



Research Article

CONTRIBUTION OF ADAPTIVE FACADES TO SUSTAINABLE ARCHITECTURAL WITHIN THE SCOPE OF KINETIC ARCHITECTURE

Mehmet ESGİL ^{*,1}, 

Ruşen YAMAÇLI ², 

¹Department of Architecture, Faculty of Architecture and Design, Eskişehir Technical University, 26555 Eskişehir, Turkey

²Department of Architecture, Faculty of Architecture and Design, Eskişehir Technical University, 26555 Eskişehir, Turkey

*Correspondence: esgilmehmet@gmail.com

Received: 12 November 2023; Accepted: 9 March 2024; Published: 30 June 2024

ORCID ID¹: 0000-0002-6846-0404 ORCID ID²: 0000-0001-9659-9246

Citation: Esgil, M. & Yamacli, R. (2024), Kinetik mimarlık kapsamında uyarlanabilir cephelerin sürdürülebilir mimariye katkısı, *ArtGRID*, 6(1), 60-79.

Abstract

The development of technology has affected architecture as well as many other subjects; new concepts have emerged by developing various design approaches and applications. Two of these; they are kinetic architecture that represents movement in design and adaptive facades that make the building compatible with external factors by changing its features. Although these two concepts individually have large working areas, they unite in ensuring the rapid adaptation of the building to the environment by giving the facade dynamic movement feature. This study focuses on the sustainable effect provided by reflecting dynamic movement into design through adaptive facades within the scope of kinetic architecture. In this regard, firstly, the definition of the concept of kinetics, its limits and the development process of the systems that were effective in its transition to architecture were mentioned. Then, the necessary definitions and classifications regarding kinetic architecture and adaptive facades are made, common approaches are expressed and the scope in which the effect of adaptive facades on sustainable architecture will be examined is specified. Then, the design approaches of adaptive facades, their elements and their positioning on the facade, as well as the opportunities they offer in sustainable and aesthetic design are expressed with sample applications. Finally, the advantages, disadvantages and issues that need to be improved of adaptive facades are mentioned and ideal solutions to eliminate the disadvantages are stated. In addition to many sustainable benefits such as user comfort and energy efficiency in buildings, it has been suggested to expand the use of adaptable facades in design to provide an aesthetic appearance with a dynamic effect.

Keywords: Kinetic Architecture, Adaptive Facade, Sustainable Architecture, Dynamic Movement, Active System

*Araştırma Makalesi***KİNETİK MİMARLIK KAPSAMINDA UYARLANABİLİR
CEPHELERİN SÜRDÜRÜLEBİLİR MİMARİYE KATKISI****Özet**

Teknolojinin gelişmesi birçok konuyu olduğu gibi mimarlığı da etkilemiş; çeşitli tasarım yaklaşımları ve uygulamalar geliştirilerek yeni kavramlar ortaya çıkmıştır. Bunlardan ikisi; tasarımda hareketi temsil eden kinetik mimarlık ve özelliğinde değişiklik yaparak yapıyı dış etkenlere karşı uyumlu hale getiren uyarlanabilir cephelerdir. Bu iki kavram bireysel olarak geniş çalışma alanlarına sahip olsada, cepheye dinamik hareket özelliği kazandırılarak yapının çevreye hızlı adaptasyonunun sağlanması konusunda birleşmektedirler. Bu çalışma, kinetik mimarlık kapsamında dinamik hareketin uyarlanabilir cepheler aracılığıyla tasarıma yansıtılmasının sağladığı sürdürülebilir etkiye odaklanmaktadır. Bu doğrultuda, ilk olarak kinetik kavramının tanımı, sınırları ve mimarlığa geçişinde etkili olan sistemlerin gelişim sürecinden bahsedilmiştir. Daha sonra kinetik mimarlık ve uyarlanabilir cepheler ile ilgili gerekli tanımlamalar ve sınıflandırmalar yapıp, ortak yaklaşımlar ifade edilerek uyarlanabilir cephelerin sürdürülebilir mimarlığa etkisinin inceleneceği kapsam belirtilmiştir. Ardından, uyarlanabilir cephelerin tasarım yaklaşımları, elemanları ve cephedeki konumlanması ile birlikte sürdürülebilir ve estetik tasarım konusunda sunduğu fırsatlar örnek uygulamalarıyla beraber ifade edilmiştir. Son olarak, uyarlanabilir cephelerin avantajları, dezavantajları ve geliştirilmesi gereken hususlardan bahsedilerek, dezavantajların giderilmesi için ideal çözümler belirtilmiştir. Yapılarda kullanıcı konforu, enerji verimliliği gibi pek çok sürdürülebilir fayda sağlaması ve dinamik etki ile estetik görünüm kazandırılması için uyarlanabilir cephelerin tasarımda kullanımının yaygınlaştırılması önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kinetik Mimarlık, Uyarlanabilir Cephe, Sürdürülebilir Mimari, Dinamik Hareket, Aktif Sistem

