-style-type: none">✓ Kontrol yetersizliği✓ Kışın ışınımın yüksek olduğu zamanlar karararak✓ İç mekânda ısı kazanımını düşürmesi✓ Opak haldeyken kahverengi ve gri rengine dönüşmesi✓ Tepki süresindeki farklılıklar sebebiyle homojen olmayan dağılımlar göstermesi



		<ul style="list-style-type: none">✓ Opak haldeyken soğurucu hal alması sonucu, aşırı ısınma ile camda kırılmaların olabilmesi✓ Çeşit ve ölçü bakımından sınırlı olması
Termokromik Camlar	<ul style="list-style-type: none">✓ Akıllı boyalarda kullanılması✓ Maliyetinin çok yüksek olmaması	<ul style="list-style-type: none">✓ Kontrol yetersizliği✓ Kışın sıcaklığın azaldığı ve güneşin yüksekliğinin azalması ışımın arttığı durumda, iç mekânın aşırı ısınması ve bazı bölgelerde parlaklığın artması✓ Yaz aylarında kritik sıcaklık değerinin artmasına bağlı olarak camın opaklaşması ve yapay aydınlatma gereksinimi duyulması✓ Opak haldeyken sarı renge dönüşmesi✓ Cama gölge vurmaması sonucu homojen olmayan dağılımlar göstermesi✓ Renk değiştirme yeteneği zamanla azalması
Termotropik Camlar	<ul style="list-style-type: none">✓ İç mekanizmalarındaki farklar sebebiyle termokromik camlara kıyasla daha geniş uygulama potansiyeline sahip olması	<ul style="list-style-type: none">✓ Kontrol yetersizliği
Faz Dönüştürücü Malzeme Entegreli Camlar	<ul style="list-style-type: none">✓ Enerji tüketimini azaltıp, enerji verimliliğini artırması	<ul style="list-style-type: none">✓ Faz dönüşümü sırasındaki büyük hacim değişimi
Su Sevmez Ve Su Sever Camlar	<ul style="list-style-type: none">✓ Su sever kaplamalarda kullanılan titanyum dioksit sayesinde yüzeyin kendi kendini temizleyebilmesi✓ Su sevmez kaplamalarda ise su damlalarının yüzeyden düşerken yüzeydeki kirleri de sürükleyerek yüzeyi temizlemesi	<ul style="list-style-type: none">✓ Su sever camlarda camın yüzeyindeki su damlacıklarının görüşü olumsuz etkilemesi
Aerojel Camlar	<ul style="list-style-type: none">✓ Isıl direnç açısından emsalsiz bir teknoloji olması✓ Isı kayıplarını önlemesi✓ U değerini 0.05 W/m²K gibi çok düşük değerlere çekebilme ihtimalinin olması	<ul style="list-style-type: none">✓ Yüksek maliyete sahip olması
Vakum TüpCam	<ul style="list-style-type: none">✓ Yüksek görünür ışık geçirgenliği açısından cazip olması✓ Isıl direnç açısından oldukça zengin performans karakteristiğine sahip olması✓ U değeri 0.40W/m²K gibi çok düşük değerlere çekebilme ihtimalinin olması	<ul style="list-style-type: none">✓ Cam katmanlar arasındaki vakumun zaman içerisinde azalması, ortalama U değerini etkilemesi✓ Estetik olarak kötü olması

Pasif akıllı cam sistemlerinin en büyük dezavantajı daha öncede belirtildiği gibi 'başlatma' ve 'durdurma' yetersizliğidir. Kullanıcı kontrolüne imkan vermemesi birçok dezavantajı da beraberinde getirmiştir. Bu dezavantajlar neticesinde özellikle fotokromik, termokromik ve termotropik camların yapılarda kullanımı çok tercih edilmemektedir. Faz dönüştürücü malzeme entegreli camlarda ise faz dönüşümü sırasındaki büyük hacim değişimi, yapılardaki kullanımını sınırlamaktadır. Su sever ve su sevmez camların kendi kendilerini temizleme durumları bu camları çekici kılmaktadır. Pasif akıllı cam sistemlerinden aerojel camların ve vakum tüp camların U değerlerini çok küçük değerlere çekebilme ihtimalinin olması, yapılarda yüksek U değerleri sebebiyle ısı kayıpları açısından sorun olan camların iyileştirilmesi yolunda önemli bir gelişmedir.

