



ADAPTİF CEPHELER VE ÇALIŞMA MEKÂNİZMALARINA GÖRE ADAPTİF CEPHE SİSTEMLERİNİN ÖRNEKLER ÜZERİNDEN İNCELENMESİ

İrem Nur TAŞ¹ , Filiz ŞENKAL SEZER²

¹Uludağ Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Bursa, Türkiye

²Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık ABD, Bursa, Türkiye

ÖZET

Yapı kabuğu iç ve dış ortam arasındaki enerji akışını kontrol edebilen arayüzler olarak binaların performansının iyileştirilmesinde önemli bir role sahiptir. Geleneksel cephe sistemleri genellikle statik olarak tasarlanmakta olup değişen çevresel koşulları ve kullanıcı beklentilerini karşılamada kısmen yetersiz kalmaktadır. Buna karşılık, adaptif cepheler (AF), iklim koşulları konusunda daha esnek olup, fiziksel çevre kontrolü bağlamında geçici değişikliklere yanıt verme olanağına sahiptir. İç mekân konfor koşullarını sağlamanın yanı sıra kentsel ısı adalarının önlenmesi, hava kirliliğinin azaltılması gibi çeşitli sorunların çözümünde dış mekân konforunun iyileştirilmesini de olumlu yönde etkileyebilmektedir. Tüm bu avantajlara rağmen uluslararası ölçekte kullanımı yaygınlaşmaya başlayan ancak Türkiye’de daha az uygulama örneğine sahip adaptif cephelerle ilgili yeterli sayıda çalışma yer almamaktadır. Bu makalenin amacı adaptif cephe kavramını detaylı bir şekilde incelemek, güncel literatür özeti sunmak, çalışma mekânizmalarına göre çeşitli adaptif cephe sistemlerini uluslararası örnekler üzerinden inceleyerek adaptif cephe sistemlerinin performansını ortaya koymaktır. Çalışma kapsamında, öncelikle adaptif mimari ve adaptif cephe kavramlarına ilişkin mevcut ve güncel ulusal ve uluslararası literatür taranarak bir literatür analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda, adaptif cepheler çalışma mekânizmalarına göre; Hidrolik, Pnömatik, Motor tabanlı, Malzeme tabanlı ve Enerji üreten sistemler olmak üzere beş ana başlıkta sınıflandırılmıştır. Sistemler ve her bir sisteme ait ikiye örnek olmak üzere seçilen 10 örnek bina tanıtarak adaptif cephe özellikleri bağlamında karşılaştırılmalı incelenmiştir. Yapılan literatür analizi ve karşılaştırmalar değerlendirildiğinde, 5 adaptif sistemin farklı avantaj ve dezavantajlara sahip olduğu görülmüştür. Bazı sistemler yüksek hassasiyet, hızlı tepki, verimlilik, düşük maliyet veya çevresel katkılar sunarken, bazıları kurulum ve bakım maliyetleri, enerji tüketimi ve kullanıcı müdahalesi gibi konularda çeşitli zorluklar içermektedir. Bu çalışma, adaptif cephelerin performansını iyileştirmek için her bir sistemin avantaj ve dezavantajlarını dikkate alarak uygun sistem seçiminin önemini vurgulamayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: *Adaptif cephe, yapı kabuğu, çift cidarlı cephe, enerji verimliliği, kullanıcı konforu.*

ADAPTIVE FACADES AND EXAMINATION OF ADAPTIVE FACADE SYSTEMS ACCORDING TO WORKING MECHANISMS ON EXAMPLES

ABSTRACT

The building envelope, as an interface capable of controlling the energy flow between the internal and external environments, plays a crucial role in improving the performance of buildings. Traditional facade systems are generally designed to be static, and as such, they are insufficient in addressing changing environmental conditions and user expectations. In contrast, adaptive facades (AF) are more flexible in terms of climate conditions, allowing for responses to temporary changes in the physical environment. Besides ensuring indoor comfort conditions, they can also positively impact the improvement of outdoor comfort in addressing various issues such as preventing urban heat islands and reducing air pollution. Despite all these advantages, adaptive facades, which are becoming more widely used internationally, have fewer application examples in Türkiye, and there is a lack of sufficient studies on this topic. This article aims to examine the concept of adaptive facades in detail, provide an overview of current literature, and evaluate the performance of various adaptive facade systems through international examples based on their working mechanisms. Within the scope of the study, a literature analysis was conducted by reviewing existing and up-to-date national and international literature on adaptive architecture and adaptive facades. As a result of the analysis, adaptive facades were classified into five main categories based on their working mechanisms: Hydraulic, Pneumatic, Motor-based, Material-based, and Energy-producing systems. Ten example buildings, with two examples from each system, were introduced and comparatively analyzed in terms of their adaptive facade characteristics. The literature analysis and comparisons revealed that the five adaptive systems have different advantages and disadvantages. Some systems offer high precision, fast response, efficiency, low cost, or environmental benefits, while others pose challenges in terms of installation and maintenance costs, energy consumption, and user intervention. This study aims to highlight the importance of selecting appropriate systems by considering the advantages and disadvantages of each system to improve the performance of adaptive facades.

Keywords: *Adaptive facade, building envelope, double-skin facade, energy efficiency, user comfort.*

Sorumlu Yazar : İrem Nur Taş

Makale Geliş Tarihi : 30.05.2024

Makale Kabul Tarihi : 28.06.2024

Makale Künye Bilgisi : Taş, İ.N., Şenkal Sezer, F. (2024). Adaptif cepheler ve çalışma mekânizmalarına göre adaptif cephe sistemlerinin örnekler üzerinden incelenmesi. *KAPU Trakya Journal of Architecture and Design*, 4(1), 53-72.

Bu makale, birinci yazarın ikinci yazar danışmanlığında yürüttüğü ve Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde hazırlanma sürecinde olan "Dünyada ve Türkiye’de Adaptif Cepheye Sahip Yapı Örneklerinin Performans Kriterleri Açısından İncelenmesi" konulu yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

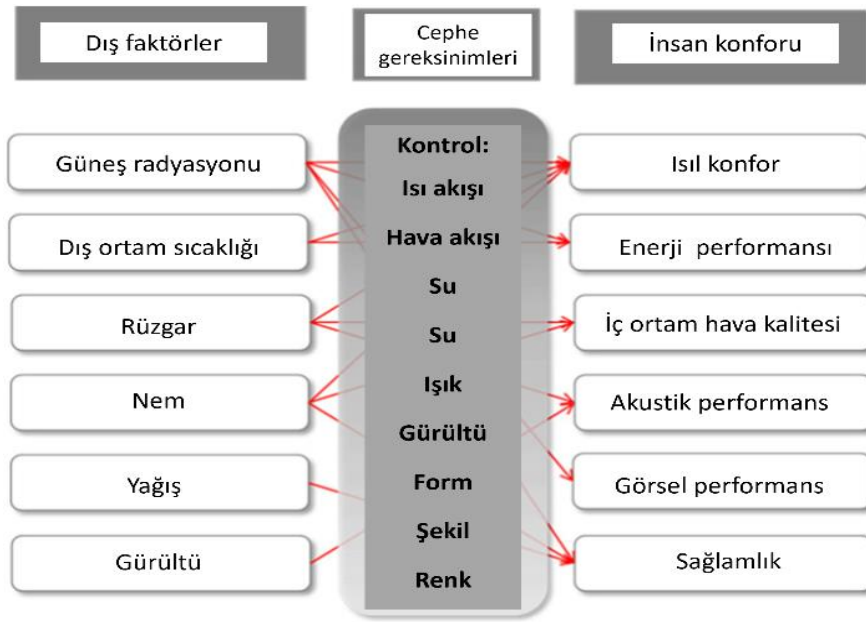
1. GİRİŞ

Çevresel koşullar, insan konforunu ve yapı kullanıcılarının dünyayı nasıl algıladığını, onunla nasıl etkileşime girdiğini doğrudan etkilemektedir. Yapı bağlamında düşünüldüğünde ise mekânlar işlevlerine uygun, mümkün olduğunca verimli bir şekilde hizmet verebilmeleri ve konfor koşullarını sağlayabilmesi için ışık, ses, sıcaklık vb. gibi fiziksel koşullara uyum sağlayabilmesi gerekmektedir. Sanayileşme, nüfus, teknolojik gelişmeler vb. nedenlere bağlı olarak artan enerji tüketimi, enerji sıkıntısı ve sera gazı emisyonlarında artışa sebep olmaktadır. Binalar sera gazı emisyonlarının yaklaşık %40'ndan sorumludur (BPIE, 2023). Günümüzde binalarda yapı kabuğunun enerji açısından yeterli derecede etkin olmadığı durumlarda gerekli konforu sağlamak için çok daha fazla enerji tüketilebilmektedir. Mevcut yasalar binalardaki enerji tüketimini kontrol etmek ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmak için bina kabuğu teknolojilerini oluşturmaya ve geliştirmeye teşvik etmek için harekete geçmiştir. Yapı kabuğu iç ve dış ortam arasındaki enerji alışverişini etkileyen ara yüzler olarak binaların performansının iyileştirilmesinde önemli bir role sahiptir. Günümüzde artık bina kabuğunun çevresel değişikliklere uyum sağlayabilmesi ve dinamik olarak tepki verebilmesi beklenmektedir. Adaptif cepheler, bu yeni beklentiye karşılayarak enerji verimliliği ve kullanıcı konforu açısından önemli avantajlar sunabilmektedir. Adaptif cepheler sayesinde yapı kabuğu, dış koşullara göre optimize edilen bir sistem haline gelerek hem iç mekân hem de dış mekân konforunu artırmaktadır. Bu çalışmanın amacı, ülkemizde yakın bir geçmişe sahip olan adaptif mimari bağlamında adaptif cephe kavramını detaylı bir şekilde incelemek, güncel literatür özeti sunmak, çalışma mekânizmalarına göre çeşitli adaptif cephe sistemlerini uluslararası örnekler üzerinden inceleyerek 5 farklı adaptif cephe sisteminin özelliklerini ortaya koymaktır. Çalışma, farklı adaptif cephe tasarımına sahip örnekleri inceleyerek adaptif cephe sistemlerinin performansını araştırmayı hedeflemektedir.

