



*Research Article*

## DESIGN SOLUTIONS TOWARDS SUSTAINABLE DESIGN CRITERIA OF ADAPTIVE FACADE SYSTEMS

Ahmet Necip BELEK<sup>1,\*</sup>,<sup>a</sup>  Ruşen YAMAÇLI<sup>1,b</sup>, 

<sup>1</sup> Eskisehir Technical University, Faculty of Architecture and Design, Department of Architecture, Eskisehir, Turkiye

\*Correspondence: [ahmetnecipbelek@gmail.com](mailto:ahmetnecipbelek@gmail.com)

Received: 10 September 2023; Accepted: 7 November 2023; Published: 31 December 2023

ORCID<sup>a</sup>: 0000-0002-2679-7180, ORCID<sup>b</sup>: 0000-0001-9659-9246

Citation: Belek, A. N. & Yamacli, R. (2023) Design solutions towards sustainable design criteria of adaptive façade systems, *ArtGRID*, 5(2), 216-239

### Abstract

The designs of the facades, which are the outermost layers of buildings interacting with the environment, are one of the most important today's architectural problems in terms of meeting sustainable design goals such as energy efficiency and creating a comfortable interior. As a result of the inadequacy of traditional façade systems to meet these goals and the search for sustainable solutions in façade designs, the tendency towards façade systems that can be adapted to the environment and users' needs is increasing. Adaptive facades contribute to the energy efficiency of the building and providing optimum comfort conditions in the interior by being adaptable according to the external environmental conditions and user demands thanks to the advanced systems and materials it contains. In this study, it is aimed to reveal the sustainability-based design criteria of adaptive facade systems and to evaluate the design solutions produced to meet these criteria through examples. As a result of the literature review conducted within the scope of the study; Certain design criteria that adaptive facade systems meet with the design solutions its contain have been determined, and these determined criteria have formed the evaluation standards for the adaptive facade examples selected to be analyzed in the study. In this context, a comparative evaluation of sustainability-based design solutions in adaptive facade examples was made separately for each design criterion, and general determinations and inferences were made in the conclusion section of the study, based on the findings obtained as a result of the evaluation.

**Keywords:** Adaptive Facade, Adaptive Facade Systems, Adaptive Facade Design, Adaptive Facade Design Criteria, Adaptive Facade Design Solutions

*Araştırma Makalesi***ADAPTİF CEPHE SİSTEMLERİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİR TASARIM KRİTERLERİNE YÖNELİK TASARIM ÇÖZÜMLERİ****Özet**

Binaların çevreyle etkileşime girdiği en dış katmanları olan cephelerinin tasarımları, enerji etkinliği ve konforlu bir iç mekan oluşturma gibi sürdürülebilir tasarım hedeflerinin karşılanması açısından günümüzdeki önemli mimarlık problemleri arasında yer almaktadır. Geleneksel cephe sistemlerinin bu hedefleri karşılamadaki yetersizliği ve cephe tasarımlarında sürdürülebilir çözümlerin arayışı sonucu yapı sektöründe, çevreye ve kullanıcıların gereksinimlerine göre uyarlanabilir cephe sistemlerine olan yönelim giderek artmaktadır. Adaptif cepheler, bünyesinde barındırdığı gelişmiş sistemler ve malzemeler sayesinde dış çevre koşullarına ve kullanıcı taleplerine göre uyarlanabilir özellik göstererek iç mekanda optimum konfor koşullarını sağlayıp binanın enerji verimliliğine katkıda bulunmaktadır. Bu çalışmada, adaptif cephe sistemlerinin barındırdığı sürdürülebilirliğe dayalı tasarım kriterlerini ortaya koymak ve bu kriterleri karşılamaya yönelik üretilmiş tasarım çözümlerini örnekler üzerinden değerlendirmek amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında yapılan literatür taraması sonucu; adaptif cephe sistemlerinin içerdiği tasarım çözümleriyle karşıladığı belli tasarım kriterleri tespit edilmiş olup belirlenen bu kriterler, çalışmadaki analiz edilmek üzere seçilen adaptif cephe örneklerinin değerlendirme ölçütlerini oluşturmuştur. Bu bağlamda adaptif cephe örneklerindeki sürdürülebilirliğe dayalı tasarım çözümlerinin her tasarım kriteri için ayrı ayrı olmak üzere karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi yapılmış olup değerlendirme sonucunda elde edilen bulgulardan hareketle çalışmanın sonuç bölümünde genel tespit ve çıkarımlarda bulunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Adaptif Cephe, Adaptif Cephe Sistemleri, Adaptif Cephe Tasarımı, Adaptif Cephe Tasarım Kriterleri, Adaptif Cephe Tasarım Çözümleri

**1. GİRİŞ**

Son yıllarda giderek artan kaynak tüketimi ve çevre kirliliği binaların tasarımında sürdürülebilir yaklaşımların benimsenmesinin önünü açmıştır. Binaların çevreyle etkileşime girdiği bileşenleri olan cepheler, binanın yaşam döngüsü boyunca iç ve dış ortam arasında enerji alışverişi açısından geçirgen bir yapı görevi üstlenmektedir. Geleneksel bina kabuklarının büyük bir bölümü, binayı dış etkenlerden koruma işlevi görürken çevresel etkenlere ve kullanıcı taleplerine karşı büyük ölçüde “duyarsız” ve “tepkisiz” durumda olup kullanıcıların konfor gereksinimlerinin karşılanmasında binadaki ısıtma, havalandırma, iklimlendirme (HVAC) ve yapay aydınlatma gibi mekanik ve elektrik donanımlı enerji tüketen aktif sistemlere de ihtiyaç olunmasını zorunlu kılmaktadır. Bu durum binanın işletim sürecindeki maliyetini, karbon emisyonunu ve yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli kullanımı yerine aktif sistemlerin kullanılmasıyla enerji tüketimini arttıran sonuçlara sebep olmaktadır (Loonen, vd. 2013). Geleneksel cephe sistemlerinin optimum kullanıcı konforunu sağlama, ekonomik bina işletimi ve çevre dostu bina tasarımı gibi konulardaki yetersizliği, günümüz cephe tasarımında; akıllı teknoloji ile donatılmış, çevreye ve/veya kullanıcı taleplerine göre uyarlanabilir ve tasarımında sürdürülebilirlik ilkelerini temel alan adaptif cephe sistemlerinin gelişimine zemin hazırlamıştır. Çalışmanın üçüncü bölümünde, adaptif cephelerin tipolojileri ve karakteristik özellikleri aktararak sınıflandırması yapılmıştır.

Çevre ve kullanıcı faktörlerinin belirlediği sınır koşullarına bağlı olarak cephede dinamik veya kinetik etki yaratarak uyarlanabilir özellik gösteren adaptif cephelerin tasarım kriterlerinin ve tasarım yaklaşımlarında benimsenecek stratejilerin temelini oluşturan sürdürülebilirliğe dayalı belli ilkeler vardır. Bunlar; “Kaynak Korunumu”, “İnsan Merkezli Tasarım” ve “Yaşam Döngüsü Tasarımı” ana başlıkları altında sınıflandırılmaktadır (Kim, Rigdon, 1998). Kaynak korunumu ilkesi temel alınarak kaynakların verimli, etkin ve ekonomik kullanılmasına dayalı tasarım çözümleri; insan merkezli tasarım ilkesi temel alınarak kullanıcıların termal, görsel ve hava kalitesi konforunu artırıcı tasarım çözümleri; yaşam döngüsü tasarımı ilkesi temel alınarak da adaptif cephenin tasarım, yapım ve işletim süreçlerinde benimsenen sürdürülebilirliğe dayalı yöntem ve yaklaşımları kapsayan çözümler ortaya konmaktadır.

Adaptif cepheler, uyarlanabilir olma özellikleri ve fonksiyonları sayesinde birden çok ve birbirine bağlı performans gereksinimlerini karşılamaktadır (Loonen, vd. 2013). Yitmen ve Almusaed (2021), uyarlanabilirliği: “uyarlanabilirlik, zaman içinde somut değerlendirmeleri değiştiren tasarım faktörleri nedeniyle, değişen koşullarda birden çok kriteri düşünerek, istenen pratikliği sağlamaya yarayan bir sistem yeteneği olarak kabul edilir” şeklinde tanımlamışlardır. Sürdürülebilir cepheler için tasarlanan uyarlanabilir sistemler, binalarda enerji verimliliğini artırmanın yanında cephe bileşenlerinin özelliklerini çevresel uyaranlara göre geri dönüşümlü olarak değiştirerek mekana alınan güneş ışığı, hava ve nem gibi çevresel etmenleri kontrol etmekte olup kullanıcıların termal, görsel ve hava kalitesi konforunu arttırmaktadır. Adaptif cephelerin uyarlanabilme fonksiyonu gerçekleştirerek bu tasarım hedeflerinin karşılanmasını sağlayan işletim mekanizması; sensör, aktüatör, kontrol zekası gibi elektronik ve mekanik donanımların oluşturduğu sistemlerden veya bu sistemlere ihtiyaç duymadan algı-işletim sürecini bünyesinde gerçekleştiren akıllı malzemelerden meydana gelmektedir (Böke, vd. 2020). Çalışmanın üçüncü başlığında adaptif cephelerin bu işletim sistemleri, dışsal ve içsel sistemler olmak üzere ayrımı yapılarak aktarılmıştır.

Adaptif cepheler, kullanıcıların ihtiyaçlarına ve çevresel koşullara gerçek zamanlı yani çok hızlı ve anlık olarak cevap verecek şekilde ayarlanarak konforlu bir iç ortam yaratılmasını sağlayan, enerji etkin ve yüksek performanslı cephe sistemleridir. Adaptif cephe sistemlerinin tasarımında, sürdürülebilir tasarım ilkelerine dayalı olan ve farklı stratejileri barındıran belli tasarım kriterlerinin bulunduğu yapılan literatür taraması ve araştırmalar sonucunda tespit edilmiştir. Bu kriterlerden enerji etkinliği tasarım kriteri; binanın yaşam döngüsü boyunca tükettiği enerjinin azaltılması veya korunumu, yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli kullanımı ve bu kaynakların kullanılmasıyla enerji üretimi gibi tasarım stratejileriyle sağlanmaktadır (Haase, Amato, 2006). Güneş ışığı performansı kriteri ise; yararlı güneş ışığı aydınlatması, aşırı güneş ışığı kazanımının önlenmesi, kamaşmayı önleme, optimum güneş ışığı yönlendirmesi ve dağıtımı gibi stratejilerle sağlanmaktadır (Kim, 2015). Doğal ve yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş ışığı ve rüzgarın verimli ve tasarruflu kullanılmasına bağlı olarak benimsenen diğer tasarım kriterleri ise: doğal havalandırma, pasif ısıtma-soğutma, termal yalıtım ve HVAC sistemlerinin enerji tüketiminin azaltılması olarak sıralanmaktadır (Haase, Amato, 2006). Bu kriterlerle, analiz edilen örneklerin barındırdığı tasarım çözümlerinin sürdürülebilir tasarım bağlamında farklı açılardan değerlendirilmesi yapılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, gelişmiş bir cephe sistemi olarak adaptif cephelerin tasarımında temel alınan sürdürülebilir tasarım kriterlerini ortaya koymak ve bu kriterleri karşılamaya yönelik benimsenmiş farklı tasarım yaklaşımlarına bağlı olarak üretilen tasarım çözümlerinin, bu tasarım çözümlerini barındıran farklı adaptif cephe örnekleri üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesini yapmak hedeflenmiştir. Bu amaca yönelik olarak çalışmanın ilk bölümünde; adaptif cephe sistemlerinin sürdürülebilirliğe dayalı tasarımı konusuna temel oluşturmak için, bu cephe sistemlerinin tipolojileri ve karakteristik özellikleri ortaya konulmuş ve sınıflandırılması yapılmıştır. Yapılan literatür taraması ile ortaya konulmuş olan sınıflandırma şeması, adaptif cepheleri farklı tipolojilerine ve alt sınıflarına göre gruplandırmakta ve örneklendirmektedir. Çalışmanın daha sonraki bölümünde ise; incelemesi yapılan adaptif cephe örneklerinin analiz ve değerlendirme parametrelerini oluşturan tasarım hedefleri, kriterleri ve uyarlanabilirliği sağlayan fonksiyonları yapılan literatür taraması ile ortaya konmuştur. Literatür taraması sonucu elde edilen bilgilerden yola çıkarak ortaya konulan sürdürülebilirliğe dayalı tasarım kriterleri, çalışma için seçilen uygulanmış adaptif cephe örneklerinin barındırdığı tasarım çözümlerine göre analiz ve değerlendirme ölçütlerini oluşturmuştur. Ortaya konulan sınıflandırma şemasındaki tipoloji ve sınıflara mensup olan adaptif cephelerden kesişen tipoloji ve sınıftaki ancak farklı alt sınıftaki örnekler seçilmiştir. Adaptif cephe örneklerinin seçim kriter ve sebepleri çalışmanın dördüncü bölümünde açıklanmıştır.