1. GİRİŞ

Çevre, yaşayan bir olgu; yapıyı etkileyen çevresel koşullar da değişken ve sürekli. Yapının değişken koşullara karşı statik duruşu iç mekânın, dış mekân koşullarından etkilenmesine neden olmaktadır. Bu durum, iç mekândaki ideal konfor koşullarının dengede tutulması için harcanacak enerji miktarını arttırmaktadır. Binalardaki enerji tüketiminin azaltılarak çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması için yapıların, bulunduğu çevreye hızlı adapte olmaları gerekmektedir. Hızlı adaptasyon için en etkili çözümlerden birisi de, binanın kendisine etki eden koşullara aynı şekilde değişken ve dinamik olarak yanıt vermesidir. Bu da tasarımdaki hareketi temsil eden kinetik mimarlığın önemini arttırmaktadır.

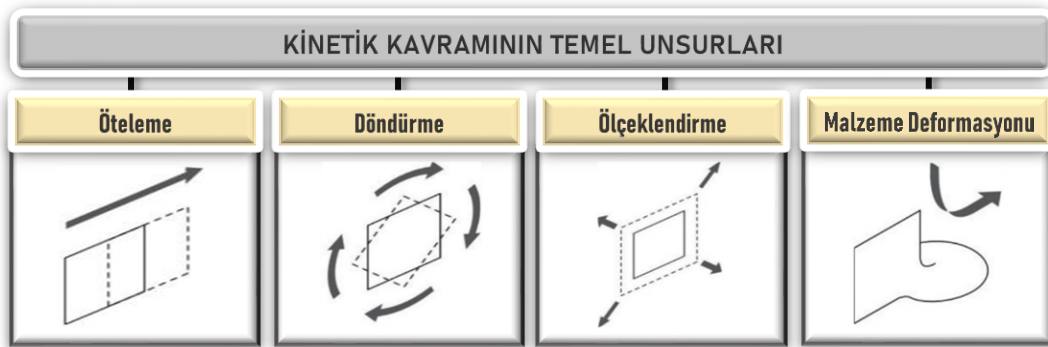
Kinetik mimarlık, dönüştürücü ve mekanize yapılar ile binaların, kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayacak ve dış unsurlarla uyum sağlayacak şekilde tasarlanması ilkesine dayanmaktadır (Razaz, 2010). Cephe, hem binanın dış etkenlere karşı birincil koruması hem de mimarın ifadesini net bir şekilde ortaya koyduğu bina bileşeni olarak kinetik mimari anlayışın tasarıma yansıtılması açısından önemli bir etmendir. Nitekim son dönemlerde cephe sistemleri, pasif teknolojik çözümlerden, binayı dinamik ve uyarlanabilir bir sistem içerisinde değiştirebilen aktif sistemlere dönüşmüştür (Romano vd., 2018). Bu bağlamda uyarlanabilir cepheler, iç ve dış ortam arasındaki fiziksel ayırıcının genel bina performansını iyileştirmek amacıyla geçici performans gereksinimlerine ve sınır koşullarına yanıt olarak zaman içinde işlevlerini,