Tablo 2: Aktif akıllı cam teknolojilerinin temel avantajları ve dezavantajları

Aktif Akıllı Cam Sistemleri	Avantajları	Dezavantajları
Elektrokromik Camlar	<ul style="list-style-type: none">✓ Aktive etmek için 1-5 volt arasında küçük bir voltaj uygulanmasının yeterli olması✓ Değişik ihtiyaç ve isteklere göre katmanlarının belirlenebiliyor olması✓ Metal oksit seçeneğine bağlı olarak çeşitli renklerinin üretilebilmesi✓ Tungsten oksit ince filmlerin saydamlığının, geri dönüşlü bir şekilde küçük elektrik gerilimleri uygulanarak kontrol edilebilme olasılığının olması✓ Kusursuz bir eşdağılımlılık gösterme potansiyeline sahip olması✓ Geniş ışık geçirgenlik aralığı sunması✓ Sadece anahtarlama sırasında güç gerektirmesi✓ Uzun vadeli belleğe sahip olması✓ İmalatta geniş bir alan potansiyeline sahip olması	<ul style="list-style-type: none">✓ Yüzey alanı arttıkça elektrik alanın azalması nedeniyle alan büyüdükçe performansında düşüşler olması✓ Yüksek maliyete sahip olması



Likit Kristal Camlar	<ul style="list-style-type: none">✓ Çeşitli renk, şekil ve ölçülerde üretilebilmesi✓ Kontrolü elektriksel olarak yapıldığından akıllı sistemlere kolayca entegre edilebilmesi✓ Yapışkan akıllı film olarak piyasada bulunmasının sonradan camlara uygulanmasına olanak sağlaması	<ul style="list-style-type: none">✓ Maliyetinin yüksek olması✓ Kararlı hal göstermemesi✓ Aktifleşmesi için sürekli güç gerektirmesi✓ UV dayanımının düşük olması✓ Kızılötesi iletimi azaltmada yetersiz kalması
Asılı Partiküllü Camlar	<ul style="list-style-type: none">✓ Tepki süresinin elektrokromik camlara göre çok daha hızlı olması✓ Elektrik akımı kesildiğinde yarı saydam durumda kalma özelliğine sahip olması✓ Geçen ısı ve ışığı anlık kontrol edebilme kapasitesine sahip olması✓ Likit kristal camlara göre avantajı eğiş görüş açlarına daha çok görüş imkânı sağlaması	<ul style="list-style-type: none">✓ Maliyeti oldukça yüksek olması✓ Şeffaf kalabilmesi için sürekli güç gerektirmesi✓ Kızılötesi iletimi azaltmada likit kristal camlar gibi yetersiz kalması✓ Kararlı hal göstermemesi✓ Aktifleşmesi için sürekli güç gerektirmesi✓ Optik özelliklerinin ve uzun süredeki dayanımının henüz test edilmemiş olması
Gazokromik Camlar	<ul style="list-style-type: none">✓ Montaj ve üretim sürecinin elektrokromik camlara göre daha kolay olması✓ Montaj ve üretim süreci sebebiyle maliyetinin elektrokromik camlara göre daha düşük olması✓ Daha hızlı tepki verme süresi (Elektrokromik camlara kıyasla en az 10 kat daha hızlı)	<ul style="list-style-type: none">✓ Görünür ve kızılötesi ışık için kontrol aralığının daha dar olması✓ Elektrolizör ve ek boru tesisatı gereksinimi duyması
Variokromik Camlar	<ul style="list-style-type: none">✓ Kullanıcının yayılan ışık ve radyasyon miktarını çeşitlendirmesine olanak sağlaması✓ Camın geçirgenliği ve yansıtıcılığı konusunda daha çeşitli kontrollere imkân vermesi	<ul style="list-style-type: none">✓ Henüz üretim aşamasında olduğu için dezavantajları bilinmemektedir.
Nanokristal Cam İçi Kompozitler	<ul style="list-style-type: none">✓ Geniş kontrol aralığına sahip olması✓ Daha düşük maliyetinin olması	<ul style="list-style-type: none">✓ Henüz üretim aşamasında olduğu için dezavantajları bilinmemektedir.
Elastomer-Deformasyon Ayarlanabilir Cam	<ul style="list-style-type: none">✓ Anahtarlama süresinin anlık gerçekleşmesi✓ Daha düşük maliyetinin olması✓ Renk nötrlüğü	<ul style="list-style-type: none">✓ Görünür ve kızılötesi ışık için kontrol aralığının daha dar olması
Elektrokinetik Pksel Cam Teknolojisi	<ul style="list-style-type: none">✓ Hem renk hem ışık modülasyonu✓ Maliyetinin daha düşük olması	<ul style="list-style-type: none">✓ Görünür ve kızılötesi ışık için kontrol aralığının daha dar olması
Akışkan Doldurulmuş Cam Teknolojisi	<ul style="list-style-type: none">✓ Geliştirilmiş dayanıklılık göstermesi✓ Maliyetinin daha düşük olması✓ Geçiş sürelerinin daha hızlı olması	<ul style="list-style-type: none">✓ Görünür ve kızılötesi ışık için kontrol aralığının daha dar olması✓ Ağır boru ve tanklara gereksinim duyması✓ Kısmen dolu camların pürüzlü görünmesi
Mikro Blind Kaplama Camlar	<ul style="list-style-type: none">✓ Yüksek fiyata sahip indium-tin oksit iletken tabakasına gerek duymaması✓ Aktivasyon ve deaktivasyon sürelerinin milisaniyeler mertebesinde olması✓ Basit bir yapıda olması✓ Üretimünün kolay olması✓ Düşük maliyet sahip olması	<ul style="list-style-type: none">✓ Henüz üretim aşamasında olduğu için dezavantajları bilinmemektedir.