## 3. ADAPTİF CEPHE SİSTEMLERİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞE DAYALI TASARIMLARI

Adaptif cepheler, içerdiği uyarlanabilir malzemeler, bileşenler ve sistemler aracılığıyla iç-dış mekan parametrelerine göre davranışlarını gerçek zamanlı olarak değiştirerek binanın enerji verimliliğine ve sürdürülebilirlik açısından performansına katkıda bulunan gelişmiş sistemlerdir (Romano vd. 2018). Çevre ve kullanıcılarla etkileşime girebilen bu sistemler mimari, işlevsel ve enerji ile ilgili gereksinimlerin yanında; güvenlik, hizmet verebilirlik, dayanıklılık, sağlamlık, yangın altında performans gibi yapısal tasarımla ilgili temel gereksinimleri de karşılamaktadır. Literatürdeki çalışmalar ve uygulanmış projeler araştırıldığında binalarda tasarlanan adaptif cephe sistemlerinin hedefleri genel olarak: termal konfor, iç mekan hava kalitesi, görsel konfor ve akustik konfor olarak sıralanabilir. Bu sistemler sayesinde bina kabuğu, değişken performans gereksinimlerine ve sınır koşullarına bağlı olarak genel bina performansını iyileştirmek amacıyla; işlevlerini, özelliklerini veya davranışlarını tekrar tekrar ve tersine çevrilebilir şekilde değiştirebilmektedir (Loonen vd. 2015). Yapılan literatür taramaları sonucu gelişmiş adaptif cephelerin barındırdığı karakteristik özelliklere göre tipolojilere ayrıldığı, öte yandan bu tipolojilerin benzer yönlerinin de olduğu ve bir gelişmiş adaptif cephe örneğinin barındırdığı teknolojiler ve kontrol sistemleriyle birden fazla tipolojide tanımlandığı anlaşılmıştır. Bu cepheler, bünyesinde barındırdığı sistem ve teknolojilere göre aktif ve pasif adaptif cephe sistemleri olmak üzere sınıflandırılabilir.

### 3.1. Adaptif Cephe Sistemlerinin Tipolojileri, Karakteristik Özellikleri ve Sınıflandırılması

Adaptif cepheler, geleneksel cephelerden farklı olarak değişen çevre koşullarından kaynaklı konfor eksikliklerini, uyarlanabilir olma özellikleri sayesinde çevresel değişikliklere göre ayarlanarak karşılamaktadır. Sisteminde birbiriyle entegre çalışan sensör, aktüatör ve

kabuktan geçen güneş radyasyonunu veya hava miktarını düzenleyen kontrol üniteleri sayesinde bina kullanıcılarının konforunu optimize etmek için daha az teknik bina ekipmanı (ısıtma, soğutma, havalandırma sistemleri) gerektirerek binanın enerji talebini azaltmaktadır (Voight vd. 2022). Bu şekilde binanın yaşam döngüsü boyunca işletme maliyetinde ve CO2 emisyonunda ciddi ölçüde bir azalma meydana getirilip ekonomiklik sağlanmaktadır.

Genellikle gölgeleme veya ışığı yönlendirme işlevi gören bu sistemler, aynı zamanda güneş ısı kazancını kontrol ederek parlama ve aşırı ısınmayı da önleyebilmektedir (Tabadkani vd. 2021). Uyarlanabilir cephe sistemleri binanın toplam enerji tüketimini azaltmak amacıyla iklim koşullarındaki değişikliklere tepki verecek şekilde optimize edilmiştir (Bui vd. 2020). Hava değişimlerine, kullanıcı gereksinimlerine, günlük ve mevsimsel döngülere yanıt olarak zaman içinde işlevlerini ve özelliklerini değiştiren adaptif cephe sistemleri bünyesinde barındırdığı; teknolojilerin, düzenlemelerin ve kontrol mekanizmalarının doğasına dayalı olarak karakterize edilmektedir (Tabadkani, 2021; Romano vd. 2018). Yapılan literatür taramalarından yola çıkarak adaptif cephe tipolojilerini: Biyomimetik, kinetik, akıllı, etkileşimli, duyarlı, pasif ve değiştirilebilir cepheler olarak sıralamak mümkündür. Farklı mekanizmaya ve teknolojiye sahip olan bu cepheler, bünyesinde aynı veya benzer tasarım strateji ve çözümlerini barındırmasıyla bazı yönlerden benzeşebilmektedir. Örneğin bir adaptif cephe sistemi, tasarımındaki stratejiler ve çözümler bakımından farklı kategorideki adaptif cephe tipolojisiyle uyusabilmektedir. Aşağıdaki tabloda (Tablo 1) farklı tipolojideki adaptif cephe sistemleri, karakteristik özelliklerine göre gruplandırılmıştır. Bu karakteristik özellikler, cephe tasarımında günışığı performansı ve enerji etkinliği gibi sürdürülebilir tasarım kriterlerini karşılayan stratejileri ve çözümleri içermektedir.

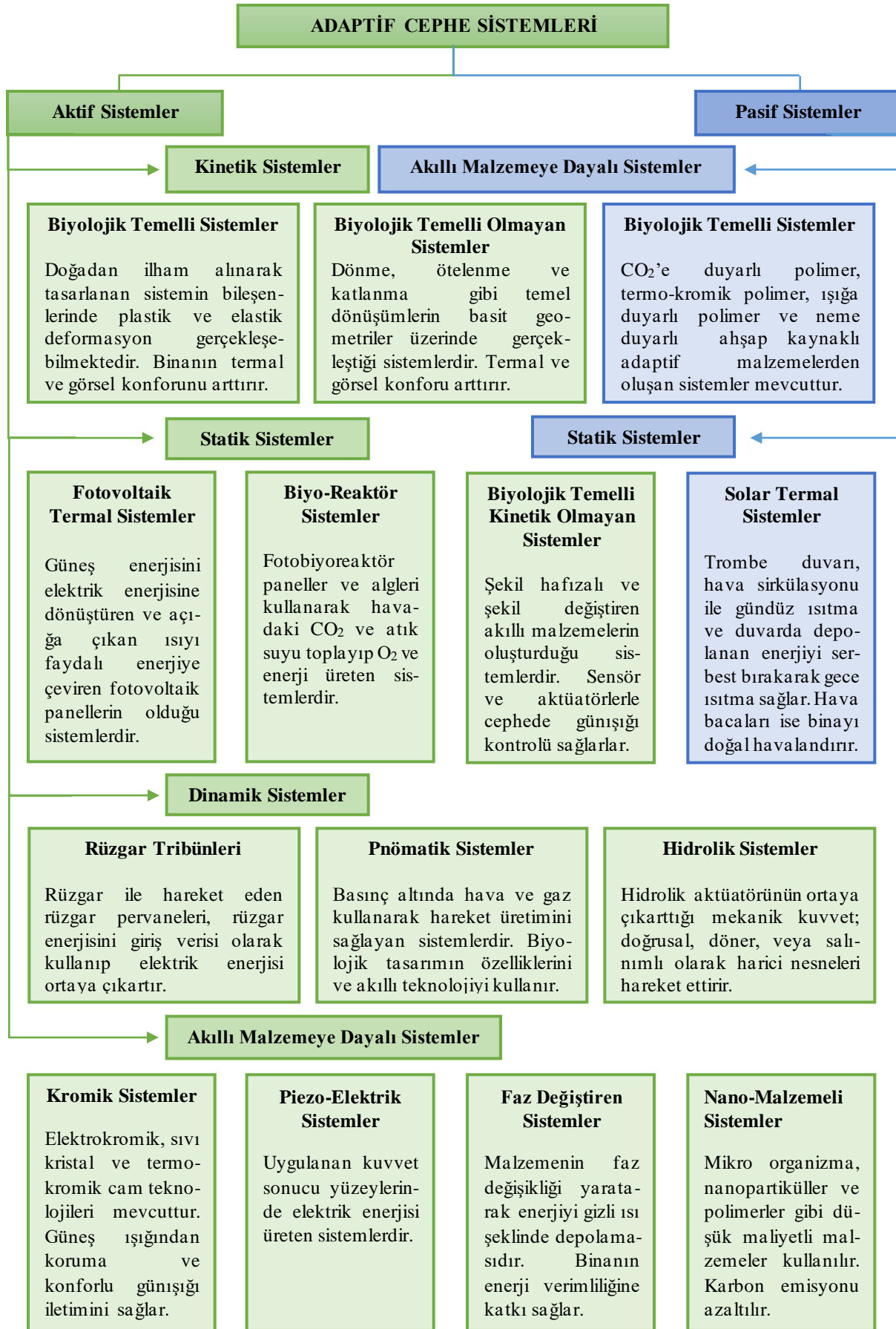
**Tablo.1** Karakteristik Özellikler Bakımından Farklı Tipolojideki Adaptif Cephe Sistemlerinin Gruplandırılması (Romano, vd. 2018. s.74'den uyarlanmıştır)

Güneş enerjisinin toplanması ve depolanması için yüksek performanslı yenilikçi malzemeler ve sistemler	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Biyomimetik Veya Biyo-İlhamlı Cepheler</b></li> <li>• <b>Akıllı Cepheler</b></li> <li>• <b>Kinetik Cepheler</b></li> <li>• <b>Duyarlı Cepheler</b></li> </ul>
Güneş radyasyonunu kontrol etmeyi sağlayan mobil bileşenler	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Akıllı Cepheler</b></li> <li>• <b>Duyarlı Cepheler</b></li> <li>• <b>Değiştirilebilir Cepheler</b></li> </ul>
Bina içi konforu artırmak ve/veya kontrol altına almak için tasarlanmış teknolojik çözümler	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Kinetik Cepheler</b></li> <li>• <b>Akıllı Cepheler</b></li> <li>• <b>Etkileşimli Cepheler</b></li> <li>• <b>Değiştirilebilir Cepheler</b></li> </ul>
Mekanik havalandırma sistemleriyle birlikte doğal havalandırmayı sağlayan çözümler	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Duyarlı Cepheler</b></li> <li>• <b>Pasif Cepheler</b></li> </ul>
Donanımların ve bina kabuğu elemanlarının yönetimini sağlayan bina otomasyon sistemleri	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Akıllı Cepheler</b></li> <li>• <b>Duyarlı Cepheler</b></li> </ul>

Gelişmiş adaptif cephe tipolojileri, adaptasyon mekanizmaları ve cephe ile kullanıcı etkileşimi veya cephe ile iklimsel ortam etkileşimine göre belirlenebilmektedir (Tabadkani, vd. 2021). Adaptif cephelerde uyarlanabilirlik fonksiyonu; akıllı, değiştirilebilir ve biyomimetik cephe sistemleri için dış iklim koşullarına dayalı termo-fiziksel özelliklerin düzenlenmesi şeklinde yorumlanabilirken duyarlı ve kinetik cephe sistemleri için ise, binanın enerji ihtiyacına göre dinamik olarak enerji üretme kapasitesi şeklinde yorumlanabilmektedir (Romano, vd. 2018). Tabadkani vd. (2021), kinetik ve akıllı cephelerin diğer tipolojilere kıyasla adaptif cephe terminolojisini daha geniş bir konsept haline getirdiğinden bahsetmekte olup bu sistemlerle sadece bireysel taleplerin karşılanmadığı, bununla beraber pek çok parametreyi optimize etmek için çözüm arandığını da söylemektedir. Adaptif cepheleri, yapılan bu tanımlamalar dışında içerdiği aktif, pasif veya ikisinin bir kombinasyonu olan sistemlere göre ayırmak da mümkündür. Adaptif cepheler, uyarlanabilirliği sağlayan bu sistemler ve kontrol mekanizmaları sayesinde dış ortam koşullarıyla etkileşime girerek kullanıcıların konfor ihtiyaçlarını karşılamakta ve binanın enerji verimliliğine katkı sağlamaktadır.