1.1. Adaptif Mimari ve Adaptif Cepheler

Adaptif mimari binalarda enerji verimliliğini arttırmak ve iç mekân konforunu iyileştirmek için değişen çevresel koşullara ve kullanıcı ihtiyaçlarına uyum sağlayan bir tasarım yaklaşımıdır. Adaptif mimarinin bir bileşeni olan adaptif cepheler ise değişen performans gereksinimlerine ve değişken sınır koşullarına yanıt olarak zaman içinde bazı fonksiyonlarını, özelliklerini veya davranışlarını tekrar ve tersine çevrilebilir şekilde değiştirme yeteneğine sahip bina kabuğu tasarımlarıdır (Loonen vd., 2013). Adaptif cepheler sürekli değişen fiziksel koşullara eş zamanlı olarak uyum sağlama yeteneğine sahiptir (Attia vd., 2018).

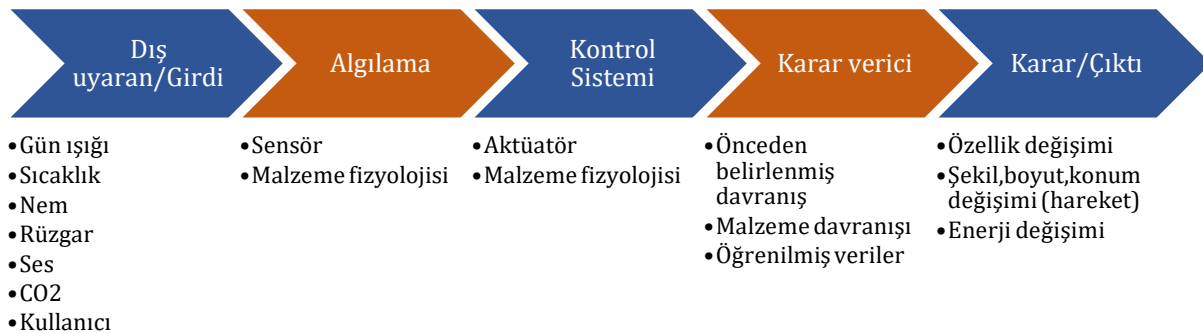
Adaptif cepheler, doğada dış etkenlere tepki veren canlı davranışlarından esinlenerek tasarımcılara ilham kaynağı olmuştur. Binaların adaptif olması fikri canlılardaki sürekli hareket etme özelliği (dinamiklik), çevreye uyum veya kamufle olma özelliklerinden esinlenerek ortaya atılmıştır. Adapte olabilen cepheler, konfor koşulları ve bina performansını iyileştirmek için tepki olarak şekil, konum, işlev, davranış veya malzeme özelliklerinin değiştirilmesine izin veren çok işlevli uyarlanabilir sistemlerden oluşmaktadır (Aelenei vd., 2016). Temel prensip olarak adaptif cepheler iç ve dış ortam arasındaki enerji akışlarını aktif olarak algılayıp kontrol edebilmektedirler. Şekil 1'de adaptif cephelerin dış faktörlerle insan konforu arasındaki ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 1. Adaptif cephelerin şematik rolü (Aelenei vd., 2016 kaynağından referans alınarak orijinaline bağlı kalınarak Türkçe'ye çevrilmiştir.)

Adaptif cepheler, enerji akışını azaltmayı amaçlayan önleme(prevention), enerji akışına izin veren kabul etme (admission), yada enerji akışından kaçından kaçınan reddetme(rejection) veya ortam koşullarına bağlı olarak uygun zaman ve yönde enerjinin toplanması ve sirküle edilmesine dayanan bir enerji yönetim modeli olan toplama ve dönüştürme gibi çeşitli tepki fonksiyonlarını içermektedir (Loonen vd., 2015).

Adaptif cephelerde çalışma prensibi temel olarak veri toplama, toplanan verileri kontrol stratejilerine göre işleme ve işlemciden alınan verilere göre eylem üretme aşamalarından oluşmaktadır. Adaptasyonun sağlanması için ilk olarak cephe çevredeki gün ışığı, sıcaklık, rüzgar, nem vb. çeşitli uyaranları algılaması gerekmektedir. Sensör veya malzeme fizyolojisine dayanarak algılayıcı tarafından tespit edilen bu uyaranlardan sağlanan veriler, bir kontrol sistemine iletilir ve analiz edilir. Kontrol sistemi, verileri işleyerek uygun kararlar alır ve bu kararlar, karar verici mekânizma tarafından uygulanır. Son aşamada, karar verici mekânizmanın ürettiği çıktıya göre cephe elemanları gerekli değişiklikleri yaparak uyumlanır. Bu değişiklikler, adaptif cephenin performansını optimize ederek, kullanıcı konforunu iyileştirmeye yöneliktir (Tabadkani vd., 2021a). Adaptif cephelerin çalışma prensibi Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Adaptif cephelerin çalışma prensibi (Yazar tarafından oluşturulmuştur.)

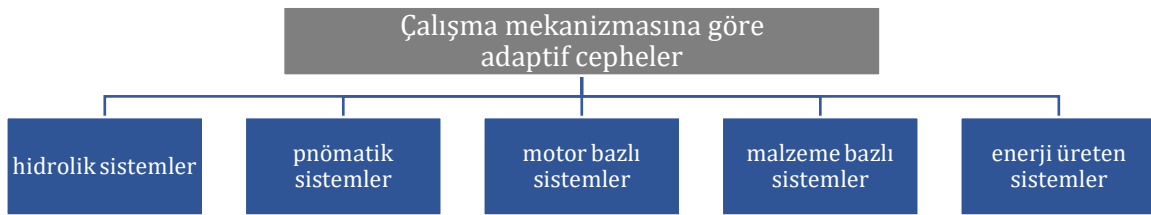
Adaptif cepheler, enerji kullanımına göre pasif ve aktif olarak sınıflandırılabilir. Pasif adaptif cepheler malzeme tabanlı teknolojileri ve pasif teknolojileri kapsamaktadır. Pasif teknolojiler elektrik veya manuel kol gücü olmadan rüzgâr, nem, gün ışığı gibi doğal kaynakların gücü ile etkileşime giren

teknolojilerdir. Düşük bakım ve maliyetleri ile özellikle estetik ifadelerde ve minimalist sanat eserlerinde kullanıcı ile etkileşime girmek için cephede tercih edilmektedir. Malzeme bazlı teknolojilerde malzeme tarafından algılama, kontrol ve tepki vardır. Yaygın kullanılan teknolojiler faz değiştiren malzemeler, elektroaktif polimerler, termobimetaller gibi şekil hafıza alaşımli bileşen ve polimerlerdir.

Aktif adaptif cepheler, dış etkenlere duyarlı sensörler ve kontrol sistemleri aracılığıyla çevresel koşullara dinamik olarak tepki verirler. Örneğin, güneş ışığının yoğunluğu veya hava sıcaklığı gibi değişkenlere bağlı olarak açılabilir veya kapanabilirler. Bu şekilde, iç mekân konforunu artırmak ve enerji tüketimini optimize etmek amacıyla bina içine giren güneş ışığını veya sıcaklık değişimlerini kontrol ederler.

Aktif adaptif cepheler başlığı altında; mekânîk teknolojiler, elektro-mekânîk teknolojiler ve bilgi teknolojileri yer almaktadır. Mekânîk teknoloji elektrik olmadan kol gücü ile manuel olarak çalışan teknolojilerdir. Elektro-mekânîk teknolojiler mekânîk teknolojilerin uzaktan kontrolüne imkân tanıyan elektrikli cihazların entegresinden oluşan cephelerdir. Elektromekânîk teknolojiler hidrolik, pnömatik ya da motor bazlı sistemlerden oluşabilir. Bilgi teknolojileri sensör ve kontrol sistemlerinden oluşmaktadır. Sensör tarafından algılanan veri mikrokontrollörler tarafından değerlendirildikten sonra uygun cevap aktüatörlere gönderilir ve cephe tepki verir. Bilgi teknolojileri, malzeme bazlı, motor bazlı, hidrolik veya pnömatik sistemlerden oluşabilir.

Kolarevic ve Parlac, (2015) çalışmasında adaptif cephelerin nasıl hareket sağladığı üzerine yoğunlaşarak 4 farklı hareket yöntemi tanımlamışlardır. Bunlar motor bazlı, hidrolik, pnömatik ve malzeme bazlı sistemlerdir. (Çakır Aydoğan, 2018) ise çalışmasında adaptif cepheleri statik uyum gösteren ve dinamik uyum gösteren cepheler olarak iki ana kategoriye ayırmıştır. Her bir kategoriye enerji üreten cepheler, akıllı malzeme kullanan cepheler, çift cidarlı cepheler ve iklim, ses, hareket, kullanıcı etkileşimli cepheler olmak üzere dört alt kategoride ayrıntılı bir şekilde incelemiştir. Bu çalışma kapsamında adaptif cephelerin çalışma mekânizmalarına göre sınıflandırılmasında Çakır Aydoğan, (2018), Heidari Matin ve Eydgahi, (2022) ve (Kolarevic ve Parlac, 2015) çalışmaları referans alınmıştır. Bu bağlamda adaptif cepheler çalışma mekânizmalarına göre Hidrolik, Pnömatik, Motor tabanlı, Malzeme tabanlı ve Enerji üreten sistemler olmak üzere 5 ana başlık altında sınıflandırılmıştır (Şekil 3).