Elektrikle çalışan aktif akıllı camlar, daha çok gelecek vadetmektedir. Kullanıcının çeşitli kontrollerine imkân vermesi daha çok tercih edilmelerini ve araştırmaların bu camlar üzerine yoğunlaşmasını sağlamıştır. Özellikle elektrokromik camlar, yüksek maliyetine rağmen yapılarda daha çok tercih edilmekte olup bu camlar üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Variokromik camlar, mikro blind kaplama camlar ve nanokristal cam içi kompozitler, elektrokromik camların genel performanslarını geliştirmek amacıyla üretim aşamasında olan camlardır. Likit kristal camlar ve asılı partiküllü camların aktif kalma süreleri boyunca güç gerektirmeleri sebebiyle enerji tasarrufu açısından kullanımları çok tercih edilmemektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada cam yapı malzemesinin geçmişten günümüze geliştirilen ve halen geliştirme çalışmaları devam eden akıllı cam teknolojileri incelenmiş her birinin avantaj ve dezavantajları, kullanım alanları ve çalışma prensipleri hakkında bilgi verilmiştir. Bu bilgiler ışığında aktif ve pasif olarak sınıflandırılan cam sistemlerinin avantaj ve dezavantajları, üçüncü bölümde detaylı bir şekilde tablo halinde listelenerek karşılaştırılmıştır. Akıllı cam teknolojisi ile kullanıcı konforu ve enerji tasarrufunun beraber sağlanması amaçlanmış ve bazı dezavantajlara sahip ürünler kadar başarılı ürünler de elde edilmiştir. Kullanıcı kontrolüne imkân vermeyen pasif akıllı cam sistemlerinde camın; ışık ve ısı gibi etkenlerle şeffaflığında değişim olması, aşırı ısınma, kamaşma, camda homojen olmayan dağılımlar sonucu oluşan görüntü bozuklukları ve yapay aydınlatma gereksinimleri gibi istenmeyen problemler gözlemlenmektedir. Kullanıcı kontrolüne imkân veren akıllı cam sistemlerinde karşılaşılan problem ise likit kristal camlar ve askıda partiküllü cam sistemleri gibi aktif kalabilmesi için sürekli güç gerektiren sistemlerin bulunmasıdır.