Aktif ve/veya pasif sistemleri içeren adaptif cephelerin çevreyle ve/veya kullanıcıyla etkileşime giren bileşenleri uyarlanabilir özellik gösterirken cephede farklı şekillerde dinamiklik meydana getirmektedir. Adaptif cephelerden biyomimetik tasarıma sahip olmayan ve interaktif veya etkileşimli özellikte olan kinetik cepheler; çevresel ve/veya kullanıcı etkileşimli akıllı kontrol sistemleri, mekanik aktüatörler ve elektronik donanımlar sayesinde modüler bileşenlerinde dönme ve ötelenme gibi temel dönüşümsel hareketleri veya katlanma gibi tek bir düzlemde olmayıp 3 boyutlu uzayda gerçekleşen ve bu temel hareketleri de içeren kompleks dönüşümsel hareketleri, geri alınabilir bir şekilde gerçekleştirerek binadaki konfor düzeyini arttırmaktadır (Tabadkani, vd. 2021). Temel hareketler veya katlanma hareketi gerçekleştirerek dinamiklik kazanan bu cepheler dışında, sistemlerinde biyolojik temelli mekanizmalar bulunduran başka kinetik sistemli adaptif cepheler de mevcuttur. Bunlar doğadaki mekanizmalardan ilham alınarak tasarlanmış olup bileşenlerinde ölçeklenme veya elastik deformasyona dayalı eğilme ve bükülme gibi kompleks hareketler gerçekleştirerek binadaki konfor seviyesini arttırmaktadır (Tabadkani, vd. 2021; Hosseini, vd. 2021). Kinetik cephe sınıfına girmeyen ve doğrudan malzemeye dayalı sensör ve aktüatör bulunduran sistemlere sahip adaptif cepheler ise, içerdiği sistemlerin aktif veya pasif olmasına göre ayrılmakta olup aktif sistemlerde akıllı malzemeler, pasif sistemlerde ise duyarlı malzemeler kullanılmaktadır (Tabadkani, vd. 2021).

Aktif adaptif cepheler kapsamında olup kinetik cepheler sınıfına girmeyen başka sistemler de mevcuttur. Bunlara yapılan literatür taramasından yola çıkarak statik sistemler olan; Fotovoltaik entegre edilmiş termal sistemler, biyo-reaktör sistemler ve dinamik sistemler olan; rüzgar türbinleri, pnömatik ve hidrolik sistemler örnek gösterilmektedir. Akıllı malzeme içeren adaptif cephelere ise: Kromojenik, piezo-elektrik, faz değiştiren ve burada sayılanların dışındaki nanomalzeme sistemli cepheler örnek gösterilmektedir. Pasif adaptif cephelere ise örnek olarak yukarıda bahsedilen malzemeye dayalı sistemlerin dışında statik sistemler olan solar termal sistemler gösterilebilir. Yukarıda sıralanan adaptif cephe sistemleri aşağıdaki diyagramda aktif ve pasif olmak üzere ayrılarak sınıflandırılmış ve örneklendirilerek açıklanmıştır (Mohtashami, vd. 2022; Loonen, vd. 2015; Gallo, 2017; Kuda, 2022; Zakirullin, 2020; Attia, 2020; Aydoğan, 2018; Harry, 2016; Elrayies, 2018; Lopez, 2020).



Şekil. 1 Adaptif Cephe Sistemlerinin Sınıflandırılması

Adaptif cephe sistemleri kapsamında yapılan literatür taramaları sonucu diyagramdan da anlaşılacağı üzere adaptif cepheler, pasif ve aktif sistemler olmak üzere 2 ana sınıfa ayrılmıştır. Farklı özellik ve fonksiyonlara sahip farklı adaptif cephe teknolojileri aktif sistemler başlığı altında; kinetik, statik, dinamik ve akıllı malzemeye dayalı sistemler olarak alt kategorilere ayrılmış olup pasif sistemler başlığı altında ise, akıllı malzemeye dayalı ve statik sistemler olarak alt kategorilere ayrılmıştır. Yapılan kapsamlı araştırma sonucu ulaşılmış ve diyagramda da her biri ayrı bir şekilde açıklanmış olan bu sistemler, ait olduğu kategorinin altında kısaca tanımlanmış ve açıklamaların sonunda da sistemlerin sürdürülebilirliğe dayalı fonksiyonları ortaya konmuştur. Ortaya konulan diyagramdan yola çıkarak, her bir cephe sisteminin tasarım yaklaşımı, çözümleri ve içerdiği teknolojileri farklı olsa da fonksiyon açısından benzerlik taşıdıkları anlaşılmaktadır. Bu fonksiyonlar sürdürülebilirliğe dayalı cephe tasarımı için temel alınacak ilkelere dayanmaktadır. Çalışmanın giriş bölümünde ortaya konulan bu ilkelere dayalı olarak tasarlanacak olan adaptif cephelerin fonksiyonel özellikleri ile karşılaşması beklenen belirli sürdürülebilir tasarım kriterleri bulunmaktadır. Sürdürülebilir kriterlere göre fonksiyonları belirlenen adaptif cephe sistemlerinin gerçek zamanlı bir şekilde çevre koşullarına göre uyarlanabilir olma özelliği sayesinde kullanıcı konforu en üst seviyede tutulmaktadır. Adaptif cepheler, binadaki enerji tüketimini ve karbon salınımını azaltıp yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelen tasarımlar olarak binanın sürdürülebilirliğine önemli ölçüde katkı sağlamaktadır.

### **3.2. Adaptif Cephe Sistemlerinin Sürdürülebilirliğe Dayalı Tasarım Hedefleri, Kriterleri ve Uyarlanabilirliği Sağlayan Fonksiyonları**

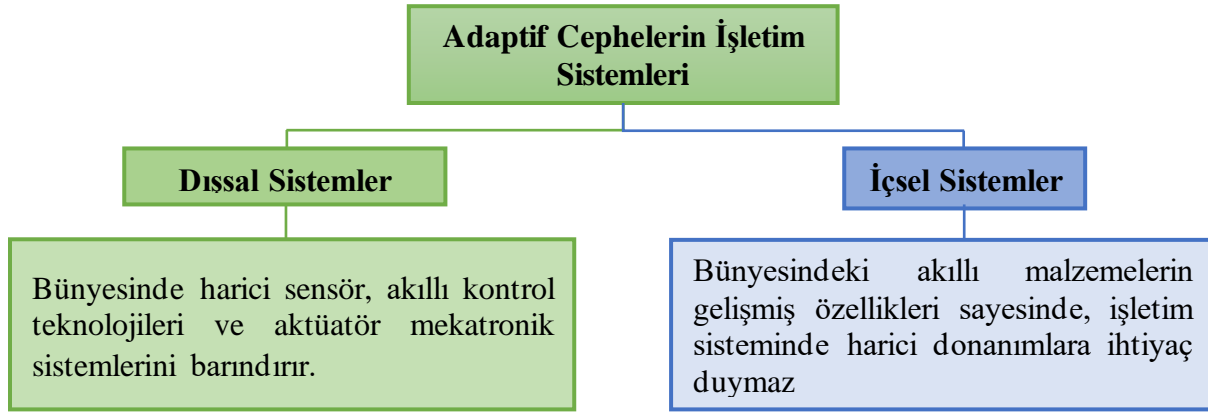
Adaptif cepheler güneş radyasyonu, dış ortam sıcaklığı, rüzgar, nem, yağış ve gürültü gibi çevresel etkenlere uyarlanabilir fonksiyonları ile yanıt vererek iç ortamdaki termal, görsel, akustik ve hava kalitesi konforunun artmasını sağlayıp, binanın enerji tasarrufuyla işletilmesine katkıda bulunmaktadır (Aelenei, vd. 2016; Yitmen, vd. 2021). Adaptif cephe sistemlerinin tasarımında, bu sistemlerin uyarlanabilirlik fonksiyonları sayesinde karşılaşması beklenen belirli sürdürülebilir tasarım hedefleri bulunmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucu bu hedefleri; enerji etkinliği, termal konfor, hava kalitesi konforu ve görsel konfor olarak ayırmak mümkündür. Bünyesinde pasif ve/veya aktif sistemleri barındıran uyarlanabilir bina cepheleri, belirlenmiş bu hedeflere yönelik olarak içerdiği fonksiyonel özellikler sayesinde enerji üretimi; enerjinin korunumu ve depolanması; ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) aktif sistemlerinin enerji tüketiminin azaltılması; güneş ışığı kontrolü; pasif havalandırma; CO2 emisyonunu azaltma veya absorbe etme; kamaşmayı önleme; gölgeleme ve termal yalıtım gibi sürdürülebilir tasarım kriterlerini karşılayabilmektedir (Alkhatib, vd. 2021; Böke, vd. 2020; Aelenei, vd. 2016; Yitmen, Almusaed, 2021). Adaptif cepheler, uyarlanabilirlik özellikleri ve fonksiyonları sayesinde bina kullanıcıları ve dış çevre arasındaki enerji akışını kontrol edebilmekte olup sürdürülebilir tasarım kriterlerine bağlı olarak sürdürülebilir tasarım hedeflerinde yer alan farklı kullanıcı konfor düzeylerinin artmasını sağlayabilmektedir (Alkhatib, vd. 2021). Ayrıca bu cepheler; güneş ısı, yağmur nüfusu, hava ve su buharı akışı, dayanıklılık, stabilite, yangın, gürültü ve estetik gibi bina kabuğunun işletimsel ihtiyaçlarını korumak ve geliştirmek için iç ve dış koşullardaki değişikliklere doğru yanıtı verebilen çok işlevli sistemlerdir (Yitmen, vd. 2021). Adaptif cephe sistemlerinin sürdürülebilir tasarım çözümlerine göre değerlendirme ölçütleri, aşağıdaki tabloda da (Tablo 2) gösterilmiş olan sürdürülebilirliğe dayalı tasarım hedefleri ve kriterleri olarak belirlenmiştir.