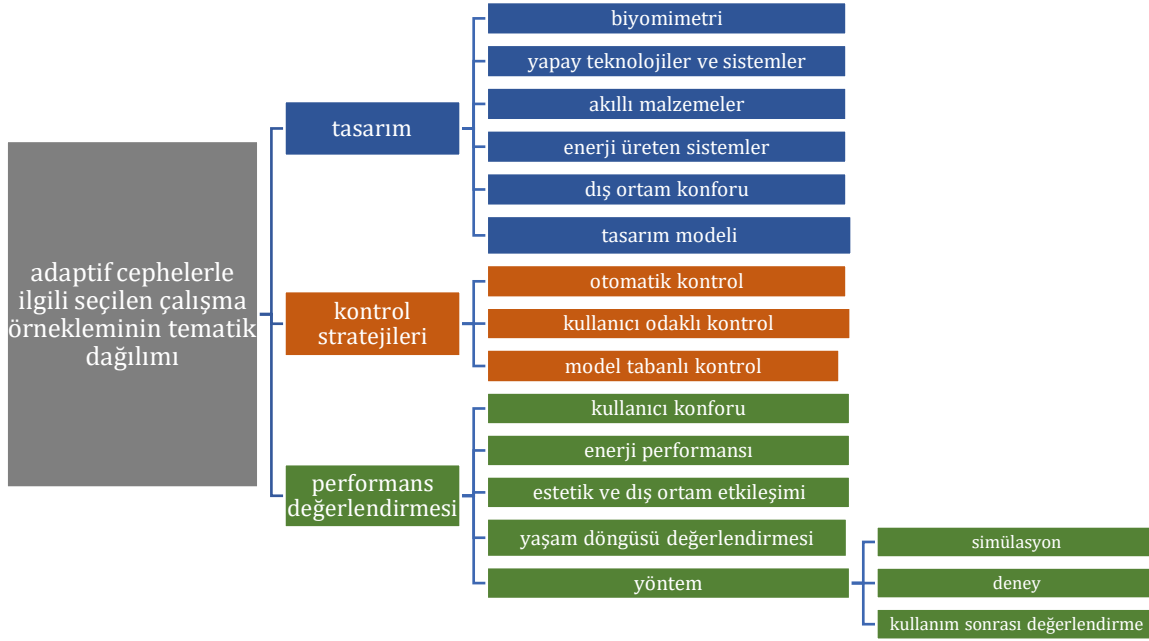


Şekil 3. Adaptif cephelerin çalışma mekânizmalarına göre sınıflandırılması (Heidari Matin ve Eydgahi, (2022), Kolarevic ve Parlac, (2015) ve Çakır Aydoğan, (2018) kaynaklarından referans alınarak, sadeleştirilerek ve yorumlanarak yeniden oluşturulmuştur.)

1.2. Güncel Literatür Özeti

Çalışmanın bu bölümünde, öncelikle yapı kabuğu bağlamında adaptif mimari ve adaptif cephe kavramları üzerine yapılan ulusal ve uluslararası makale, kitap, bildiri ve tez çalışmalar incelemeleri yapılarak literatür analizi yapılmıştır. Giriş bölümünde adaptif cephelerin tanımı, sınıflandırılması ve çalışma prensibi gibi özelliklerin ortaya konulması için mevcut literatür genel bir bakış açısı ile taranarak adaptif cepheler açıklanmıştır. Literatür özeti bölümünde ise adaptif cephelerle ilgili güncel durumun ve eğilimlerin ortaya konulması amacıyla 2020 yılından itibaren son 5 yıllık dönemi kapsayan ilgili çalışmalar taranmıştır. Yapılan çalışmada temel olarak 'adaptive facade' anahtar kelime olarak belirlenmiştir. Belirlenen anahtar kelime güncel, güvenilir ve hakemli çalışmaların

yayınlandığı bir veri tabanı olan ScienceDirect ağında gelişmiş tarama yöntemleri kullanılarak taranmıştır. Bu kapsamda doğrudan adaptif cephelerle ilişkili çalışmaları incelemek için başlığında, 'adaptif facade', 'adaptive' and 'facade' olan ve 2020-2024 yıllarını kapsayan 33 çalışma listelenmiştir. Yapı kabuğu bağlamında olmayan 1 çalışma örneklem dışında tutularak 2020-2024 yılları arasında Elsevier (ScienceDirect) veritabanında yayınlanmış araştırma ve inceleme makaleleri olmak üzere toplam 32 kaynak güncel literatür örnekleme seçilerek tematik olarak incelenmiştir. Çalışmalar adaptif cephelerin tasarımı, kontrol stratejileri ve performans değerlendirmesi olmak üzere 3 tema altında gruplandırılmıştır. Şekil 4 adaptif cephelerle ilgili çalışmaların tematik dağılımını göstermektedir.



Şekil 4. Adaptif cephelerle ilgili çalışmaların tematik dağılımı

Adaptif cephelerin tasarımına dair yapılan çalışmalar incelendiğinde doğa temelli yaklaşımlar ve biyomimetri (Andrade vd., 2024; Jumabekova vd., 2023), yapay teknolojiler ve sistemler (Blaise ve Gilles, 2022; Meloni vd., 2023), akıllı malzemeler (Claros-Marfil vd., 2022; Flor vd., 2022; Perez vd., 2021) enerji üreten sistemler (Alkhatib vd., 2021; Çurpek vd., 2023; C. Wang vd., 2022) dış ortam konforu (Blaise ve Gilles, 2022; Meloni vd., 2023) tasarım modeli (Juaristi vd., 2020; Nie vd., 2023; Tabadkani vd., 2021c; Voigt vd., 2024) alt temalarına odaklanıldığı görülmüştür.

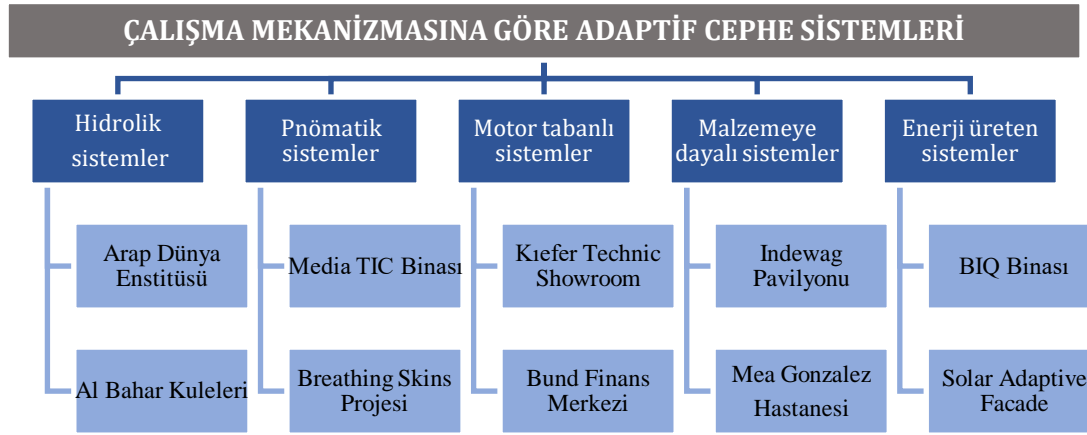
Adaptif cephelerin kontrol stratejilerine dair yapılan çalışmalar incelendiğinde otomatik kontrol (Catto Lucchino ve Goia, 2023; Tabadkani, Roetzel, vd., 2020), kullanıcı odaklı kontrol (Koyaz ve Ünlü, 2022; Rizi ve Eltaweel, 2021; Tabadkani vd., 2021a, 2023; Y. Wang vd., 2022) ve model tabanlı kontrol (Jumabekova vd., 2023; Shen ve Han, 2022) temalarına odaklanıldığı görülmüştür.

Adaptif cephelerin performans değerlendirmesine yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde kullanıcı konforu (Blaise ve Gilles, 2022; Flor vd., 2022; Juaristi ve Krarti, 2024; Koyaz ve Ünlü, 2022; Le vd., 2022; Lee vd., 2021; Perez vd., 2021; Rizi ve Eltaweel, 2021; Tabadkani vd., 2022; Y. Wang vd., 2022), enerji performansı (Alkhatib vd., 2021; Bui vd., 2020; Catto Lucchino ve Goia, 2023; Çurpek vd., 2023; Juaristi ve Krarti, 2024; Le vd., 2022; Lee vd., 2021; Tabadkani vd., 2022), estetik ve dış ortam etkileşimi (Le vd., 2022), yaşam döngüsü değerlendirme (Borschewski vd., 2023) alt temalarına odaklanıldığı görülmüştür.

Adaptif cephelerin performansının değerlendirmesi için kullanılan yöntemler ise literatür taraması verilerine göre simülasyon, deney ve kullanım sonrası değerlendirme olmak üzere 3 grup altında özetlenebilir. Çoęu çalışma simülasyon yöntemi kullanmakta olup (Catto Lucchino ve Goia, 2023; Claros-Marfil vd., 2022; Flor vd., 2022; Juaristi vd., 2020; Nie vd., 2023; Norouziyasas vd., 2023; Tabadkani, Roetzel, vd., 2020; Tabadkani, Tsangrassoulis, vd., 2020; Tabadkani vd., 2022, 2023) deney (Juaristi ve Krarti, 2024)ve kullanım sonrası değerlendirme (Koyaz ve Ünlü, 2022)yöntemlerine odaklanan çalışmalar da mevcuttur.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Konunun kavramsal çerçevesi ve güncel literatür özeti sonucunda çalışma kapsamında adaptif cepheler, çalışma mekânizmalarına göre Hidrolik, Pnömatik, Motor tabanlı, Malzeme tabanlı ve Enerji üreten sistemler olmak üzere 5 ana başlık altında sınıflandırılmıştır. Bu sistemler açıklanarak her bir sistemin daha iyi anlaşılabilmesi için örnekler üzerinden analizleri yapılmıştır. Her bir sisteme ait ikişer örnek seçilmiş ve 1980'li yıllardan başlayarak 40 yıllık bir süreci kapsayan ve uluslararası literatürde sıklıkla karşılaşılan toplamda 10 adet örnek bina incelenmiştir. Şekil 5 çalışma kapsamında incelenen 5 farklı çalışma sistemi kapsamında incelenen adaptif cepheye sahip yapı örneklerini göstermektedir.



Şekil 5. Çalışma mekânizmasına göre adaptif cephe sistemleri ve seçilen örnekler

Çalışmanın yönteminde, öncelikle mekânizmalarına göre 5 ana başlıkta sınıflandırılan adaptif cephe sistemleri; sistemin tanımı, sistemin özellikleri, sistemin yapı kabuğundaki kullanım şekli ve sistemin avantajları olacak şekilde sistematize edilerek açıklanmıştır. Ardından her bir sisteme ait ikişer olmak üzere 10 adet bina seçilmiş ve adaptif cephe özellikleri tanıtılmıştır. Genel bilgileri verilen ve adaptif cephe detayları açıklanan örnek binalar, literatürdeki sınıflandırma yaklaşımları referans alınarak oluşturulan adaptif cephe özellikleri bağlamında karşılaştırılmalı incelenmiştir. Yapılan literatür analizi ve karşılaştırmalar değerlendirilerek 5 adaptif cephe sistemine ait avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuştur.