Aktif ve pasif cam sistemleri, çalışmada da detaylı bir şekilde belirtildiği gibi bazı dezavantajlarına rağmen gün ışığının yeterli düzeyde alınmasına olanak sağlayarak enerji tasarrufunu sağlayabilmektedirler. Gelecekte akıllı cam teknolojinin yaygınlaşmasıyla binanın ısı kaybının %60'ını oluşturan camların artık enerji tasarrufu sağlayan camlara dönüşmesi sağlanarak enerji kazancının artırılması amaçlanmaktadır. Ayrıca gelecekte cam cepheler, dinamik öğeler olarak göze çarpacak ve günışığının en yararlı şekilde kullanılmasını sağlayacaklardır. Akıllı cam sistemleri, bina tasarımcılarına geniş seçenekler sunmaktadır. Mimar ve mühendislerin bu yeni teknolojiyi en akıllı çözümlerle, iklim, gölgelenme ve yönlendirme faktörlerine göre doğru bir şekilde değerlendirmesiyle daha konforlu ve daha az enerji tüketen enerji verimli yapılar inşa edilebilir. Akıllı cam çeşitleri yapıda, görsel konfor, akustik, güvenlik, enerji tasarrufu, bakım-onarım, kontrol imkânı verip vermeme durumları gibi kriterleri göz önünde bulundurularak tercih edilebilmektedir. İlerde bütün bu şartları maksimum düzeyde karşılayan bir akıllı cam çeşidinin tasarlanması beklenmektedir. Maliyeti yüksek olan akıllı camların gelecekte teknolojinin gelişmesiyle üretim kolaylığı sağlanarak seri üretime geçilmesiyle maliyetinin düşeceğine inanılmaktadır. Üniversitelerin Ar-Ge çalışmalarında cam teknolojisi üzerine araştırmalar halen devam etmekte olup, ülkemizde özellikle son 20 yıllık süreçte inşaat, havacılık, uzay, otomotiv endüstrilerinde enerji verimliliğini sağlamak amacıyla kullanımları görülmeye başlanmıştır.

KAYNAKÇA

- Açıksarı, C., Karasu, B., (2018), 'Akıllı Camlar ve Teknolojik Gelişimleri', *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi (ECJSE)*, 5(2), 437-457.
- Addington, M., Schodek, D., (2005), "Smart Materials New Technologies For The Architecture Design Professions", Elsevier Ltd., Amsterdam.
- Altınkaya, T., Özgen A., (2004), "Camın Yapısal Kullanımının Tarihsel Gelişimi, Güncel Olanaklar ve Uygulama Örneklerinin İncelenmesi", *II. Ulusal Yapı Malzemesi Sergisi ve Kongresi*, İTÜ, İstanbul, 5-8 Ekim, s.87-97.
- Azens, A., Granqvist, C.G., (2003), 'Electrochromic smart windows: energy efficiency and device aspects', *J Solid State Electrochem*, 7: 64 – 68. DOI 10.1007/s10008-002-0313-4.
- Baetens R., Jelle B. P., Gustavsen A., (2007), "Properties requirements and possibilities of smart windows for dynamic day light and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94, 87–105.
- Cui, H.N., Costa, M.F., Teixeira, V., Porcheras, I., Bertran, E., (2003), 'Electrochromic coatings for smart windows', *Surface Science*, 532–535, 1127–1131.
- Cüce, P.M., Güçlü, T., Beşir, A.B., Cüce, E., (2019), 'Enerji Verimli Binalar İçin Sürdürülebilir Ve Çevre Dostu Pencere Ve Cam Teknolojileri: Son Gelişmeler Ve Uygulamalar', *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 24, Sayı 3, Doi: 10.17482/uumfd.562173, 503-521.
- Döşemeciler, A., (2012), 'Cam ve Aydınlatma Sistemlerinde Akıllı Malzemeler', *Ege Mimarlık*, ARALIK 2012, 14-17.
- Erdemli, M.İ., (2018), 'Elektrokromik Kaplamalı Camın Farklı İklim Bölgelerine Göre Enerji Performansı Değerlendirilmesi', Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, *Enerji Enstitüsü*, Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, Enerji Bilim ve Teknoloji Programı, İstanbul.
- Erturan, B., (2010), 'Akıllı Cephe Tasarım İlkeleri Ve Uygulama Örneklerinin İncelenmesi', Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mimarlık Anabilim Dalı, Yapı Bilgisi Programı, İstanbul.
- Gültekin, A.B., Farahbakhsh, E.B., (2015), 'Cam Yapı Malzemelerinin Enerji Performanslarının Değerlendirilmesi', *2nd International Sustainable Buildings Symposium*, 28-30 Mayıs 2015, Ankara-Türkiye, 824-833.
- Kamalisarvestani M., Saidur R., Mekhilef S., Javadi F. S., (2013), "Performance, materials and coating technologies of thermochromic thin films on smart windows", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 353–364.
- Karasu, B., Sarıcaoğlu, B., (2018), 'Cam Yüzey Kaplama Teknolojileri', *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi (ECJSE)*, Cilt 5(2), 475-500.