**Tablo. 2** Adaptif Cephe Sistemlerinin Sürdürülebilirliğe Dayalı Tasarım Hedefleri ve Kriterleri

Enerji Etkinliği	Termal Konfor	Hava Kalitesi Konforu	Görsel Konfor
<ul style="list-style-type: none"> <li>Güneş ışığı gölgeleme</li> <li>Pasif havalandırma ve iklimlendirme</li> <li>Termal yalıtım</li> <li>Enerji üretimi</li> <li>Enerji korunumu</li> <li>Enerji depolama</li> <li>HVAC sistemlerinin enerji tüketiminin azaltılması</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Güneş ışığı gölgeleme</li> <li>Termal yalıtım</li> <li>Pasif havalandırma ve iklimlendirme</li> <li>Güneş ışığı kontrolü</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pasif havalandırma ve iklimlendirme</li> <li>CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltma veya absorbe etme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Güneş ışığı gölgeleme</li> <li>Güneş ışığı kontrolü</li> <li>Kamaşmayı önleme</li> </ul>

Gerçek zamanlı olarak etki gösteren bu sistemler, binanın termal depolama kapasitesinin akıllı kullanım yoluyla kazanılmasına yardımcı olmaktadır. Bir adaptif cephe kabuğundaki güneş kırıcı cihazların geometri ve biçim gibi fiziksel veya çeşitli hareketleri gerçekleştirerek değiştirdiği konum ve düzlem gibi dönüşümsel özellikleri, binanın farklı konumlarında ve yüzeylerindeki farklı ortam koşullarına ve/veya kullanıcıların bireysel olarak talep ettiği farklı konfor gereksinimlerine bağlı olarak değişebilmektedir (Loonen, vd. 2013). Adaptif cepheler, kontrol sistemlerinin işleyişine göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlar, konfigürasyonları yalnızca kullanıcılar tarafından manuel olarak değiştirilebilen ve otomatik kontrol sistemleriyle çevresel koşullara bağımsız olarak uyum sağlayabilen adaptif cephelerdir. Adaptif cephelerin uyarlanabilir özellikteki fonksiyonları, bu kontrol mekanizmalarını gerçekleştiren içsel veya dışsal işletim sistemlerinin işleyişi sayesinde gerçekleşmektedir. Sensör, kontrol teknolojileri ve aktüatör gibi bileşenlerin oluşturduğu ve otomasyona dayalı harici mekatronik donanımlarla yönetilen adaptif cephe dışsal işletim sistemi ile çalışmakta iken, bünyesinde bulunan akıllı malzemelerin gelişmiş özellikleri sayesinde harici ekipmanlara ihtiyaç duyulmadan yönetilen adaptif cepheler ise içsel işletim sistemi ile çalışmaktadır (Böke, vd. 2020). Aşağıdaki diyagram (Şekil 2), adaptif cephelerin dışsal ve içsel olarak ayrılan işletim sistemlerinin özelliklerini açıklamaktadır.



**Şekil 2.** Adaptif Cephelerin İşletim Sistemlerine Göre Ayrımı

İçsel ve dışsal işletim sistemleriyle yönetilen adaptif cepheler; enerji etkinliği ve korunumu, termal konfor, hava kalitesi konforu ve görsel konfor gibi sürdürülebilir tasarım hedeflerini ve bu hedeflerin içerdiği alt kriterleri, uyarlanabilirliği sağlayan fonksiyonları sayesinde karşılamaktadır. Bu fonksiyonlar genel olarak tüm sürdürülebilir tasarım hedefleri için gerçekleşen: önleme, toplama, reddetme, modüle etme gibi eylemleri kapsamaktadır. Uyarlanabilir eylemleri meydana getiren adaptif cephelerin tepki süresi; saniyeler, dakikalar, saatler, mevsimler hatta yıllar olarak değişkenlik göstermektedir. Sınır koşullarındaki değişikliklere yanıt verme hızını belirleyen bu süreler; uygulanan teknolojiye, tasarımcılar tarafından kararlaştırılan zaman ölçeğine veya rüzgar, ve değişikliklerin saniyeler içinde gerçekleştiği günışığı koşullarına bağlıdır (Loonen vd. 2015; Aelenei, vd. 2016). Adaptif cephelerin uyarlanabilir fonksiyonları aşağıdaki tabloda (Tablo 3), sürdürülebilir tasarım hedeflerine göre ayrılmış bir şekilde gösterilmektedir.

**Tablo 3.** Adaptif Cephelerin Sürdürülebilir Tasarım Hedeflerine Göre Ayrılmış Uyarlanabilirliği Sağlayan Fonksiyonları (Loonen, vd. 2015. s.1289'dan uyarlanarak hazırlanmıştır)

Enerji Etkinliği	Termal Konfor	Hava Kalitesi Konforu	Görsel Konfor
Rüzgar enerjisini ve güneş ışığını toplayıp elektrik ve termal enerjiye dönüştürmek.	Güneş kazanımlarını önlemek, reddetmek, kabul etmek veya modüle etmek.	Dış havanın değişimi ve filtrelenmesi için kontrollü gözenekliliğin olması.	Görülebilir ışığı önlemek, reddetmek, kabul etmek veya yönlendirmek.

Bu fonksiyonları gerçekleştirerek sürdürülebilir tasarım hedeflerinin ve kriterlerinin karşılanmasını sağlayan adaptif cephe sistemlerinin tasarımları; bina genel enerji kullanımı, CO2 emisyonları ve yaşam döngüsü maliyeti gibi parametreler göz önünde bulundurularak ve binanın performans göstergeleri dikkate alınarak yapılmalı ve uyarlanabilir sistem çözümleri buna göre geliştirilmelidir. Tabloda da gösterildiği gibi (Tablo 3), uyarlanabilirlik fonksiyonlarının sürdürülebilir tasarım çözümleriyle gerçekleştiği adaptif cephelerde güneş ve rüzgar doğal enerji kaynaklarının verimli kullanılmasıyla binada; enerji etkinliği, termal konfor, hava kalitesi konforu ve görsel konfor sağlanmaktadır.

#### 4. ÖRNEK ADAPTİF CEPHE UYGULAMALARINDAKİ SÜRDÜRÜLEBİLİR TASARIM KRİTERLERİNE YÖNELİK TASARIM ÇÖZÜMLERİNİN ANALİZİ

Adaptif cephelerin barındırdığı gelişmiş sistemleri ve tasarım çözümleri ile ortaya koyduğu fonksiyonları sayesinde bina işletiminde enerji etkinliğine katkıda bulunularak ekonomiklik sağlanmaktadır (Yitmen vd. 2021). Çalışmanın bu bölümünde, adaptif cephe sistemlerinin sürdürülebilir tasarım kriterlerine yönelik ortaya konulan tasarım çözümlerinin değerlendirmesini yapmak amacıyla cephesinde veya kabuğunda adaptif sistem bulunduran bina örnekleri araştırılmış ve bu örneklerden beş tanesi, farklı adaptif cephe alt sınıflarından olmak üzere seçilerek analiz edilmiştir. Modern yaklaşımlarla tasarlanıp yapım teknikleri ile günümüze değin uygulanmış adaptif cephe örneklerinin büyük çoğunluğunun aktif sistemlerden oluştuğu tespit edilmiş olup dört örnek bu sebeple aktif sistemlerden, beşinci örnek ise karşılaştırma yapmak adına diğer sistemlerin aksine pasif sistemlerden seçilmiştir. Seçilen her bir örnek, bağlı bulunduğu adaptif cephe alt sınıfında öne çıkan ve farklı akademik çalışmalarda da incelenmiş popüler örneklerdir. Ayrıca seçilen bir örnek en erken kinetik cephe uygulamalarından biri olma özelliği de taşımaktadır. Bu yönden geçmiş ve günümüze yakın zamanda uygulanmış adaptif cephe örneklerinin, barındırdığı sürdürülebilir tasarım çözümleri açısından karşılaştırmasını yapmak da mümkün olmuştur. Bu adaptif cephe örneklerinin barındırdıkları sürdürülebilir tasarım kriterleri ortak bir tabloda (Tablo 9) gösterilmiş olup örneklerin bu kriterleri karşılayan tasarım çözümleri, çalışmanın “Bulgular ve Tartışma” bölümünde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

##### 4.1 Arap Dünya Enstitüsü Binası Adaptif Cephe Tasarımı

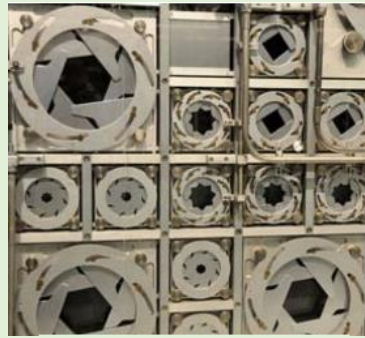
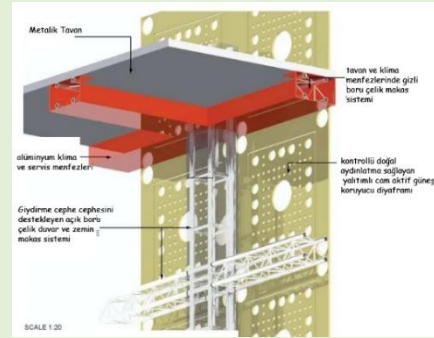
Jean Nouvel tarafından tasarlanmış 1987’de Fransa/Paris’te inşaatı tamamlanan Arap Dünya Enstitüsü binasının cephesi, aktif sistemlere sahip olup kinetik sistemler sınıfına ve biyolojik temelli olmayan sistemler alt sınıfına giren bir adaptif cephe örneğidir. Kinetik cephe sistemi olarak uygulanmış en erken örneklerdendir (Decker, Zarzycki, 2014). Güney cephesini oluşturan ve “Mashrabiya” geleneksel motifinin yüksek teknolojilerle modernize edilmiş hali olarak tasarlanan güneş kırıcı ekranlar, farklı günlerde ve günün her saatinde değişen çevresel koşullara göre uyarlanabilir özellik göstererek, iç mekana alınan günışığını filtreleyip kullanıcıların konfor düzeyini arttırmaktadır (El Semanry, Gawad, 2017). 62.4X26 m ölçülerindeki Güney cephesinde tasarlanmış, çeşitli boyutlardaki metal diyaframlardan oluşan güneş kırıcı panellerin açılıp kapanma hareketi yapmasıyla, cephede günışığı iletimi düzenlenmektedir (Ahmed, vd. 2015; Moloney, 2006). Metal panellerin açılıp-kapanma hareketi ile, mekanda günışığına maruz kalma süresi azaltılarak gölgeleme sağlanmaktadır (Semary, Gawad, 2017). Cam cephenin iç tarafına yerleştirilen kinetik “Mashrabiya” motifi ilhamlı gölgeleme elemanları, günışığı parlamasını önlerken aydınlatma miktarını da kontrol etmektedir. Günışığı mekana alınırken, enerjisinin çoğu absorbe edilmekte ve çok az bir kısmı yansımaktadır (Decker, Zarzycki, 2014).

**Tablo 4.** Adaptif Cephe Örneğinin Özellikleri

Proje Adı - Yıl	Mimarı / Tasarımcısı	Proje Yeri	Proje Tipi	Proje İklimi
Arap Dünya Enstitüsü 1987	Jean Nouvel	Paris / Fransa	Kültür Merkezi	Okyanus İklimi
Adaptif Cephe Tipolojisi	Adaptif Cephe Sistemi	Adaptif Cephe Sınıfı	Adaptif Cephe Alt Sınıfı	
Kinetik Cephe, Akıllı Cephe, Etkileşimli Cephe	Aktif Sistemler	Kinetik Sistemler	Biyolojik Temelli Olmayan Sistemler	

**Adaptif Cephe Sistem ve Detay Görselleri**

Şekil 3. URL-1

Şekil 4. Decker,  
Zarzycki 2014.