2.1 Sistemler

A) Hidrolik sistemler: Sıvı basıncını kullanarak güç iletimi sağlayan sistemlerdir ve genellikle çalışması için petrol bazlı hidrolik yağlar kullanılmaktadır. Bu sistemlerin temel özellikleri arasında yüksek güç yoğunluğu, hassas kontrol kabiliyeti ve yük kapasitesi yer almaktadır (Majumdar, 2003). Çalışma mekânizması, bir pompa aracılığıyla basınçlı sıvının hidrolik silindirlere veya motorlara iletilmesi ve bu bileşenlerin doğrusal veya döner hareket üretmesi şeklinde işlemektedir (Parr, 2011). Mimarlıkta, özellikle yapı cephelerinde hidrolik sistemler, büyük hareketli elemanların kontrolünde kullanılmaktadır. Örneğin, cephe panellerinin açılıp kapanması veya kayar kapı sistemlerinin çalıştırılması hidrolik mekânizmalarla sağlanabilir. Bu sistemler, yapıların enerji verimliliğini artırarak ve estetik açıdan dinamik cephe tasarımları sunarak mimarlıkta önemli bir rol oynamaktadır. (Fox, 2016).

B) Pnömatik sistemler: Sıkıştırılmış hava veya başka bir gaz kullanarak mekânîk hareket ve güç iletimi sağlayan sistemlerdir. Bu sistemler, enerjiyi sıkıştırılmış hava aracılığıyla depolar ve bu enerjiyi mekânîk iş yapmak için kullanılmaktadır (Majumdar, 1996). Pnömatik sistemler, basit tasarımları ve az sayıda hareketli parçaları sayesinde güvenilir ve bakım gereksinimi düşük sistemlerdir. Hızlı tepki süreleri, ani hareketler ve hassas kontrol gerektiren uygulamalarda yüksek performansa sahiptir. Ayrıca, sıkıştırılmış hava yanıcı olmadığı için güvenli ve temiz bir enerji kaynağıdır. Modüler yapıları sayesinde kolayca genişletilebilir ve değiştirilebilirler. Mimarlıkta, özellikle yapı cephelerinde, hareketli gölgeleme sistemlerinde, akıllı cepheler ve değişken iç mekân düzenlemeleri gibi dinamik ve enerji verimliliği yüksek tasarımlar oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır. (Kronenburg, 2007; Zuk ve Clark, 1970).

C) Motor tabanlı sistemler: Elektrik motorları, içten yanmalı motorlar veya hidrolik motorlar gibi motorların sağladığı mekânîk enerjiyi kullanarak belirli işlevleri gerçekleştiren mekânîk ve elektronik düzeneklerdir (Bolton, 2015; Fowler, 2015). Bu sistemler, yüksek verimlilik, hassas kontrol kabiliyeti ve çeşitli uygulamalarda esneklik gibi özelliklere sahiptir (Bolton, 2015). Çalışma mekânizması, motorun dönme hareketini veya doğrusal hareketini kullanarak mekânîk bir iş üretmesi ve bu enerjinin çeşitli bileşenler aracılığıyla iletilmesi üzerine kuruludur. Mimarlıkta, özellikle yapı cephelerinde motor tabanlı sistemler, hareketli panellerin, perdelerin veya güneş kırıcılarının kontrolünde kullanılır. Örneğin, bir binanın cephe panellerinin güneş ışığına göre otomatik olarak ayarlanması, motor tabanlı sistemler sayesinde sağlanabilir, böylece enerji verimliliği artırılır ve kullanıcı konforu sağlanır (Fox ve Kemp, 2009).

D) Malzeme tabanlı sistemler: Belirli malzemelerin fiziksel, kimyasal veya mekânîk özelliklerinden yararlanarak işlevlerini yerine getiren ve performans gösteren sistemlerdir (Smith, 2017). Bu sistemler genellikle yapı cephelerinde kullanılır ve mevcut koşullara göre şekil değiştirebilir veya fonksiyonlarını optimize etmektedirler. Örneğin, akıllı cam teknolojileri, güneş ışığının yoğunluğuna göre otomatik olarak opaklaşabilir veya saydamlaşabilir, böylece iç mekân sıcaklığını kontrol ederek enerji tasarrufu sağlamaktadırlar (Jones, 2016). Ayrıca, yapı malzemelerinde kullanılan şekil hafızalı alaşımlar (shape-memory alloys) gibi malzemeler, belirli bir sıcaklıkta veya elektriksel uyarım altında belirli bir şekle geri dönebilme özelliğiyle kullanılarak dinamik yapı cephelerinde adapte edilebilir (Brown ve White, 2018). Bu malzeme tabanlı sistemler, yapı cephelerinde enerji verimliliğini artırmak, kullanıcı konforunu iyileştirmek ve yapısal performansı optimize etmek için önemli bir rol oynarlar.

E) Enerji üreten sistemler: Çeşitli enerji kaynaklarını kullanarak elektrik, ısı veya mekânîk enerji üreten ve bu enerjiyi farklı amaçlar için kullanılabilir hale getiren sistemlerdir. Bu sistemler genellikle yapı cephelerine yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanarak entegre edilmektedir. Enerji üreten sistemler başlığı altında fotovoltaik sistemler, rüzgar türbünü içeren sistemler ve biyoreaktör sistemler yer almaktadır. Fotovoltaik paneller güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek binaların elektrik ihtiyacını karşılarken, rüzgar türbinleri rüzgar enerjisini mekânîk enerjiye çevirmektedir (Bolton, 2015). Ayrıca biyoreaktör sistemler de biyokütle enerjisi üreterek (Fowler, 2015). Bu sistemlerin kullanımı bina tasarımında enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir rol oynamaktadır. Böylece yapı cepheleri hem enerji üretimine hem de enerji tüketimini optimize ederek çevresel etkileri azaltabilir ve sürdürülebilir bir yapı yaklaşımı sunabilir (Fox ve Kemp, 2009).

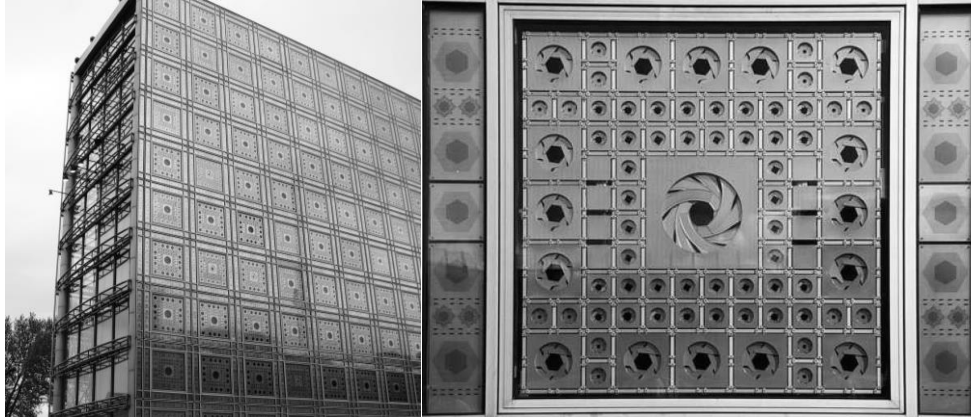
2.2 Örnek yapılar

H: Bu çalışma kapsamında hidrolik cephe sistemine sahip yapı örneği olarak Arap Dünya Enstitüsü ve Al Bahar Kuleleri olmak üzere 2 yapı incelenmiştir.

H1: Arap Dünya Enstitüsü, Fransa, 1987

Jean Nouvel tarafından 1987 yılında Paris'te tasarlanan Arap Dünyası Enstitüsü, modern mimarlıkta adaptif cephe sistemlerinin öncülerinden biridir. Bu yapı, güneş ışınlarına göre ayarlanabilen elektro-mekânîk bir sisteme sahiptir ve geleneksel Arap kafes işçiliğinden esinlenilmiştir. Cephe, iç mekânda görsel konforu artırmak için tasarlanmıştır ve hareketli bir yüzey oluşturmak için iki cam arasına yerleştirilmiş perfore metal parçalardan oluşmaktadır (Şekil 6). Bu sistem, merkezi bir

bilgisayar kontrolüyle çevresel koşullara uyum sağlar ve yaklaşık 27 bin adet lens veya diyafram kullanmaktadır. Sensörler sayesinde çevredeki gün ışığı verileri algılanır ve diyaframların farklı hareketleri ile gün ışığının iç mekâna etkisi kontrol edilmektedir. Arap Dünyası Enstitüsü cephesi, gün ışığına duyarlı olarak tepki veren adaptif cephe örneğidir , mimari açıdan güneşten korunma ve iç mekânın mahremiyetini sağlama amacıyla tasarlanmıştır (Winstanley, 2011).



Şekil 6. Arap Dünyası Enstitüsü (Winstanley, 2011).

H2: Al Bahar Kuleleri (Birleşik Arap Emirlikleri, 2013)

Al Bahar Kuleleri, 2013 yılında Birleşik Arap Emirlikleri'nde tasarlanmış kinetik ve adaptif bir cepheye sahip bir yapıdır. Yapının cephesi, ısı kazancını dengelemek amacıyla geleneksel İslami motif olan "mashrabiya"dan ilham alınarak hidrolik sistemle açılıp kapanan gölgeleme elemanlarıyla tasarlanmıştır. Bu elemanlar, şemsiyeye benzer bir geometriye sahip olup (Şekil 7), dış ortamdan sensörler ile algılanan gün ışığı verilerine göre hareket etmektedir. Merkezi bina yönetim sistemiyle entegre olan bu akıllı cephe, iklimsel ve görsel konfor sağlamayı amaçlamaktadır (Wilkinson ve Wood, 2012).

Cephe, üçgen fiberglas ve PTFE kaplı (teflon kaplı cam lif örtü) elemanlardan oluşan aktivatörlü panellere sahiptir. Bu sistem, parlamayı azaltma, yeterli gün ışığı alımı ve istenmeyen güneş ışığı kazancının %50 oranında azaltılması gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, enerji verimliliği açısından ofis alanlarında %50, binanın tamamında %20 enerji tasarrufu sağlamakta ve yıllık karbon emisyonlarını %30 oranında azaltmaktadır. Parametrik olarak tasarlanan bu cephe, yılda yaklaşık 1750 ton karbon emisyonu azalması sağlamaktadır. Her ne kadar fiziksel çevre kontrolü ve enerji verimliliği açısından olumlu etkilere sahip olsa da, dış ortam ile etkileşim konusunda kullanıcıların görüş açısını kısıtladığı için bazı performans sorunları yaşanabildiği ifade edilmiştir.