özelliklerini veya davranışını değiştirebilen sistemlerden oluşması ile mimarlıkta ön plana çıkan uygulamalardandır (Aelenei vd., 2016). Uyarlanabilir cepheler; kontrol edilebilir yalıtım ve termal kütle, radyant ısı değişimi, havalandırma, enerji hasadı, gölgeleme veya nem kontrolü gibi çeşitli faydalar sağlayarak yapının sürdürülebilirliğine çeşitli katkılarda bulunabilmektedir (Loonen vd., 2015). Bu çalışmanın amacı, günümüzde genellikle statik ve durağan olarak tasarlanan yapıların, cephelerine kinetik ve uyarlanabilir sistemler entegre edilerek hareket özelliği kazandırıldığında sağlayabileceği sürdürülebilir ve potansiyel faydaların daha iyi anlaşılmasını sağlamaktır. Bu doğrultuda, ilk olarak kinetik mimarinin tasarımında; ne tür bir hareketi temsil ettiği, ne şekilde yer aldığı, nasıl bir gelişim gösterdiği ve neyi amaçladığı belirtildikten sonra bu kapsamda uyarlanabilir cepheler hakkında gerekli tanımlamalar yapılmıştır. Ardından uyarlanabilir cephelerin tasarım kriterleri ve sunduğu sürdürülebilir fırsatlar değerlendirilmiştir.

2. KİNETİK KAVRAMININ TANIMI, TEMEL UNSURLARI VE MİMARİ TASARIMDAKİ YERİ

Kinetik mimarlık kavramını anlayabilmek için ilk olarak kinetik kavramının iyi anlaşılması gerekmektedir. Kinetik kelimesi, sözcük anlamına bakıldığında Yunanca'da "hareket" anlamına gelen "kineo" kelimesinden gelmektedir (Yaşa, 2010). Dolayısıyla kinetik mimarlık kavramı da mimarideki hareketi temsil etmektedir. Genel olarak yapıların duranlığı mimarlığın kinetiğe direnmesine sebep olsada hareketin şiirselliği çevrede etkisini hissettirmektedir (Moloney, 2011). Günümüzdeki mimarlıkta bu etkiye kayıtsız kalmayıp, başlangıçtaki aksine tasarımlarda kinetik anlayışı farklı şekilde yansıtmaktadır.

Kinetiğin net bir tanımını yapmak için; kinetik ile mimarlık alanındaki diğer hareket biçimlerinin (örneğin; kullanıcının fiziksel etkisi, malzemenin hava koşulları ve çürüme sonucunda değişimi, ışıktaki değişikliklerin optik etkilerine bağlı hareket hissi vs.) arasındaki ayrımın bilinmesi gerekmektedir. Kinetik; uzaydaki üç temel geometrik dönüşüm olan öteleme, döndürme ve ölçeklendirmenin yanında malzemenin deformasyonu ile dönüşüm olmak üzere tasarımdaki 4 temel hareketi temsil etmektedir (Şekil 1.) (Moloney, 2011; Haidari, 2015). Öteleme, bir bileşenin belirli düzlemsel yönde tutarlı hareketini; döndürme, bir nesnenin herhangi bir eksen etrafındaki hareketini; ölçeklendirme, boyuttaki genişlemeyi veya daralmayı tanımlamaktadır. Kinetiğin dördüncü unsuru olan malzemenin deformasyonu ise kütle veya esneklik gibi malzeme özelliklerinin manipülasyonunun artımlı deformasyona izin verdiği mikro ölçeği dikkate almaktadır (Moloney, 2011).



Şekil 1. Kinetiği oluşturan temel unsurlar (Kaynak: Moloney, 2011)

Değişen çevresel şartlara göre malzemenin yapısındaki bozulma, malzemenin elastikiyeti ölçeğindedir. Çevresel şartlar ilk haline geldiğinde malzemedeki değişim de geri dönüşebilir

olmalıdır (Engin, 2022). Mekânsal açıdan dönüşüm ve deformasyon üzerine yapılan bu tanımlamaların, tasarımda yer alan kinetik ve diğer hareket biçimleri arasındaki ayrımın anlaşılmasına yardımcı olması amaçlanmaktadır.

3. KİNETİK SİSTEMLERİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Kinetik anlayışın mimarlıktaki geçmişi geleneksel çadırlara, geleneksel kapı ve pencerelerin yapılarda yer almasına kadar dayansa da, 19. yy' dan bu yana kinetik sistemlerde, manüelden mekaniğe, mekanikten elektronik ve akıllı sistemlere geçişi sağlayan önemli gelişmeler yaşanmıştır (Ramzy & Fayed, 2011). Geçmişten günümüze kadar olan süreçte yaşanan gelişmeler, kinetik mimarlık kavramının ortaya çıkması, günümüzde geliştirilerek devam eden uygulamaların ve yaklaşımların ilk prototiplerini oluşturması bakımından önemlidir (Şekil 2). Kinetik sistemlerin gelişiminin yakın geçmişini üç kısım olarak incelemek mümkündür. Bunlar;