Şekil 5. URL-2



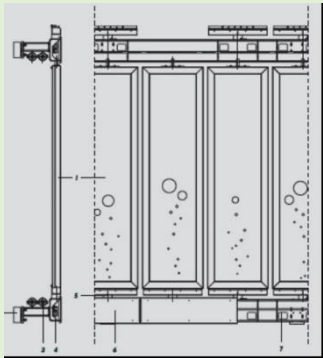
**Adaptif Cephe Sürdürülebilir Tasarım Hedefleri**

Enerji Etkinliği	Termal Konfor	Hava Kalitesi Konforu	Görsel Konfor
Var	Var	Yok	Var

**4.2 BIQ Binası Adaptif Cephe Tasarımı**

Splitterwerk Design Office tarafından tasarlanmış, 2013 Almanya Hamburg'da inşaatı tamamlanan BIQ binasının cephesi, aktif sistemlere sahip olup statik sistemler sınıfına ve biyo-reaktör sistemler alt sınıfına giren bir adaptif cephe örneğidir. BIQ evi, cephesinde bulundurduğu 120 adet paneldeki 200 m<sup>2</sup>'lik entegre foto-biyoreaktörler aracılığıyla yenilenebilir enerji kaynağı olarak biyokütle ve ısı üretmektedir (URL-5; Wilkinson, 2016). Cephede kullanılan biyo-reaktör alg kolonileri, biyokütle üretilen atmosfere salınan CO<sub>2</sub> gazını absorbe ederek havayı temizlemekte ve bu şekilde binada sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır (Elrayies, 2018; URL-5). Cephe panellerindeki mikro-algler, doğal güneş ışığını absorbe ederek BIQ evi için dinamik gölgeleme cihazları görevi üstlenmektedir. Absorbe edilen güneş ışığı miktarıyla orantılı olarak binada sağlanan gölgeleme, biyo-reaktörlerin içinde bulunan alglerin yoğunluğuna bağlı olmaktadır (Wilkinson, 2016; URL-4). Termal yalıtım ve güvenlik için iki yüzü de camla kaplı olan foto biyo-reaktör panel sistemi, bina çevresinde termal olarak kontrol edilebilen mikro iklimlendirme sağlayarak enerji etkin bina tasarımında efektif bir cephe tasarımı alternatifi sunmaktadır (Elrayies, 2018; Wilkinson, 2016).

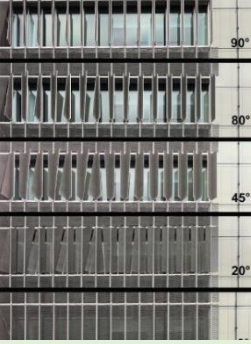

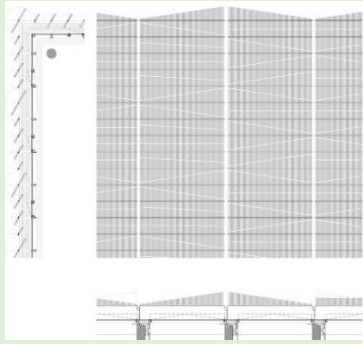
**Tablo 5. Adaptif Cephe Örneğinin Özellikleri**

Proje Adı – Yılı	Mimarı / Tasarımcısı	Proje Yeri	Proje Tipi	Proje İklimi
BIQ Binası 2013	Splitterwerk Design Office	Hamburg / Almanya	Pasif Enerji Evi	Okyanus İklimi
Adaptif Cephe Tipolojisi	Adaptif Cephe Sistemi	Adaptif Cephe Sınıfı		Adaptif Cephe Alt Sınıfı
Akıllı Cephe, Etkileşimli Cephe,	Aktif Sistemler	Statik Sistemler		Biyo-Reaktör Sistemler
Adaptif Cephe Görünümleri, Sistem ve Detay Görselleri				
				
Şekil 6. URL-4	Şekil 7. URL-5	Şekil 8. URL-6		
Adaptif Cephe Sürdürülebilir Tasarım Hedefleri				
Enerji Etkinliği	Termal Konfor	Hava Kalitesi Konforu	Görsel Konfor	
Var	Var	Var	Var	

### 4.3 Q1 Thyssen Krupp Headquarter Binası Adaptif Cephe Tasarımı

JSWD Architects tarafından tasarlanmış, 2010 Almanya/Essen’de inşaatı tamamlanan Q1 Thyssen Krupp Headquarter binasının cephesi, aktif sistemlere sahip olup kinetik sistemler sınıfına ve biyolojik temelli sistemler alt sınıfına giren bir adaptif cephe örneğidir. Güneş pozisyonuna göre açılıp-kapanma hareketi yaparak görüş alanını en üst düzeye çıkaran çelik panellerin uyarlanabilir fonksiyonu, fazla ısı kazanımını azaltarak termal yalıtım sağlamaktadır (URL-9). Düşey doğrultulu, paslanmaz çelik malzemeden yapılmış ve üçgen, kare veya trapezoid (yamuk) geometrili güneş kırıcı panellerin, güneş pozisyonunu takip ederek gerçekleştirdiği kuş tüyü hareketi benzeri uyarlanabilir kinetik dönüşümü sayesinde, iç mekanda konforu arttıracak şekilde gölgeleme sağlanmaktadır (Hraska, 2018; Barozzi, vd. 2016). Kamaşma koruması sağlayan harici ve dikey olarak yönlendirilmiş metal güneş kırıcıların kinetik mekanizması, otomasyon teknolojileri kullanılarak yönetilmektedir (Böke, vd. 2020). Otomatik kontrole dayanan sistemin gün boyunca güneşi takip ederek ayarlanmasıyla, optimum güneşten korunma sağlanmaktadır. Panelleri oluşturan yatay çitaların takibi, şekli ve açısı, ışığın dolaylı olarak yansıtılmasını ve elektrikli aydınlatma ihtiyacını ortadan kaldırarak ofislere sürekli olarak doğal ışık alınmasını sağlamaktadır (Aelenei, vd. 2018).

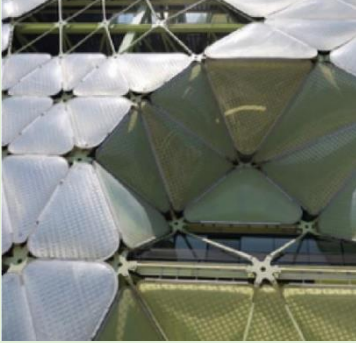

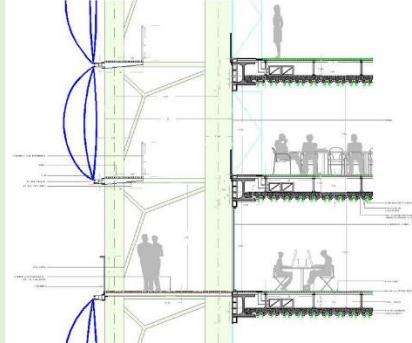
**Tablo 6.** Adaptif Cephe Örneğinin Özellikleri

Proje Adı – Yılı	Mimarı / Tasarımcısı	Proje Yeri	Proje Tipi	Proje İklimi
Q1 Thyssen Krupp Headquarter 2010	JSWD Architects	Essen / Almanya	Ofis Binası	Yarı-Okyanusal İklim
Adaptif Cephe Tipolojisi	Adaptif Cephe Sistemi	Adaptif Cephe Sınıfı		Adaptif Cephe Alt Sınıfı
Biyo-ilhamlı Cephe, Etkileşimli Cephe, Kinetik Cephe	Aktif Sistemler	Kinetik Sistemler		Biyolojik Temelli Sistemler
Adaptif Cephe Görünümleri, Sistem ve Detay Görselleri				
  				
Şekil 9. URL-7				
Şekil 10. URL-7				
Şekil 11. URL-8				
Adaptif Cephe Sürdürülebilir Tasarım Hedefleri				
Enerji Etkinliği	Termal Konfor	Hava Kalitesi Konforu	Görsel Konfor	
Var	Var	Yok	Var	

#### 4.4 Media-TIC Binası Adaptif Cephe Tasarımı

Enric Ruiz-Geli Cloud 9 Team tarafından tasarlanmış, 2009 İspanya/Barcelona'da inşaatı tamamlanan Media-TIC binasının cephesi, aktif sistemlere sahip olup dinamik sistemler sınıfına ve pnömatik sistemler alt sınıfına giren bir adaptif cephe örneğidir. Binanın batı cephesindeki ETFE hava yastığı malzemesi, öğleden sonra nitrojenle doldurularak şeffaf cepheyi %90 oranında bloke etmekte ve bu yolla binanın fazla ısı kazancını önlemekte olup termal yalıtımını iyileştirmektedir (Kolarevic, Parlac, 2015). Her bir yastık cephe modülüne yerleştirilmiş pnömatik sistem ve basınç sensörü aracılığıyla güneş radyasyonunun ve yapay aydınlatmanın kontrolü sağlanmaktadır (Juaristi, Monge-Barrio, 2016). Cephe kabuğunun barındırdığı, girdi kaynağı olarak havayı kullanan pnömatik aktüasyon sistemi ve ısıyı kontrol edebilen sensörlerin fonksiyonu ile binada %20 oranında enerjiden tasarruf sağlanabilmektedir (URL-12; URL-13; Harry, 2016). Cephe kabuğunun dış tabakası şeffaf iken orta ve iç tabakaları şişirilip birleştirildiğinde opak haline gelebilen ve bu şekilde gölge oluşturabilen bir dokuya sahiptir. Bu dinamik dönüşüm sayesinde kullanıcıların doğrudan güneşiğine maruz kalması önlenip UV ışınlarının %85 oranında azaltılması sağlanmaktadır (Harry, 2016).



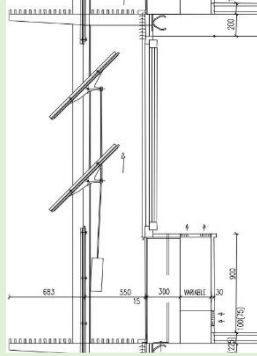
**Tablo 7. Adaptif Cephe Örneğinin Özellikleri**

Proje Adı – Yılı	Mimarı / Tasarımcısı	Proje Yeri	Proje Tipi	Proje İklimi
Media-TIC Binası 2009	Enric Ruiz-Geli Cloud 9 Team	Barcelona / İspanya	Bilgi ve İletişim Teknolojileri Merkezi	Ilıman İklim
Adaptif Cephe Tipolojisi	Adaptif Cephe Sistemi	Adaptif Cephe Sınıfı	Adaptif Cephe Alt Sınıfı	
Akıllı Cephe, Etkileşimli Cephe, Duyarlı Cephe	Aktif Sistemler	Dinamik Sistemler	Pnömatik Sistemler	
Adaptif Cephe Görünümleri, Sistem ve Detay Görselleri				
				
Şekil 12. Juaristi, Barrio 2016	Şekil 13. URL-10	Şekil 14. URL-11		
Adaptif Cephe Sürdürülebilir Tasarım Hedefleri				
Enerji Etkinliği	Termal Konfor	Hava Kalitesi Konforu	Görsel Konfor	
Var	Var	Yok	Var	

#### 4.5 Moravian Regional Kütüphane Binası Adaptif Cephe Tasarımı

Tomáš Adánek ve Petr Benedikt tarafından tasarlanmış, 2001 Çek Cumhuriyeti/Brno’da inşaatı tamamlanan Moravian Regional Kütüphane binasının cephesi, pasif sistemlere sahip olup statik sistemler sınıfına ve solar termal sistemler alt sınıfına giren adaptif cephe örneğidir. Cephede güneşin gölgelemesi sağlayan iki tip güneş kırıcı bulunmaktadır. Bunlar: Temizlik ve bakım amaçlı da kullanılabilen sabit yük taşıyıcı güneş kırıcılar ve motorlu düşey güneş kırıcılarıdır (Poirazis, 2006). Cepheyi oluşturan solar çift cidar kabuk sistemindeki güneş kırıcı elemanlar, soğutma mevsiminde açılmakta olup ısıtma mevsiminde ise kabuklar arasındaki önceden ısıtılmış havanın kullanılması için kapanmaktadır. Bu şekilde pasif olarak binayı hem havalandırmakta hem de termal yalıtımını sağlamaktadır (Tabadkani, vd. 2021; Sedlak, Kalousek, 2000). Cephe kabuğunun dış cidarındaki açılabilir pencereler, yılın sıcak zamanlarında binayı doğal havalandırarak serinletme sağlamaktadır. Bu pencereler soğuk zamanlarda ise kapanarak binanın cidarlar arasındaki boşlukta güneşin tarafından ısıtılan hava ile iklimlendirilmesini sağlamaktadır. Çift cidarlı adaptif cephenin bu fonksiyonları gerçekleştiren pasif sistemi, HVAC sistemlerinin enerji tüketimi azaltarak binada enerji verimliliği sağlamaktadır (Kutluay, vd. 2015).