Şekil 7. Al bahar Kuleleri (Wilkinson ve Wood, 2012)

P: Bu çalışma kapsamında pnömatrik cephe sistemine sahip yapı örneği olarak Media TIC binası ve Breathing Skins projesi incelenmiştir.

P1:Media TIC (İspanya, 2009)

Media TIC, 2009 yılında Barcelona'da bilgi ve iletişim teknolojileri projelerinin tasarlanıp sergilendiği bir ofis binası olarak tasarlanmıştır. Yapının en dikkat çekici özelliği, termal ve görsel konfor sağlamak için ETFE panellerden oluşan ikinci bir kontrol edilebilir adaptif kabuk sistemine sahip olmasıdır (Şekil 8). ETFE, şeffaf, yüksek ısı yalıtımı sağlayan, kendini temizleyebilen ve enerji etkin bir polimerdir. Güneş ışığı karşısında cephedeki sıcaklık artışı gömülü sensörler tarafından algılanmakta ve panellerin içi nitrojenle doldurularak şişirilmektedir. Böylece opak ve yalıtımlı bir cephe oluşturularak iç mekânda termal ve görsel konfor sağlanmaktadır. Güneşe maruz kalan güneydoğu ve güneybatı cephelerinde toplam 2500 m² alan kaplayan bu kaplama, enerji verimliliği yüksek bir malzemedir. Güneydođu cephesinde, üçgen çerçeve içinde üç katmandan oluşan ve şişirilebilir ETFE paneller kullanılmıştır. Bu paneller, dışarının ısısına karşı diyafraz gibi çalışarak cepheyi yalıtılmaktadır. Güneş ışığına maruz kaldığında şişen bu cephe elemanları, içlerindeki hava odacıklarıyla ısı yalıtımı ve opak bir cephe sağlamaktadır. Güneybatı cephesi ise lentiküler olarak iki katmanlı ETFE panellerle tasarlanmıştır. Media TIC binası, geleneksel tasarımlara kıyasla %75 enerji tasarrufu sağlamak ve karbon emisyonlarını %95 oranında azaltılmaktadır. Bu, bölgesel soğutma, temiz enerji kullanımı, çatıda PV paneller, hareketli ETFE güneş filtreleri ve akıllı algılayıcılar sayesinde mümkün olmaktadır (Arkitektuel, 2018).



Şekil 8. Media TIC (Arkitektuel, 2018)

P2: Breathing Skins Projesi (Almanya, 2016)

2016 yılında Tobias Becker tarafından Almanya'da tasarlanan Breathing Skins Projesi, pnömatrik sisteme sahip bir adaptif cephe örneğidir. Bu proje, binlerce gözenekten nefes alan bir yapı olarak öne çıkmaktadır (Şekil 9). Biyomimikriye dayalı olarak, organik derilerden esinlenen teknoloji, iç ve dış mekân arasındaki ışık, hava ve sıcaklık akışını kontrol etmek için kullanılmaktadır. Cephe, dışarıya doğru açılıp kapanan modüller aracılığıyla çalışmaktadır ve "pnömatrik kaslar" olarak adlandırılan 2800 hava kanalı, cephedeki geçirgenliği kontrol etmektedir. Proje pnömatrik kasları sandviçleyen iki cam yüzeyden oluşur ve düşük bir basınç ile çalışan kaslar sayesinde minimum enerji girdisi ile çalışmaktadır. Bu proje, estetik bir görünüm sunarken enerji tasarrufu sağlanmasına da katkıda bulunmaktadır (Doroteo, 2024).



Şekil 9. Breathing Skins Projesi (Doroteo, 2024).

MT: Bu çalışma kapsamında motor tabanlı cephe sistemine sahip yapı örneği olarak Kiefer Technic Showroom ve Bund Finans Merkezi olmak üzere 2 yapı incelenmiştir.

MT1:Kiefer Technic Showroom (Avusturya, 2007)

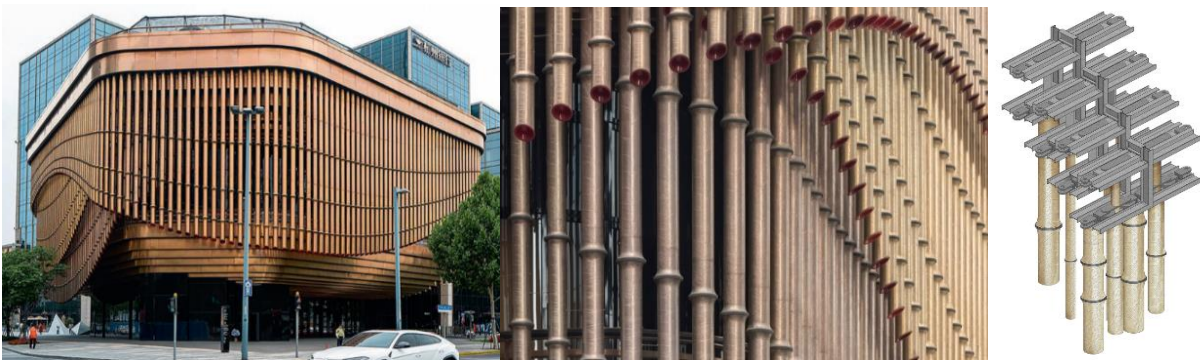
Kiefer Technic Showroom, 2007 yılında Avusturya'da inşa edilmiş bir ofis yapısıdır. Karasal iklim bölgesinde yer alan bu yapı, gün ışığını ve iç ortam sıcaklığını kontrol etmek amacıyla cephede kinetik ikincil bir kabuk ile tasarlanmıştır. Cephede bulunan mekânîk hareketli beyaz alüminyum paneller, iç mekândaki gün ışığı gereksinimine göre kayma ve katlanma hareketi yaparak açılıp kapanmaktadır (Şekil 10). Bu sistem, hem manuel hem de otomatik olarak kontrol edilebilmekte olup aktif bir teknolojiye sahiptir. Kiefer Technic Showroom'un cephesi, gün ışığına uyum sağlayan ve aktif teknoloji ile çalışan kinetik bir adaptif cephe örneğidir (Vinnitskaya, 2010).



Şekil 10. Kiefer Technic Showroom(Vinnitskaya, 2010)

MT2:Bund Finans Merkezi (Çin, 2017)

Bund Finans Merkezi, 2017 yılında Çin'de tasarlanmış bir hizmet yapısıdır. Yapının cephesinde, geleneksel Çin gelin başlığına atıfta bulunan ve 675 magnezyum alaşımlı borudan oluşan hareketli bir tasarım bulunmaktadır. Bu borular, 2 metre ile 16 metre arasında değişen uzunluklara sahiptir ve bağımsız olarak hareket edebilmektedir. Hareket ettikçe borular üst üste binerek döner ve farklı görsel efektler ile opaklık seviyeleri üretir. Ayrıca, cephede diğer kısımlardan bağımsız olarak hareket edebilen üç cam döner asansör tasarlanmıştır (Şekil 11). Bu özellikler, yapıya dinamik ve etkileyici bir görünüm kazandırmaktadır (Archdaily, 2024).



Şekil 11. Bund Finans Merkezi (Archdaily, 2024).

ML: Bu çalışma kapsamında malzemeye dayalı sisteme sahip Indewag Pavilyonu, Futurium Berlin ve Manual Gea Gonzalez Hastanesi olmak üzere 3 yapı incelenmiştir.

ML1: Indewag Pavilyonu (Bulgaristan, 2017)

Sofya'da bulunan Bulgaristan Bilim Akademisi kampüsünde sergilenmek amacı ile yapılmış olan InDeWag Pavilyonu, akışkan cam teknolojisi (FFG) kullanılmış adaptif cephe uygulamalarından biridir. Yapının 3 katmanlı cephesinde, modüler Akışkan Akışlı Camlama (FFG) üniteleri

bulunmaktadır. InDeWaG'in amacı, geliştirilen bu cam üniteler ile değişken radyant ısıtma ve soğutma seviyelerine bağlı oluşan enerji tüketimini azaltmak ve gün ışığından maksimum yararlanarak iç konfor koşullarını sağlamaktır. 3 katmanlı cam ünitesi içerisindeki suyun motor yardımı ile pencere içinde sirkülasyonu sağlanarak yapının iklimlendirilmesine katkıda bulunmaktadır (Şekil 12).



Şekil 12. Indewag Pavilyonu (InDeWAG, 2020)

ML2: Manuel Gea Gonzalez Hastanesi (Çin, 2017)

Manuel Gea Gonzalez Hastanesi, 1992 yılında Mexico City'de inşa edilmiştir ve dünyanın en kirli kenti ilan edilen bu şehirde bulunması, yapının kendi kendini temizleyen bir cepheye sahip olması için ideal bir ortam sunmaktadır. Hastane cephesi, "Prosolve 370e" adı verilen ve duman parçacıklarını yakalayıp nötralize eden bir fotokatalitik madde olan çok ince bir TiO_2 (titanyum dioksit) kaplamasına sahip karolarla kaplanmıştır (Şekil 13). Bu kaplama, UV ışınları ile etkileşime girerek havadaki ve cephedeki kirleticileri karbondioksit ve suya dönüştürmektedir. Fotokatalitik cepheler olarak adlandırılan bu akıllı cephe, akıllı sistemler yerine kimyasal özellikleriyle kendini temizleyerek çevredeki hava kirliliğini azaltmaktadır (Zimmer, 2013).



Şekil 13. Manuel Gea Gonzalez Hastanesi (Zimmer, 2013)

E: Bu çalışma kapsamında enerji üreten cephe sistemine sahip Adaptive Solar Facade ve Biyoreaktör Evi olmak üzere 2 yapı incelenmiştir.

E1: Adaptive Solar Facade (Almanya, 2017)

ASF, güneş hareketini takip eden fotovoltaik panellerden oluşan adaptif bir cephe modülüdür. İlk prototipi, 2015 yılında House of Natural Resources'ın güney cephesine uygulanmıştır. 3.9 x 3.2 m boyutlarındaki çerçeve içinde yer alan 50 bireysel PV panel, robotik güneş takipçileri ve pnömomatik aktüatörler tarafından kontrol edilmektedir (Şekil 14). Sistem, termal konfor, ısı, nem ve aydınlatma sensörleriyle iç mekân koşullarını sürekli olarak izleyip optimize etmektedir. Energy Plus programında yapılan termal analizler sonucunda, ASF'nin gölgelemesiz bir cepheye kıyasla %56 ve 45 derecelik sabit panjurlu bir cepheye kıyasla %24 enerji tasarrufu sağladığı görülmüştür. Adaptive Solar Facade (ASF) modülleri, enerji üretiminin yanı sıra iç mekân için gölgeleme ve gün ışığı

kontrolü sağlamaktadır. Ayrıca, sistem istenildiğinde kullanıcıların bireysel ayarlamalar yapmasına imkan tanıyacak esneklikte tasarlanmıştır (Nagy vd., 2016).