- Kazanasmaz, T., Diler, Y., (2011), 'Gelişmiş Cam Teknolojileri İle Enerji Etkinliğin Değerlendirmesi', *VI. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu Ve Sergisi Bildirileri*, 24-25 Kasım, İzmir, Bildiriler Kitabı, 84-93.
- Kızıltoprak, S., (2019), 'Akıllı Yapı Kabuğunda Cephe Bileşeni Olarak Kullanılan Akıllı Camların Seçimi İçin Sistem Önerisi', Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mimarlık Anabilim Dalı, Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi Programı, İstanbul.
- Kutlu, R., (2010), 'Ofislerde Enerji Etkin Aydınlatma Sistemleri', *Tasarımda Genç Bakışlar Ulusal Sempozyumu*, 27 Ekim, sayı 16, 154-162.
- Lampert C. M., (1993), "Optical switching technology for glazings", *Thin Solid Films*, 236 (1-2), 6-13.
- Maçka, S., (2008), 'Türkiye İklim Bölgelerine Göre Enerji Etkin Pencere Türlerinin Belirlenmesi', Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mimarlık Anabilim Dalı, Trabzon.
- Manav, B., Kutlu, R., Küçükdoğu, M.Ş., (2009), 'Mimaride Kullanılan Cam Türlerinin Aydınlatma Açısından İncelenmesi', *Ulusal Elektrik Tesisat Kongresi, V. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 7-10 Mayıs, http://www.emo.org.tr/ekler/21654b2b0214ac5_ek.pdf
- Nitz P., Hartwig H., (2005), "Solar control with thermotropic layers", *Solar Energy*, 79, 573-582.
- Orhon, A.V., (2012), 'Akıllı Malzemelerin Mimarlıkta Kullanımı', *Ege Mimarlık*, Aralık, 82, 18-21.
- Sarışen Öztürk, G., (2018), 'İstanbul'da Bir Ofis Binası Örneğinde Elektrokromik Pencerelerin Performans Değerlendirmesi', Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mimarlık Anabilim Dalı, Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi Programı, İstanbul.
- Sev, A., Gür, V., Özgen, A., (2004), "Cephenin Vazgeçilmez Saydam Malzemesi Cam", 2. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi, İstanbul, s.2-6.
- Sultan Qurraie, B., (2019), 'Providing Optimum Lighting And Reducing Heat Gain Through Investigation Of Different Wavelength Effect Of Colors In Transparent Facades: Smart Window Design Tool', Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Tavil, A., (2004), 'Cephe Sistemlerinde Yeni Teknolojiler Elektrokromik Pencereler', 2. *Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi*, Mimarlar Odası İstanbul Büyükkent Şubesi, 6-8 Ekim, Taşkılla, s.111-116.
- Trotter, D.M., (1991), 'Photochromic and photosensitive glasses', *Scientific American* 264(4), APRIL 1991, 124-129.
- Yağlı, S., (2019), 'Teknolojik Gelişmelerin Etkisi İle Yüzeylerde Malzeme Kullanımı: Akıllı Malzemeler', Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, *Güzel Sanatlar Enstitüsü*, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Anabilim Dalı, Ankara.
- Yurttakal, Ö., (2007), 'Pencere Sistemlerinin Isıl Performansının Eleman ve Bina Düzeyinde Değerlendirilmesi', Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mimarlık Anabilim Dalı, Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi Programı, İstanbul.
- URL-1, <https://www.afsakillcamfilmi.com/akilli-cam>. (Erişim tarihi, 31.03.2020)