**Tablo 8. Adaptif Cephe Örneğinin Özellikleri**

Proje Adı – Yılı	Mimarı / Tasarımcısı	Proje Yeri	Proje Tipi	Proje İklimi
Moravian Regional Kütüphane Binası 2001	Tomáš Adámek, Petr Benedikt	Brno / Çek Cumhuriyeti	Kütüphane Binası	Okyanus İklimi-Nemli Kara İklimi
Adaptif Cephe Tipolojisi	Adaptif Cephe Sistemi	Adaptif Cephe Sınıfı	Adaptif Cephe Alt Sınıfı	
Pasif Cephe	Pasif Sistemler	Statik Sistemler	Solar Termal Sistemler	
Adaptif Cephe Görünümleri, Sistem ve Detay Görselleri				
				
Şekil 15. URL-14	Şekil 16. Tabadkani, vd. 2021	Şekil 17. Sedlak, Kalousek, 2000		
Adaptif Cephe Sürdürülebilir Tasarım Hedefleri				
Enerji Etkinliği	Termal Konfor	Hava Kalitesi Konforu	Görsel Konfor	
Var	Var	Var	Var	

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yukarıdaki tablolarda (Tablo 4-8), farklı adaptif cephe alt sınıfına giren seçilmiş beş adet adaptif cephe örneğinin barındırdığı sürdürülebilir tasarım kriterlerini karşılamaya yönelik tasarım çözümleri analiz edilmiştir. Bu adaptif cephe örneklerinin bağlı olduğu adaptif cephe sınıfı ve alt sınıfı sırasıyla; kinetik sistemler/biyolojik temelli olmayan sistemler, statik sistemler/biyo-reaktör sistemler, kinetik sistemler/biyolojik temelli sistemler, dinamik sistemler/pnömatik sistemler, statik sistemler/solar termal sistemlerdir. Farklı adaptif cephe alt sınıfına sahip örneklerin seçilmesiyle, tasarım çözümlerinin farklı tasarım yaklaşımı ve yöntemleriyle nasıl ortaya konduğu ve sürdürülebilir tasarım kriterlerinin farklı açılardan nasıl sağlandığı çalışmanın bu bölümünde, örneklerin her kriter için karşılaştırmalı değerlendirmesi yapılarak irdelenmiştir. Adaptif cephe örneklerinin analizi sonucu bu cephe sistemlerinin enerji etkinliği, termal konfor, hava kalitesi konforu ve görsel konfor sürdürülebilir tasarım hedeflerini karşılamaya yönelik barındırdığı sürdürülebilir tasarım kriterleri; güneşli gölgeleme, pasif havalandırma, termal yalıtım, enerji üretimi ve



korunumu, HVAC sistemlerinin enerji tüketiminin azaltılması, güneşiği kontrolü, kamaşmayı önleme ve CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltma veya absorbe etme olarak tespit edilmiştir. Aşağıdaki tablo (Tablo 9), örnek adaptif cephelerin barındırdığı sürdürülebilir tasarım kriterlerini göstermektedir.

**Tablo 9.** Adaptif Cephe Örneklerinin Barındırdığı Sürdürülebilir Tasarım Kriterleri

	Arap Dünya Enstitüsü	BIQ Binası	Q1 Thyssen Krupp Headquarter	Media-TIC Binası	Moravian Regional Kütüphane Binası
Güneşiği Gölgeleme	✓	✓	✓	✓	✓
Güneşiği Kontrolü	✓		✓	✓	
Kamaşmayı Önleme	✓		✓		
Termal Yalıtım	✓	✓	✓	✓	✓
Enerji Üretimi		✓			
Enerji Korunumu	✓	✓	✓	✓	✓
Pasif Havalandırma ve İklimlendirme					✓
HVAC Sistemlerinin Enerji Tüketiminin Azaltılması					
CO <sub>2</sub> Emisyonunu Azaltma Veya Absorbe Etme		✓			

Adaptif cephelerin analizinde tespit edilen sürdürülebilir tasarım kriterleri, bu cephe sistemlerinde benimsenen tasarım çözümlerinin doğrudan o kriteri karşılmasına bağlı olarak belirlenmiştir. Yani adaptif cephelerin tasarımlarındaki çözümlerle gerçekleştirdiği fonksiyonların dolaylı olarak sağladığı tasarım kriterleri analiz tablolarına aktarılmamıştır. Barındırdıkları tasarım çözümleriyle doğrudan karşıladıkları tasarım kriterleri üzerinden analiz yapılmıştır. Aşağıdaki maddelerde, adaptif cephe örneklerinin barındırdığı sürdürülebilir tasarım kriterlerine yönelik benimsenen tasarım çözümlerine dair bulguların, her kriter için ayrı ayrı olmak üzere karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi yapılmıştır.

- **Güneşiği Gölgelemesi:** Bu kriterin, 5 adaptif cephe örneğinin tamamında karşılandığı gözlemlenmiştir. Tablo 4 ve 6'daki örneklerde, güneş kırıcı bileşenlerin kinetik dönüşümü ile gölgeleme sağlanmakta iken; tablo 5 ve 7'deki örneklerde ise akıllı malzemelerin dinamik fonksiyonları ile sağlanmakta olduğu gözlemlenmiştir. Tablo 8'deki örnekte ise, statik güneş kırıcıların pasif olarak gölgeleme sağladığı görülmüştür.

- **Güneşli Kontrolü:** Bu kriterin, otomatik cephe işletimini sağlayan akıllı kontrol sistemi sayesinde veya cepheyi oluşturan malzemenin barındırdığı sensörler aracılığıyla karşılandığı görülmüştür. Tablo 4 ve 6'daki kinetik cephelerin otomatik kontrol sistemleri ile cephenin güneş kırıcı bileşenlerinde, güneşin durumuna bağlı olarak kinetik dönüşüm gerçekleştirilerek uyarlanabilirlik sağlamakta olup mekana alınan güneşin kontrol edildiği; Tablo 7'deki örnekte ise, pnömomatik sistemi oluşturan ETFE malzemesinin termal kontrol fonksiyonu ile cephede güneşli kontrolünün sağlandığı gözlemlenmiştir.
- **Kamaşmayı Önleme:** Bu kriterin, Tablo 4'deki kültür merkezi ve Tablo 6'daki ofis binalarının adaptif cephe tasarımında karşılandığı görülmüştür. Kinetik cephe sınıfına giren iki örnekte de kamaşmayı önleme kriterinin, cephe bileşenlerinde gerçekleşen kinetik dönüşüm fonksiyonu sayesinde sağlandığı görülmüştür. Otomasyon sistemleri kullanılarak kontrol edilen cephe bileşenlerindeki kinetik dönüşümün, güneşin durumuna bağlı olarak optimum iç mekan koşullarını sağlayacak şekilde gerçekleştiği görülmüştür.
- **Termal Yalıtım:** Bu kriterin, 5 adaptif cephe örneğinin tamamında karşılandığı gözlemlenmiştir. Tablo 4, 6 ve 7'deki örneklerde, fazla güneşli kazancını önleme fonksiyonu ile termal yalıtım kriteri karşılanmakta olup, ilk iki örnekte kinetik sistemlerin uyarlanabilir fonksiyonu ile diğer örnekte ise ETFE malzemesinin uyarlanabilir özellik göstererek fonksiyon kazanması ile binada termal yalıtım sağlanmaktadır. Termal yalıtım tasarım kriterinin; Tablo 5'deki örnekte, biyo-reaktör sistemin binanın çevresinde kontrol edilebilir iklimlendirme oluşturması ile, Tablo 8'deki örnekte ise, solar çift cidar cephe sisteminin mevsimlere göre ısıtma veya serinletme ihtiyaçlarına yönelik olarak gerçekleştirdiği pasif iklimlendirme ile sağlandığı görülmüştür.
- **Enerji Üretimi:** Bu kriterin, analiz edilen örneklerden yalnızca birinde karşılandığı görülmüştür. Tablo 5'de yer alan bu cephe örneğinde, cephe panellerinde bulunan foto-biyoreaktörler aracılığıyla açığa çıkan ısı enerjisinin, binanın sıcak su ihtiyacını karşılamak ve mekanlarını ısıtmak için kullanıldığı ve bu yolla geri dönüşümü ile binada enerji verimliliğine katkı sağlandığı anlaşılmıştır.
- **Enerji Korunumu:** Bu kriterin, tüm adaptif cephe örneklerinde karşılandığı görülmüştür. Tablo 4, ve 6'daki örneklerde, yenilenebilir enerji kaynağı olarak güneşin verimli kullanılıp kontrollü bir şekilde içeriye alınarak, mekanı ısıtmak veya serinletmek için ihtiyaç duyulan enerjinin azaltılmasıyla; Tablo 5'deki örnekte, adaptif cephede kullanılan biyo-reaktör sistemin bina için iklimlendirme sağlamasıyla; Tablo 8'deki örnekte, cephede kullanılan çift kabuk sistemin binayı pasif olarak iklimlendirip HVAC sistemlerinin kullanımının azaltılmasıyla; Tablo 7'deki örnekte ise, İç mekan termal konforunu arttırmak için mekanik aktüatörlere ihtiyaç duyulmayıp örnekte bulunan pnömomatik aktüasyon sisteminin ve ısıyı kontrol edebilen sensörlerin fonksiyonuyla, binada %20 oranında enerji tasarrufu sağlanmasıyla enerji korunumu tasarım kriterinin karşılandığı gözlemlenmiştir.
- **CO2 Emisyonunu Azaltma Veya Absorbe Etme:** Bu kriterin, Tablo 5'deki adaptif cephe örneğinde karşılandığı görülmüştür. Cephe sisteminde kullanılan biyo-reaktör panellerdeki mikro-algler, CO<sub>2</sub> gazını absorbe ederek havayı temizlemektedir. Bu çözüm ile binanın sürdürülebilirliğine katkı sağlandığı anlaşılmıştır.

- **Pasif Havalandırma ve İklimlendirme:** Bu kriterin, Tablo 8'deki adaptif cephe örneğinde karşılandığı görülmüştür. Çift cidar solar güneş kırıcı kabuk sistemine sahip cephenin havalandırılması kış aylarında, kabuklar arasındaki ısınmış havanın dış kabuktaki panellerin kapanmasıyla katlar arasında dolaşarak iç kabuktaki pencereden içeri girip binayı pasif bir şekilde havalandırmasıyla; yaz aylarında ise, dış kabuktaki paneller açılarak soğuk havanın, cidar boşluğundan geçip kатları havalandırmasıyla pasif olarak gerçekleştiği anlaşılmıştır. Bu yolla havalandırılan binada, mekanik tesisat kullanımı azaltılarak enerji verimliliğinin elde edildiği ve mevsimlere göre ısıtma-serinletme yapılarak termal yalıtımın da sağlandığı görülmüştür.
- **HVAC Sistemlerinin Enerji Tüketiminin Azaltılması:** Bu kriterin, Tablo 8'deki adaptif cephe örneğinde karşılandığı görülmüştür. Çift cidarlı kabuk tasarımının, binayı yaz ve kış aylarında pasif olarak iklimlendirerek HVAC aktif sistemlerinin kullanımını azaltıp binada enerji verimliliğine katkı sağladığı anlaşılmıştır.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında öncelikle adaptif cephelerin tipolojileri, karakteristik özellikleri, sınıflandırılması ve sürdürülebilir tasarım kriterleri yapılan araştırmalar ve literatür taramaları sonucu ortaya konmuştur. Daha sonra seçilen adaptif cephe örnekleri, belirlenen tasarım kriterlerine yönelik barındırdığı tasarım çözümleri açısından analiz edilmiş olup bu analizlerden elde edilen bulgular üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Bu değerlendirmeler sonucunda adaptif cephelerin sürdürülebilir tasarım kriterlerini karşılayan tasarım çözümlerine ilişkin aşağıdaki gibi sonuç ve çıkarımlarda bulunulmuştur.