Şekil 14. Adaptive Solar Facade (Nagy vd., 2016)

E2: Biyoreaktör Evi (Almanya, 2013)

Biyoreaktör evi, Hamburg'daki bir konut yapısının dış cephesine entegre edilen bir adaptif cephe örneğidir. Yapının 225 m²'lik dış cephesine foto biyoreaktörler entegre edilerek, yenilenebilir enerji kaynakları olarak biyokütle ve ısı üretilir. Her biri 70 cm x 250 cm boyutlarında olan 129 biyoreaktör, içerisindeki alglerin gün ışığı ile büyümesini sağlayarak biyokütle enerjisi üretir (Şekil 15). Bu enerji, yapıdaki tüm ısı ve enerji ihtiyacını karşılar ve aynı zamanda dinamik gölgeleme, ısı yalıtımı ve akustik konfor gibi fonksiyonları yerine getirir. Biyoreaktör evinin kullanımıyla yılda 6 ton karbon salınımı azaltılır (Architonic, 2013).



Şekil 15. BIQ House (Architonic, 2013).

3. BULGULAR

Bu bölümde önceki bölümde genel bilgileri verilen ve adaptif cephe detayları açıklanan sistemler ve örnek binalar adaptif cephe özelliklerine göre; *uygulama ölçeği, amaç, enerji kullanımı, dış uyaran - tetikleyici, tepki fonksiyonu, adaptasyon ölçeği, tepki verme süresi, kontrol türü ve kullanıcı kontrolüne izin verme* olmak üzere 9 başlık altında incelenmiştir.

Uygulama ölçeği başlığı altında *malzeme, bileşen ve sistem* olmak üzere 3 kriter, amaç başlığı altında *termal konfor, görsel konfor, akustik konfor, enerji üretmek, estetik ve iç veya dış ortam hava kalitesi olmak üzere 5 kriter*, enerji kullanımı başlığı altında *aktif ve pasif* olmak üzere 2 kriter, dış uyaran-tetikleyici başlığı altında *gün ışığı seviyesi, dış ortam sıcaklığı, güneş radyasyonu ve hava akışı* olmak üzere 4 kriter, tepki fonksiyonu başlığı altında *kontrol et (önleme, reddetme, kabul etme), topladönüştür-depola, etkileşime izin ver* olmak üzere 3 kriter, adaptasyon ölçeği başlığı altında *mikro ve makro* olmak üzere 2 kriter, tepki verme süresi başlığı altında *Saniye, Dakika ve Saat* olmak üzere 3 kriter, kontrol türü başlığı altında *İçsel kontrol ve Dışsal kontrol* olmak üzere 2 kriter, kullanıcı kontrolüne izin verme başlığı altında *kullanıcı kontrolüne izin verir ve kullanıcı kontrolüne izin vermez* olmak üzere 2 kriter belirlenmiştir. Başlıklar altında ele alınan kriterler yalnızca incelenen örneklerde yer alan kriterler ile sınırlandırılmıştır.

Çalışma kapsamında incelenen 10 örnek yukarıda açıklanan başlıklara göre değerlendirildiğinde Tablo 1'deki sonuçlara ulaşılmıştır. Bu tablonun oluşturulmasındaki amaç belirlenen 5 sisteme ait seçilen örneklerin adaptif cephe özelliklerini tek bir tablo üzerinde özetlemektir.

Tablo 1. Farklı adaptif cephe çalışma mekânizmalarına sahip örnek binaların cephe özelliklerine göre karşılaştırmalı tablosu (Yazar tarafından hazırlanmıştır).

Sistemler ve Örnek binalar		Hidrolik sistemler		Pnömatik sistemler		Motor tabanlı sistemler		Malzeme tabanlı sistemler		Enerji üreten sistemler	
		Arap Dünya Enstitüsü	AI Bahar Kuleleri	Media TIC	Breathing Skins Projesi	Kiefer Technic Showroom	Bund Finans Merkezi	Indewag Pavilyonu	Manual Gea Gonzalez Hacıhanası	BIQ Binası	Solar Adaptive Facade
Adaptif cephe özellikleri											
UYGULAMA ÖLÇEĞİ	Malzeme							✓	✓		
	Bileşen					✓	✓			✓	✓
	Sistem	✓	✓	✓	✓						
AMAÇ	Termal Konfor		✓	✓	✓	✓		✓			
	Görsel Konfor	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
	Akustik Konfor		✓								
	Enerji Üretmek				✓					✓	✓
	Estetik	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
	İç veya dış ortam hava kalitesi				✓				✓		
ENERJİ KULLANIMI	Aktif	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
	Pasif								✓	✓	✓
DIŞ UYARAN / TETİKLEYİCİ	Gün ışığı seviyesi	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Dış ortam sıcaklığı				✓			✓		✓	
	Güneş radyasyonu									✓	
	Hava akışı				✓						
TEPKİ FONKSİYONU	Kontrol et (Önleme, reddetme, kabul etme)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Topla, Dönüştür, Depola								✓	✓	✓
	Etkileşime İzin Ver				✓	✓	✓				
ADAPTASYON ÖLÇEĞİ	Mikro							✓	✓		
	Makro	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓
TEPKİ VERME SÜRESİ	Saniye							✓	✓		
	Dakika	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
	Saat									✓	✓
KONTROL TÜRÜ	İçsel kontrol								✓	✓	✓
	Dışsal kontrol	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
KULLANICI KONTROLÜNE İZİN VERME	Kullanıcı kontrolüne izin verir	✓			✓	✓	✓				
	Kullanıcı kontrolüne izin vermez		✓	✓				✓	✓	✓	✓

Çalışma kapsamında incelenen 10 örnek yapı adaptif cephe özellikleri açısından değerlendirildiğinde aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- Uygulama ölçeği başlığı altında değerlendirildiğinde incelenen örnek yapıların %40'ı sistem, %40'ı bileşen ve %20'si malzeme düzeyinde yapılmış adaptif cephe uygulamalarıdır.

- Adaptif cephe amacı başlığı altında değerlendirildiğinde incelenen örneklerin %80'inde estetik görünüm, %60'nda görsel konfor, %50'sinde termal konfor, %20'sinde iç veya dış ortam hava kalitesi ve %10'unda akustik konfor sağlama amacı vardır.
- Enerji kullanımı başlığı altında değerlendirildiğinde incelenen örneklerin %70'i aktif, %30'u pasif adaptif cephe tasarımlardır.
- Dış uyaran-tetikleyici başlığı altında değerlendirildiğinde incelenen örneklerin tamamında gün ışığı seviyesi, %30'unda dış ortam sıcaklığı, %10'unda güneş radyasyonu, %10'unda hava akışı adaptif cepheyi harekete geçirmektedir.
- Tepki fonksiyonu başlığı altında değerlendirildiğinde incelenen örneklerin %90'ı kontrol et (önleme, reddetme, kabul etme), %30'u topla-dönüştür-depola, %30'u etkileşime izin ver işlevine sahiptir.
- Adaptasyon ölçeği başlığı altında değerlendirildiğinde incelenen örneklerin %80'inde makro, %20'sinde mikro ölçekte uyumlanmaktadır.
- Tepki verme süresi başlığı altında değerlendirildiğinde incelenen örneklerin %60'ında dakika, %20'sinde saniye, %20'sinde saat düzeyinde olduğu görülmüştür.
- Kontrol türü başlığı altında değerlendirildiğinde incelenen örneklerin %70'i dışsal kontrol, %30'u içsel kontrole sahiptir.
- Kullanıcı kontrolüne izin verme başlığı altında değerlendirildiğinde incelenen örneklerin %60 kullanıcı kontrolüne izin vermezken %30'u kullanıcı kontrolüne izin vermektedir.

Adaptif cepheler hangi çalışma mekânizmasına sahip olursa olsun binalar için sadece kullanım sırasında değil, yapı yaşam döngüsü boyunca bir dizi avantaj ve dezavantaj sunmaktadır.

Sistemin avantajları sıralanacak olursa;

- Yapılarda karbon emisyonlarının azaltılması,
- Kullanım için gerekli enerjinin azaltılması ve/veya yenilenebilir kaynaklardan enerji üretilmesi ve depolanması,
- Bina içinde konforun artması,
- Bina dışındaki konforun artması,
- Kullanım aşamasında azaltılmış maliyetler,
- Estetik fayda sağlamak,
- Kullanıcının fiziksel çevre ile iletişiminin artırılması

Sistemin dezavantajları sıralanacak olursa;

- Adaptif cephelerin tasarım, üretim ve montajının, geleneksel olarak tasarlananan statik cephelere göre daha maliyetli olması,
- Hareketli parçalara sahip olan veya projeye özgü yenilikçi çözümler içeren karmaşık tasarımların bakım ve onarım için ek maliyet gerektirebilmesi,
- Adaptif cephe sistemlerinin karmaşık sistemlerden oluşmasından dolayı tasarım, mühendislik ve disiplinler arası iş birliğinde zorluklar yaşanabilmesi,
- Bazı adaptif cephe sistemleri hareket edebilmek için enerjiye gereksinim duymaktadır. Bu durumun adaptif cephelerin enerji verimliliğini sağlama amacıyla çelişebilmesi,
- Gelişmiş kontrol sistemlerine sahip olan adaptif cephe sistemlerinin, beklenen performans gereksinimlerini sağlaması için kullanıcıların bu konuda eğitilmiş ve bilinçli olmasını gerektirmesi,
- Karmaşık bir sisteme sahip tasarımlarda işletme sırasında daha fazla hatayla karşılaşma riski bulunması,
- Tasarım ve sorunların çözümüne yönelik alanda deneyimli az sayıda uzman olması şeklinde özetlenebilir.

Seçilen örnek bina sayısının az olması sebebiyle, Tablo 1'deki verilerin sistemlere ait sonuçları kesin olarak yansıtamayacağı düşünülmektedir. Bu nedenle tablodaki verileri desteklemek adına elde

edilen sonuçlar literatür verileri ile harmanlanarak Tartışma ve Sonuç bölümünde ortaya konulmuştur.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Çalışmanın sonuç bölümünde elde edilen bulgular değerlendirilmiş ve çalışmada anlatılan 5 farklı adaptif cephe sisteminin incelenmesi sonucu elde edilen veriler aktarılmıştır.

- Hidrolik adaptif sistemler fazla güç gerektiren bileşenlerin hareket ettirilmesinde kullanılmaktadır. Özellikle hassas hareketlerin sağlanmasında etkili sistemlerdir. Bu sistemlerin en büyük dezavantajı kurulum ve bakım maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Ayrıca genellikle ağır bir sistem olduklarından cephe yükünü artırmaktadır.
- Pnömatik adaptif sistemler hızlı tepki verme yeteneğine sahiptirler. Basit bir tasarıma sahiptirler bu nedenle bakım maliyetleri hidrolik adaptif cephelere göre daha düşüktür. Ancak yüksek güç gerektiren hareketlerin uygulanmasında yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle Etf gibi hafif malzemeler ile kullanılmaktadırlar.
- Motor bazlı adaptif sistemler genellikle yüksek verimliliğe sahiptirler. Bina kontrol sistemine entegre edilerek kullanıcı müdahalesine imkan tanıyabilir. Ancak sistemin sürekli enerji tüketmesi kullanım sırasında maliyetleri artırabilir.
- Malzeme tabanlı adaptif sistemler aktif veya pasif bir sisteme sahip olabilir. Malzeme tabanlı aktif sistemler yüksek verime sahip ve kullanıcı kontrolü sağlayabilmesine karşın maliyeti yüksek ve enerjiye gereksinim duyan sistemlerdir. Malzeme tabanlı pasif sistemler ise düşük maliyetleri ve enerji gerektirmemesi sebebiyle cazip hale gelmektedir. Ancak bu sistemlerin en büyük dezavantajlardan biri kullanıcı müdahalesine izin vermemesidir. Malzeme tabanlı sistemler daha az karmaşık olmaları sebebiyle daha çok tercih edilmektedir. Ancak pasif olarak renk değişimi sağlayan fotokromik, termokromik vb. sistemlerde termal performans sağlanırken görsel performans kalitesi düşebilir. Malzemeye dayalı sistemlerde kendini ve havayı temizleyen fotokatalitik malzemelerin kullanılması dış ortam konforuna katkıda bulunurken karbon ayak izini azaltılmasına yardımcı olur.
- Enerji üreten sistemler yapı için gerekli enerjinin yenilenebilir olarak üretilmesini sağlayarak karbon emisyonları kaynaklı çevresel kirlenimi azaltılmasına katkıda bulunmaktadır.

şeklinde özetlenebilir.

Yapılarda adaptif cephe uygulamaları için bir dizi motivasyon mevcuttur. Bu, yenilenebilir enerji kullanımından, iç ve dış mekân konforunun artırılmasına, estetik unsurlara ve iletişime kadar geniş bir yelpazeye yayılabilir. Ancak, tüm bu olumlu özelliklere rağmen, adaptif cephe sistemleri günümüzde henüz yaygınlaşmamıştır. Bu tür uygulamalar, büyük potansiyellere sahip olsa da, genellikle proje yatırımcıları ve mal sahiplerinin kararlarına bağlıdır. Tasarımcılar tarafından projelerde düşünülse de, bu kararlarda etkili olan paydaşlar genellikle proje yatırımcılarıdır. Dolayısıyla, asıl amaç, bu paydaşların adaptif cephe sistemlerine olan motivasyonunu artırmak ve bu sistemleri projelere dâhil etmek için gerekli desteği sağlamaktır.

Sonuç olarak ülkemiz güneşlenme süresi, iklim, mevcut enerji tüketimi vb. gibi faktörler göz önünde bulundurulduğunda adaptif cephe uygulamalarının çok büyük potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Türkiye’de bu konuda yapılmış adaptif cephe uygulamaları az sayıda ve yetersizdir. Genel olarak ülkemizde ve dünyada sürdürülebilir mimarlığın sağlanabilmesi ve dünyanın daha yaşanılabilir bir yer haline getirilebilmesi için adaptif cephelere tasarımda daha çok yer verilmeli ve kullanımı yaygınlaştırılmalıdır.

EXTENDED ABSTRACT

Research Problem ve Purpose

Climatic changes caused by global warming frequently bring up the issues of user comfort and energy efficiency in buildings. In this context, many countries are developing various climate action plans to reduce increasing carbon emissions. The development of building envelope technologies is encouraged to control energy consumption in buildings and to use renewable energy sources. The building envelope has an important role in improving the performance of buildings as interfaces that can control the energy flow between the indoor and outdoor environment. Traditional façade systems are usually designed statically and are partially inadequate to meet changing environmental conditions and user expectations. In contrast, adaptive façades (AF), which can be

expressed as an adaptable façade system that can adapt to changing environmental conditions, are more flexible in terms of climatic conditions and have the opportunity to respond to temporary changes in the context of physical environmental control. In addition to providing indoor comfort conditions, having adaptable features can also positively affect the improvement of outdoor comfort in solving various problems such as preventing urban heat islands and reducing air pollution. Despite all these advantages, there are not enough studies on adaptive facades, which are becoming widespread internationally but have fewer application examples in Türkiye. This article aims to examine the concept of adaptive facades in detail, provide an overview of current literature, and evaluate the performance of various adaptive facade systems through international examples based on their working mechanisms. This study aims to highlight the importance of selecting appropriate systems by considering the advantages and disadvantages of each system to improve the performance of adaptive facades.

Methodology

The study commenced with a comprehensive examination of the extant literature on adaptive architecture and adaptive facade concepts in the context of building envelopes. This analysis led to the identification of five main categories of adaptive facades, namely hydraulic, pneumatic, motor-based, material-based and energy-generating systems. These categories were established according to the operating systems of the respective facades. In order to present these systems, a total of ten examples were selected, comprising two examples of each system. The selected examples represent adaptive façade examples spanning a period of 40 years, beginning in the 1980s, and encompass a range of systems frequently encountered in international literature.

The method of the study first systematizes adaptive facade systems into 5 main categories based on their mechanisms, including system definition, system features, usage in building envelopes, and system advantages. Following this, 10 buildings, two for each system, are selected, and their adaptive facade features are introduced. These example buildings, which provide general information and detail adaptive facade characteristics, are then compared and examined in the context of adaptive facade features established based on classification approaches in the literature. Advantages and disadvantages of the 5 adaptive facade systems are identified through literature analysis and comparisons.

Findings

The findings of the study are based on the classification and comparative analysis of the adaptive facade systems. The study highlights the following key findings:

- *Hydraulic adaptive systems provide precise movements for components requiring more power but have high installation and maintenance costs and increase front load due to their heavy nature.*
- *Pneumatic adaptive systems respond quickly and have lower maintenance costs but are insufficient for high-power movements and are used with lightweight materials like ETFE.*
- *Motor-based adaptive systems offer high efficiency and integration with building control systems but incur continuous energy consumption costs.*
- *Material-based adaptive systems can be active or passive. Active systems are efficient and controllable but costly and energy-demanding. Passive systems are low-cost and energy-free but lack user control and can reduce visual performance.*
- *Photocatalytic materials in material-based systems enhance outdoor comfort and reduce the carbon footprint by self-cleaning and air purification.*
- *Energy-generating systems reduce carbon emissions by producing renewable energy for the building.*

Adaptive facades have many advantages and disadvantages. The advantages of adaptive facades for buildings include reducing carbon emissions, reducing energy consumption or renewable energy production and storage, increasing indoor and outdoor comfort, reducing costs during the use phase, providing aesthetic benefits and increasing the user's communication with the physical environment. However, these systems also have some disadvantages. The incorporation of technical equipment into the façade requires good planning, design and interdisciplinary cooperation. As the number of functions increases, the design becomes more complex, manufacturing and installation requirements and initial investment costs increase. Furthermore, adaptive facades are more costly and require more maintenance than other technologies. They are more complex during operation, the risk of error is high and the number of experienced experts in the field is low.

Conclusions and Recommendation

There are a number of motivations for the use of adaptive façade applications in buildings. These include the use of renewable energy, enhancement of indoor and outdoor comfort, aesthetics and communication. Despite these positive features, adaptive façade systems are not yet widespread today. Although such applications have great potential, they usually depend on the decisions of project investors and owners. Although they are considered by designers in projects, the stakeholders who are influential in these decisions are usually project investors. The

primary objective is to enhance the motivation of these stakeholders towards adaptive façade systems and to provide the necessary support to include these systems in projects.

In consideration of factors such as sunshine duration, climate, and current energy consumption, it is evident that adaptive façade applications have significant potential in Türkiye. However, adaptive façade applications in Türkiye are limited and insufficient. In order to ensure the sustainability of architecture in Türkiye and globally, and to create a more liveable world, it is imperative that adaptive facades are given greater consideration in design and that their use is expanded.

Yazar Katkı Beyanı

A. Fikir ve Kurgu **B.** Literatür İncelemesi **C.** Yazım
D. Veri Toplama **E.** Analiz **F.** Eleştirel İnceleme

İrem Nur Taş: **A/B/C/D/E/F**

Filiz Şenkal Sezer: **A/E/F**

KAYNAKLAR

Aelenei, D., Aelenei, L., ve Vieira, C. P. (2016). Adaptive Façade: concept, applications, research questions. *Energy Procedia*, 91, 269-275.

Alkhatib, H., Lemarchand, P., Norton, B., ve O'Sullivan, D. T. J. (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/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116331>

Andrade, T., Beirão, J., Arruda, A., ve Vinagre, N. (2024). Kinetic module in bimetal: A biomimetic approach adapting the kinetic behavior of bimetal for adaptive Façades. *Materials ve Design*, 239, 112807. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112807>

Archdaily. (2024). *Bund Finance Centre / Foster + Partners + Heatherwick Studio*. ArchDaily. <https://www.archdaily.com/881511/bund-finance-centre-foster-plus-partners-plus-heatherwick-studio>

Architonic. (2013). *BIQ HOUSE Hamburg, Germany, 2013*. <https://www.architonic.com/en/project/arup-biq-house/5101636>

Arkitektuel. (2018). *Media-TIC*. <https://www.arkitektuel.com/media-tic/>

Attia, S., Bilir, S., Safy, T., Struck, C., Loonen, R., ve Goia, F. (2018). Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive façade systems. *Energy and Buildings*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.017>

Blaise, R., ve Gilles, D. (2022). Adapted strategy for large-scale assessment of solar potential on facades in urban areas focusing on the reflection component. *Solar Energy Advances*, 2, 100030. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seja.2022.100030>

Bolton, W. (2015). *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*. Pearson Education.