- Termal yalıtım ve enerji korunumu tasarım kriterlerinin, analizi yapılan tüm örneklerde karşılandığı görülmüştür. Adaptif cephelerin tipolojileri, ait olduğu sınıf ve barındırdığı sistemler farklılık gösterse de bu cephelerin, gelişmiş güneş kırıcılar olarak çevresel koşullara göre uyarlanıp güneşini kontrollü ve dengeli bir şekilde mekana alma fonksiyonu ortak olduğu için bu yolla sağlanan termal yalıtım ve enerji korunumu kriterlerinin de tüm adaptif cephelerde ortak tasarım kriterleri olduğu ancak bu kriterlerin sağlanmasında benimsenen tasarım yaklaşımlarının farklı olmasına bağlı olarak, ortaya konulan tasarım çözümlerinin de farklılık gösterdiği anlaşılmıştır. Bu bağlamda adaptif cephe tasarımı için önerilecek çözümlerin projedeki tasarım sınırlarına bağlı kalınarak o projeye özgü bir şekilde belirlenmesi, bu kriterlerin optimum düzeyde karşılanması açısından önem kazanmaktadır.
- Güneş gölgeleme tasarım kriterinin, güneş kırıcı olarak işlev gören adaptif cephelerin tamamında ortak bir tasarım kriteri olduğu anlaşılmıştır. Kamaşmayı önleme kriterinin, kinetik sisteme sahip adaptif cephelerde karşılandığı görülmüş olup diğer örneklerde bu kriterin karşılanmasıyla alakalı bir bilgiye ulaşılamamıştır. Güneş kontrolü kriterinin ise, analizi yapılarak değerlendirilen örneklerde de görüldüğü gibi otomatik kontrole dayalı harici sensör ve aktüatörlerle çalışan kinetik sistemlerde veya bu sensör ve aktüatörü bünyesindeki gelişmiş malzemelerde bulunduran dinamik sistemlerde karşılandığı tespit edilmiştir. Bunların dışında, harici aktüatör ve sensör gibi donanımları bulundurmadan güneş kontrolü kriterini akıllı malzemelerin fonksiyonu ile karşılayan akıllı malzemeye dayalı adaptif cephe sistemleri de mevcuttur. Bunlar şekil hafızalı sistemler ve diğer akıllı malzemeye dayalı sistemlerdir. Güneş kontrolü kriterini karşılamayan adaptif

cephelerin ise, aktif sistemlerdeki statik sistemler sınıfına giren biyo-reaktör ve pasif sistemlerdeki statik sistemler sınıfına giren solar termal sistemler olduğu görülmüştür. Bu bağlamda pasif solar termal ve aktif biyo-reaktör adaptif cephe sistemlerinin, otomatik veya kullanıcı etkileşimli kontrole dayalı bir kullanım esnekliğini sağlamadığı anlaşılmaktadır.

- Adaptif cepheler, günışığını verimli kullanarak binada enerji korunumu kriterini karşılamakta ancak enerji üretimi kriteri, analiz edilen örneklerin birinde de olan (Tablo 5) biyo-reaktörlü veya piezo elektrik gibi bazı adaptif cephe sistemlerinde sağlanmaktadır. Bu yüzden enerji üretiminin, geliştirilecek olan sürdürülebilir bina tasarımına yönelik adaptif cephe sistemlerinde, üzerinde durulması gereken bir tasarım kriteri olduğu düşünülmektedir.
- Sıfır enerjili bina tasarımı elde etmede, yüksek performanslı cephelerle birlikte HVAC sistemlerinin enerji kullanımının minimize edilmesinin de önemli bir rolü olduğu düşünülmektedir. Özellikle adaptif cephelerin doğal kaynak kullanarak verimli aydınlatma, pasif iklimlendirme ve havalandırma gibi fonksiyonlarını sağlayan tasarım çözümleri, HVAC sistemlerinin kullanımını sınırlayarak binanın yaşam döngüsü boyunca tükettiği enerjinin azaltılmasında etkili olmaktadır.
- CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltma veya absorbe etme kriterinin analiz edilen örnekler arasından yalnızca Tablo 8'deki örnekte karşılandığı görülmüştür. Bu adaptif cephe örneğinde, biyo-reaktörlü cephe panelleri CO<sub>2</sub> absorbe ederek havayı temizlemektedir. Binaların karbon salınımlarının azaltılması, çevreye olan zararı minimum boyuta getirerek binanın sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır. Bu sebeple gelecekteki geliştirilecek olan adaptif cephelerde, bu tasarım kriterinin sağlanmasına yönelik tasarım çözümlerinin çoğaltılacağı ön görülmektedir.

Dış çevredeki değişen iklimsel koşullara ve/veya iç mekandaki kullanıcı taleplerine göre optimize olup uyarlanabilir özellik gösteren adaptif cephe sistemlerinin barındırdığı; günışığı enerjisini verimli kullanarak enerji etkinliği sağlamak ve kullanıcıların görsel, termal ve hava kalitesi konforunu arttırmak gibi sürdürülebilir tasarım hedeflerine yönelik olarak belirlenmiş sürdürülebilir tasarım kriterlerini karşılayan tasarım çözümleriyle, inşaat sektörünün gelecekte yaygınlaşmasını hedeflediği sıfır enerjili bina tasarımları için potansiyel teşkil ettiği düşünülmektedir. Yukarıdaki tespit ve çıkarımlardan hareketle, sürdürülebilir tasarım kriterlerinin tamamını optimum düzeyde karşılayan çözümlere sahip adaptif cephe tasarımlarına ulaşmak için gelişen teknolojiyle beraber yeni tasarım yaklaşımlarının benimsenip tasarım yöntemlerinin geliştirileceği ön görülmektedir.

## YAZAR KATKILARI

**Ahmet Necip Belek:** Çalışma konusunun seçilmesi, çalışmanın yürütülmesi, makale taslağının hazırlanması, istatistiksel analizlerin yapılması, verilerin yorumlanması, sonuçların tartışılması. **Ruşen Yamacli:** Çalışmanın yürütülmesi, verilerin yorumlanması, sonuçların tartışılması.

## FİNANSAL DESTEK BEYANI

Bu çalışma için herhangi bir finansal destek alınmamıştır.

**ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI**

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

**ETİK KURUL ONAYI**

Bu çalışma herhangi bir etik kurul onayı gerektirmemektedir.

**KAYNAKLAR**

- Aelenei, L., Aelenei, D., Romano, R., Mazzucchelli, E. S., Brzezicki, M., & Rico-Martínez, J. M. (2018). Case studies - adaptive facade network. COST (European Cooperation in Science and Technology), 1–289. <https://re.public.polimi.it/handle/11311/1069633>
- Aelenei, D., Aelenei, L., & Vieira, C. (2016). Adaptive façade: concept, applications, research questions. *Energy Procedia*, 91, 269–275. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.218>
- Ahmed, M., Abel-Rahman, A. K., & Ali, A. (2015). Development of intelligent façade based on outdoor environment and indoor thermal comfort. *Procedia Technology*, 19, 742–749. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2015.02.105>
- Alkhatib, H., Lemarchand, P., Norton, B., & O’Sullivan, D. (2021). Deployment and control of adaptive building facades for energy generation, thermal insulation, ventilation and daylighting: A review. *Applied Thermal Engineering*, 185, 116331. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116331>
- Attia, S., Lioure, R., & Declaude, Q. (2020). Future trends and main concepts of adaptive facade systems. *Energy Science & Engineering*, 8(9), 3255–3272. <https://doi.org/10.1002/ese3.725>
- Aydoğan, Ö. Ç. D., (2018). Ses verileri etkileşimli dinamik adaptif bir cephe önerisi: Sound shield, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. İstanbul.
- Barozzi, M., Lienhard, J., Zanelli, A., & Monticelli, C. (2016). The sustainability of adaptive envelopes: developments of kinetic architecture. *Procedia Engineering*, 155, 275–284. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.029>
- Böke, J., Knaack, U., & Hemmerling, M. (2020). Automated adaptive façade functions in practice - Case studies on office buildings. *Automation in Construction*, 113, 103113. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103113>
- Bui, D., Nguyen, T. V., Ghazlan, A., Ngo, N., & Ngo, T. (2020). Enhancing building energy efficiency by adaptive façade: A computational optimization approach. *Applied Energy*, 265, 114797. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114797>
- Decker, M., & Zarzycki, A. (2014). Designing resilient buildings with emergent materials. In *Fusion-32nd ECAADe Conference. Conference Proceedings 2014, 10-12 September 2014, Vol. 2.* (pp. 179-184). Northumbria University, Newcastle upon Tyne, England. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2014.2.179>
- Elrayies, G. M. (2018). Microalgae: Prospects for greener future buildings. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 81, 1175–1191. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.032>
- Gallo, P., & Romano, R. (2017). Adaptive Facades, developed with innovative nanomaterials, for a sustainable architecture in the mediterranean area. *Procedia Engineering*, 180, 1274–1283. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.289>