Borschewski, D., Voigt, M. P., Albrecht, S., Roth, D., Kreimeyer, M., ve Leistner, P. (2023). Why are adaptive facades not widely used in practice? Identifying ecological and economical benefits with life cycle assessment. *Building and Environment*, 232, 110069. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110069>

BPIE. (2023). *A call for faster and bolder action (2nd ed.)*, .

Brown, T., ve White, S. (2018). *Shape-Memory Alloys in Building Design*. Routledge.

- Bui, D.-K., Nguyen, T. N., Ghazlan, A., Ngo, N.-T., ve Ngo, T. D. (2020). Enhancing building energy efficiency by adaptive façade: A computational optimization approach. *Applied Energy*, 265, 114797. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114797>
- Catto Lucchino, E., ve Goia, F. (2023). Multi-domain model-based control of an adaptive façade based on a flexible double skin system. *Energy and Buildings*, 285, 112881. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112881>
- Claros-Marfil, L. J., Zetola, V., Padial, J. F., ve Lauret, B. (2022). Experimental-simulation methodology for estimation of thermal parameters of adaptive facades in mild climate conditions: A water-flow glazing case study. *Journal of Building Engineering*, 45, 103384. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103384>
- Čurpek, J., Čekon, M., Šikula, O., ve Slávik, R. (2023). Thermodynamic responses of adaptive mechanisms in BiPV façade systems coupled with latent thermal energy storage. *Energy and Buildings*, 279, 112665. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112665>
- Çakır Aydoğan, Ö. (2018). *Ses verileri etkileşimli dinamik adaptif bir cephe önerisi Sound shield*.
- Doroteo, J. (2024). *Let Your Building "Breathe" With This Pneumatic Façade Technology*. ArchDaily. <https://www.archdaily.com/789230/let-your-building-to-breathe-with-this-pneumatic-facade-technology>
- Flor, J.-F., Liu, X., Sun, Y., Beccarelli, P., Chilton, J., ve Wu, Y. (2022). Switching daylight: Performance prediction of climate adaptive ETFE foil façades. *Building and Environment*, 209, 108650. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108650>
- Fowler, M. (2015). *Motor Control Electronics Handbook*. McGraw-Hill Education.
- Fox, M. (2016). *Interactive architecture: adaptive world*. Chronicle Books.
- Fox, M., ve Kemp, M. (2009). *Interactive Architecture*. Princeton Architectural Press.
- Heidari Matin, N., ve Eydgahi, A. (2022). Technologies used in responsive facade systems: a comparative study. *Intelligent buildings international*, 14(1), 54-73.
- InDeWAG. (2020). *InDeWAG-Industrial Development of Water Flow Glazing Systems*. European Commission|CORDIS | H2020. <https://cordis.europa.eu/project/id/680441>
- Jones, R. (2016). *Smart Glass Technologies and Applications*. Springer.
- Juaristi, M., ve Krarti, M. (2024). Review of adaptive opaque façades and laboratory tests for the dynamic thermal performance characterization. *Building and Environment*, 249, 111123. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111123>
- Juaristi, M., Loonen, R., Isaia, F., Gómez-Acebo, T., ve Monge-Barrio, A. (2020). Dynamic Climate Analysis for early design stages: a new methodological approach to detect preferable Adaptive Opaque Façade Responses. *Sustainable Cities and Society*, 60, 102232. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102232>
- Jumabekova, A., Berger, J., Hubert, T., Dugué, A., Vogt Wu, T., Recht, T., ve Inard, C. (2023). A state-space model to control an adaptive facade prototype using data-driven techniques. *Energy and Buildings*, 296, 113391. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113391>
- Kolarevic, B., ve Parlac, V. (2015). *Building Dynamics: Exploring Architecture of Change*.
- Koyaz, M., ve Ünlü, A. (2022). Human-centred performance criteria for adaptive façade design: Based on the results of a user experience survey. *Building and Environment*, 222, 109386. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109386>
- Kronenburg, R. (2007). *Flexible: architecture that responds to change. (No Title)*.

- Le, D. M., Park, D. Y., Baek, J., Karunyasopon, P., ve Chang, S. (2022). Multi-criteria decision making for adaptive façade optimal design in varied climates: Energy, daylight, occupants' comfort, and outdoor view analysis. *Building and Environment*, 223, 109479. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109479>
- Lee, D., Cho, Y.-H., ve Jo, J.-H. (2021). Assessment of control strategy of adaptive façades for heating, cooling, lighting energy conservation and glare prevention. *Energy and Buildings*, 235, 110739. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110739>
- Loonen, R. C. G. M., Rico-Martinez, J. M., Favoino, F., Brzezicki, M., Menezes, C., La Ferla, G., ve (Laura) Aelenei, L. (2015). *Design for façade adaptability: Towards a unified and systematic characterization*.
- Loonen, R. C. G. M., Trčka, M., Cóstola, D., ve Hensen, J. L. M. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and sustainable energy reviews*, 25, 483-493.
- Majumdar, S. R. (1996). *Pneumatic systems: principles and maintenance. (No Title)*.
- Majumdar, S. R. (2003). *Oil hydraulic systems: principles and maintenance. (No Title)*.
- Meloni, M., Zhang, Q., Cai, J., ve Lee, D. S.-H. (2023). Origami-based adaptive facade for reducing reflected solar radiation in outdoor urban environments. *Sustainable Cities and Society*, 97, 104740. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104740>
- Nagy, Z., Svetozarevic, B., Jayathissa, P., Begle, M., Hofer, J., Lydon, G., Willmann, A., ve Schlueter, A. (2016). The adaptive solar facade: from concept to prototypes. *Frontiers of Architectural Research*, 5(2), 143-156.
- Nie, Z., Chen, S., Zhang, S., Wu, H., Weiss, T., ve Zhao, L. (2023). Adaptive Façades Strategy: An architect-friendly computational approach based on co-simulation and white-box models for the early design stage. *Energy and Buildings*, 296, 113320. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113320>
- Norouzasias, A., Tabadkani, A., Rahif, R., Amer, M., van Dijk, D., Lamy, H., ve Attia, S. (2023). Implementation of ISO/DIS 52016-3 for adaptive façades: A case study of an office building. *Building and Environment*, 235, 110195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110195>
- Parr, A. (2011). *Hydraulics and pneumatics: a technician's and engineer's guide*. Elsevier.
- Perez, G., Sirvent, P., Sanchez-Garcia, J. A., ve Guerrero, A. (2021). Improved methodology for the characterization of thermochromic coatings for adaptive façades. *Solar Energy*, 230, 409-420. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.062>
- Rizi, R. A., ve Eltaweel, A. (2021). A user detective adaptive facade towards improving visual and thermal comfort. *Journal of Building Engineering*, 33, 101554. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101554>
- Shen, L., ve Han, Y. (2022). Optimizing the modular adaptive façade control strategy in open office space using integer programming and surrogate modelling. *Energy and Buildings*, 254, 111546. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111546>
- Smith, J. (2017). *Advanced Materials in Construction*. Wiley.
- Tabadkani, A., Nikkhah Dehnavi, A., Mostafavi, F., ve Naeini, H. G. (2023). Targeting modular adaptive façade personalization in a shared office space using fuzzy logic and genetic optimization. *Journal of Building Engineering*, 69, 106118. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106118>
- Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., ve Tsangrassoulis, A. (2020). A review of automatic control strategies based on simulations for adaptive facades. *Building and Environment*, 175, 106801. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106801>
- Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., ve Tsangrassoulis, A. (2021a). A review of occupant-centric control strategies for adaptive facades. *Automation in Construction*, 122, 103464. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103464>

Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., ve Tsangrassoulis, A. (2021b). Design approaches and typologies of adaptive facades: A review. *Automation in Construction*, 121, 103450.

Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., ve Tsangrassoulis, A. (2021c). Design approaches and typologies of adaptive facades: A review. *Automation in Construction*, 121, 103450. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103450>

Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., ve Tsangrassoulis, A. (2022). Simulation-based personalized real-time control of adaptive facades in shared office spaces. *Automation in Construction*, 138, 104246. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104246>

Tabadkani, A., Tsangrassoulis, A., Roetzel, A., ve Li, H. X. (2020). Innovative control approaches to assess energy implications of adaptive facades based on simulation using EnergyPlus. *Solar Energy*, 206, 256-268. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.087>

Vinnitskaya, I. (2010, Ekim 17). *Kiefer Technic Showroom / Ernst Giselbrecht + Partner*. ArchDaily. <https://www.archdaily.com/89270/kiefer-technic-showroom-ernst-giselbrecht-partner>

Voigt, M., Roth, D., Blandini, L., ve Kreimeyer, M. (2024). An integrated design methodology for extrinsic adaptive façades – process model, standards, and case study. *Journal of Building Engineering*, 109810. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109810>

Wang, C., Ji, J., Yu, B., Xu, L., Wang, Q., ve Tian, X. (2022). Investigation on the operation strategy of a hybrid BIPV/T façade in plateau areas: An adaptive regulation method based on artificial neural network. *Energy*, 239, 122055. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122055>

Wang, Y., Han, Y., Wu, Y., Korkina, E., Zhou, Z., ve Gagarin, V. (2022). An occupant-centric adaptive façade based on real-time and contactless glare and thermal discomfort estimation using deep learning algorithm. *Building and Environment*, 214, 108907. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108907>

Wilkinson, C., ve Wood, A. (2012). *Al Bahar Towers: External Automated Shading System: Jury Statement of CTBUH Innovation Award*.

Winstanley, T. (2011, Ekim 2). "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>

Zimmer, L. (2013, Mart 26). *Mexico City's Manuel Gea Gonzalez Hospital Has an Ornate Double Skin that Filters Air Pollution*. Inhabitat.

Zuk, W., ve Clark, R. H. (1970). *Kinetic architecture*. Van Nostrand Reinhold Company.