- Haase, M., & Amato, A. A. (2006). Sustainable façade design for zero energy buildings in the tropics. In *Proceedings of The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, 6-8 September 2006*, Geneva, Switzerland.  
[http://greeninitiatives.cn/img/white\\_papers/1409044227933Sustainable%20Facade%20Design%20for%20Zero%20Energy%20Buildings%20in%20the%20Tropics.pdf](http://greeninitiatives.cn/img/white_papers/1409044227933Sustainable%20Facade%20Design%20for%20Zero%20Energy%20Buildings%20in%20the%20Tropics.pdf)
- Harry, S. (2016). Dynamic adaptive building envelopes – An innovative and state-of-the-art technology. *Creative Space*, 3(2), 167–184. <https://doi.org/10.15415/cs.2016.32011>
- Hernández-López, I., Xamán, J., Zavala-Guillén, I., Hernández-Pérez, I., Moreno-Bernal, P., & Chávez, Y. (2020). Thermal performance of a solar façade system for building ventilation in the southeast of Mexico. *Renewable Energy*, 145, 294–307.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.026>
- Hosseini, S. A., Mohammadi, M., Schröder, T., & Guerra-Santin, O. (2021). Bio-inspired interactive kinetic façade: Using dynamic transitory-sensitive area to improve multiple occupants' visual comfort. *Frontiers of Architectural Research*, 10(4), 821–837. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.07.004>
- Hraška, J. (2018). Adaptive solar shading of buildings. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 9(2), 107–113. <https://doi.org/10.1556/1848.2018.9.2.5>
- Juaristi, M., & Monge-Barrio, A. (2016). Adaptive façades in temperate climates. An in-use assessment of an office building. In *11th conference on advanced building skins*.  
[https://www.researchgate.net/profile/Miren-Juaristi/publication/309564158\\_Adaptive\\_facades\\_in\\_temperate\\_climates\\_An\\_in-use\\_assessment\\_of\\_an\\_office\\_building/links/58176cf208ae90acb2428f6f/Adaptive-facades-in-temperate-climates-An-in-use-assessment-of-an-office-building.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Miren-Juaristi/publication/309564158_Adaptive_facades_in_temperate_climates_An_in-use_assessment_of_an_office_building/links/58176cf208ae90acb2428f6f/Adaptive-facades-in-temperate-climates-An-in-use-assessment-of-an-office-building.pdf)
- Kolarevic, B., & Parlac, V. (2015). *Building Dynamics: Exploring Architecture of Change*. Routledge. [https://www.researchgate.net/profile/Guensu-Merina-abbas/publication/347490454\\_archi-talks\\_3\\_branko\\_kolarevic\\_building\\_dynamics\\_exploring\\_architecture\\_of\\_change\\_mimarlik\\_konusmalari\\_3\\_branko\\_kolarevic-yapi\\_dinamikleri\\_degisimin\\_mimarisini\\_kesfetmek/links/5fdddefba6fdccdb8dfa24c/archi-talks-3-branko-kolarevic-building-dynamics-exploring-architecture-of-change-mimarlik-konusmalari-3-branko-kolarevic-yapi-dinamikleri-degisimin-mimarisini-kesfetmek.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Guensu-Merina-abbas/publication/347490454_archi-talks_3_branko_kolarevic_building_dynamics_exploring_architecture_of_change_mimarlik_konusmalari_3_branko_kolarevic-yapi_dinamikleri_degisimin_mimarisini_kesfetmek/links/5fdddefba6fdccdb8dfa24c/archi-talks-3-branko-kolarevic-building-dynamics-exploring-architecture-of-change-mimarlik-konusmalari-3-branko-kolarevic-yapi-dinamikleri-degisimin-mimarisini-kesfetmek.pdf)
- Kim, J. J., & Rigdon, B. (1998). *Sustainable architecture module: Introduction to sustainable design*. National Pollution Prevention Center for Higher Education. Ann Arbor.
- Kim, J. (2015). Adaptive façade design for the daylighting performance in an office building: the investigation of an opening design strategy with cellular automata. *International Journal of Low-carbon Technologies*, 10(3), 313–320.  
<https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt015>
- Kuda, A., & Yadav, M. (2022). Opportunities and challenges of using nanomaterials and nanotechnology in architecture: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 65, 2102–2111. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.052>
- Kutluay, P., İnan, T., Ersoy, U., & Başaran, T. Türkiye'den ve dünyadan örnekler ışığında çift cidarlı cephenin gelişimi. 12. *Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi 8-11 Nisan 2015*. (pp. 2249-2263). İzmir.  
[https://www.researchgate.net/publication/270684236\\_TURKIYE'DEN\\_VE\\_DUNYA\\_DAN\\_ORNEKLER\\_ISIGINDA\\_CIFT\\_CIDARLI\\_CEPHENIN\\_GELISIMI\\_DEVELOPMENT\\_OF\\_DOUBLE\\_SKIN\\_FACADES\\_WITH\\_SAMPLES\\_IN\\_THE\\_LIGHT\\_FROM\\_THE\\_WORLD\\_AND\\_TURKEY](https://www.researchgate.net/publication/270684236_TURKIYE'DEN_VE_DUNYA_DAN_ORNEKLER_ISIGINDA_CIFT_CIDARLI_CEPHENIN_GELISIMI_DEVELOPMENT_OF_DOUBLE_SKIN_FACADES_WITH_SAMPLES_IN_THE_LIGHT_FROM_THE_WORLD_AND_TURKEY)
- Loonen, R. R., Rico-Martínez, J. M., Favoino, F., Brzezicki, M., Menezo, C., La Ferla, G., & Aelenei, L. (2015). Design for façade adaptability: Towards a unified and systematic

- characterization. *Design for Façade adaptability—Towards a Unified and Systematic Characterization*, 1284–1294. [https://pure.tue.nl/ws/files/8287122/15\\_abs\\_loonen.pdf](https://pure.tue.nl/ws/files/8287122/15_abs_loonen.pdf)
- Loonen, R. R., Trcka, M. M., Cóstola, D. D., & Hensen, J. J. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Climate Adaptive Building Shells: State-of-the-art and Future Challenges*, 25, 483–493. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016>
- Mohtashami, N., Fuchs, N., Fotopoulou, M., Drosatos, P., Streblow, R., Osterhage, T., & Müller, D. (2022). State of the Art of Technologies in Adaptive Dynamic Building Envelopes (ADBEs). *Energies*, 15(3), 829. <https://doi.org/10.3390/en15030829>
- Moloney, J. V. (2006). Between Art and Architecture: The Interactive Skin. In *Tenth International Conference on Information Visualisation (IV'06)*. (pp. 681-686). IEEE. <https://doi.org/10.1109/iv.2006.28>
- Poizaris, H. (2004). *Double skin facades for office buildings: literature review*. (Report No. EBD-R--04/3). [https://www.ebd.lth.se/fileadmin/energi\\_byggnadsdesign/images/Publikationer/Bok-EBD-R3-G5\\_alt\\_2\\_Harris.pdf](https://www.ebd.lth.se/fileadmin/energi_byggnadsdesign/images/Publikationer/Bok-EBD-R3-G5_alt_2_Harris.pdf)
- Romano, R., Aelenei, L., Aelenei, D., & Mazzucchelli, E. S. (2018). What is an adaptive façade? Analysis of Recent Terms and definitions from an international perspective. *Journal of Facade Design and Engineering*, 6(3), 65-76. <https://doi.org/10.7480/jfde.2018.3.2478>
- Sedlak, J., & Kalousek, M. (2000). Energy saving solar facade for non-residential buildings for climatic condition in the Czech Republic. [https://www.researchgate.net/profile/Milos-kalousek/publication/228519643\\_energy\\_saving\\_solar\\_facade\\_for\\_non-residential\\_buildings\\_for\\_climatic\\_condition\\_in\\_the\\_czech\\_republic/links/54c2a9a0cf2911c7a499873/energy-saving-solar-facade-for-non-residential-buildings-for-climatic-condition-in-the-czech-republic.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Milos-kalousek/publication/228519643_energy_saving_solar_facade_for_non-residential_buildings_for_climatic_condition_in_the_czech_republic/links/54c2a9a0cf2911c7a499873/energy-saving-solar-facade-for-non-residential-buildings-for-climatic-condition-in-the-czech-republic.pdf)
- Semary, Y. M. E., Attalla, H., & Gawad, I. (2017). Modern Mashrabiya with high-tech daylight responsive systems. *ARCHive-SR*, 1(1), 11. <https://doi.org/10.21625/archive.v1i1.113>
- Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H., & Tsangrassoulis, A. (2021). Design approaches and typologies of adaptive facades: A review. *Automation in Construction*, 121, 103450. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103450>
- Voigt, M. P., Roth, D., & Kreimeyer, M. (2022). Main characteristics of adaptive façades. *Proceedings of the Design Society*, 2, 2543–2552. <https://doi.org/10.1017/pds.2022.257>
- Wilkinson, S., Stoller, P., Ralph, P. J., & Hamdorf, B. (2016). *Feasibility of Algae Building Technology in Sydney*. University of Technology Sydney, Australia. <https://apo.org.au/sites/default/files/resource-files/2016-05/apo-nid130056.pdf>
- Yitmen, I., Almusaed, A., & Yucelgazi, F. (2021). ANP model for evaluating the performance of adaptive façade systems in complex commercial buildings. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(1), 431–455. <https://doi.org/10.1108/ecam-07-2020-0559>
- Zakirullin, R. S. (2020). Chromogenic materials in smart windows for angular-selective filtering of solar radiation. *Materials Today Energy*, 17, 100476. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2020.100476>
- URL-1: Nicolechiew, V. a. P. B. (2017b, October 30). Arab World Institute – Jean Nouvel. Modern Architecture: a Visual Lexicon.

- <https://visuallexicon.wordpress.com/2017/10/04/arab-world-institute-jean-nouvel/>  
Erişim Tarihi:
- URL-2: Institut Du Monde Arabe Facade Detail. (2009, October 26). SoFreshSoClean. [https://ojmm.wordpress.com/architecture/shelter-construction-details/institut-du-monde-arabe\\_page\\_5/](https://ojmm.wordpress.com/architecture/shelter-construction-details/institut-du-monde-arabe_page_5/)
- URL-3: Winstanley, T. (2022). AD Classics: Institut du Monde Arabe / Enrique Jan + Jean Nouvel + Architecture-Studio. ArchDaily. <https://www.archdaily.com/162101/ad-classics-institut-du-monde-arabe-jean-nouvel>
- URL-4: Chalcraft, E., & Chalcraft, E. (2022, March 19). Arup unveils world's first algae-powered building. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2013/04/15/arup-unveils-worldsfirst-algae-powered-building/> Erişim Tarihi: 14.05.2023
- URL-5: [https://pocacito.eu/sites/default/files/BIQhouse\\_Hamburg.pdf](https://pocacito.eu/sites/default/files/BIQhouse_Hamburg.pdf) Erişim Tarihi: 14.05.2023
- URL-6: Produkte Brandschutz, Klimatechnik und Sonnenschutz | Colt. (n.d.). Colt International. <http://www.colt-info.de/solarleaf.html> Erişim Tarihi: 14.05.2023
- URL-7: Solla, I. F. (n.d.). ThyssenKrupp Quarter facades: a giant's gentle skin. <https://facadesconfidential.blogspot.com/2010/12/thyssenkrupp-quarter-facades-giants.html> Erişim Tarihi: 14.05.2023
- URL-8: Gallery of Q1, ThyssenKrupp Quarter Essen / JSWD Architekten + Chaix & Morel et Associés - 14. (n.d.). ArchDaily. [https://www.archdaily.com/326747/q1-thyssenkrupp-quarter-essen-jswd-architekten-chaix-morel-et-associes/510bd63db3fc4ba826000b8-q1-thyssenkrupp-quarter-essen-jswd-architekten-chaix-morel-et-associes-?next\\_project=no](https://www.archdaily.com/326747/q1-thyssenkrupp-quarter-essen-jswd-architekten-chaix-morel-et-associes/510bd63db3fc4ba826000b8-q1-thyssenkrupp-quarter-essen-jswd-architekten-chaix-morel-et-associes-?next_project=no) Erişim Tarihi: 14.05.2023
- URL-9: Gerfen, K. (2010, October 6). ThyssenKrupp Quarter. Architect. [https://www.architectmagazine.com/design/buildings/thyssenkrupp-quarter\\_o](https://www.architectmagazine.com/design/buildings/thyssenkrupp-quarter_o) Erişim Tarihi: 14.05.2023
- URL-10: Grozdanic, L. (n.d.). The Media-ICT by Cloud 9 is almost a Net-Zero Building - eVolo | Architecture Magazine. <https://www.evolo.us/the-media-ict-by-cloud-9-is-almost-a-net-zero-building/> Erişim Tarihi: 14.05.2023
- URL-11: Arkitektuel. (2018, October 31). Media-TIC / Enric Ruiz-Geli (cloud9) - Arkitektuel. Arkitektuel. <https://www.arkitektuel.com/media-tic/> Erişim Tarihi: 14.05.2023
- URL-12: AV. (n.d.). Media-TIC Building. Cloud 9. <https://arquitecturaviva.com/works/media-tic-building> Erişim Tarihi: 14.05.2023
- URL-13: [https://www.abitare.it/wp-content/uploads/2010/01/PresentacionMEDIA-TIC\\_web\\_EN-1.pdf](https://www.abitare.it/wp-content/uploads/2010/01/PresentacionMEDIA-TIC_web_EN-1.pdf) Erişim Tarihi: 14.05.2023
- URL-14: EUmining - Czech republic. (n.d.). <https://eumining.org/country/cz/#4> Erişim Tarihi: 14.05.2023



Copyright: © 2023 by the author. Licensee ArtGRID, Türkiye. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).