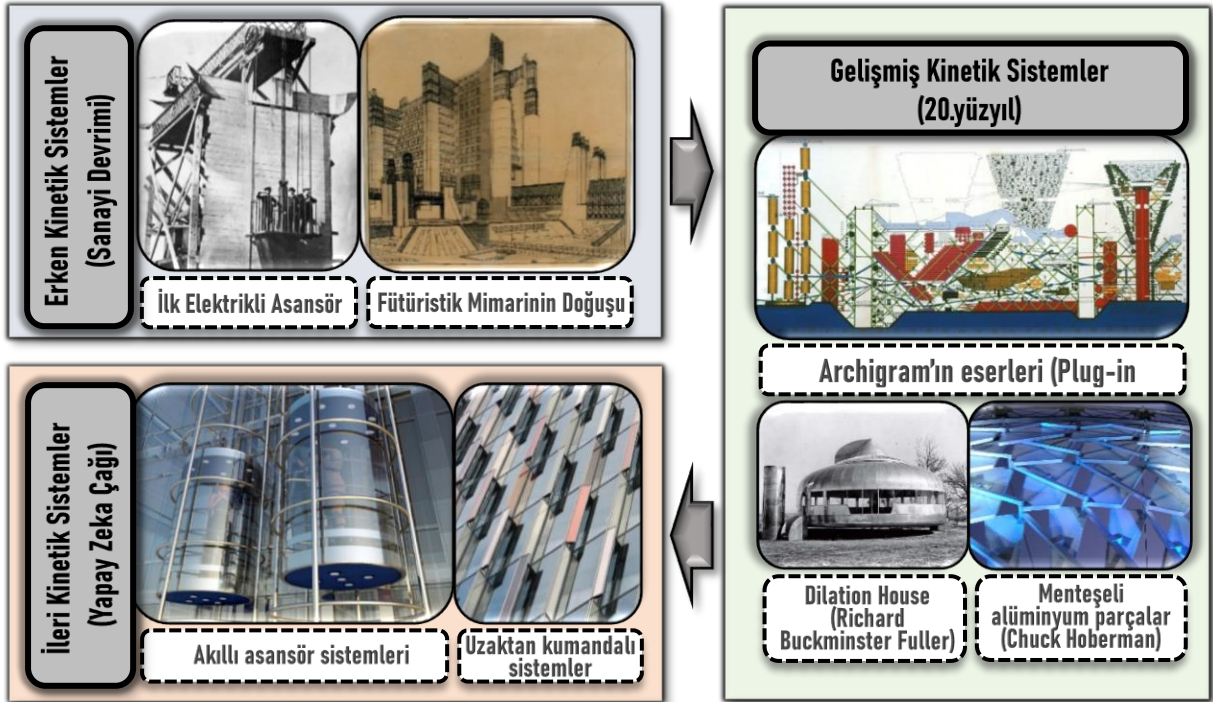
- Erken Kinetik Sistemler (Sanayi Devrimi)
- Gelişmiş Kinetik Sistemler (20. yüzyıl)
- İleri Kinetik Sistemler (Yapay Zeka Çağı)

- **Erken Kinetik Sistemler (Sanayi Devrimi);** Endüstri Devrimi'nin başlaması ile birlikte hareket tekniklerinde önemli gelişmeler yaşanmıştır. Makineler, buhar motorları ve ardından elektrik motorlarının icadı bu devrime öncülük etmiştir. 19. yüzyılda Werner von Siemens'in elektrikli asansör icadı, yüksek bina mimarisi gibi yeni fikirlere olanak sağlamıştır. Bu dönemdeki bir diğer önemli gelişme ise; tasarımda hareketin, dinamiğin ve hızın ön planda tutulduğu fütüristik mimarinin ortaya çıkmasıdır. Fütüristik mimarlığın öncülerinden İtalyan mimar Antonio Sant'Elia'nın 1914 yılında yaptığı Citta Nuova (New City) çizimleri, dönemin yeni mimari yaklaşımını yansıtan önemli örneklerden birisidir (Ramzy & Fayed, 2011). Citta Nuova, ideal bir metropolün nasıl tasarlanması gerektiğinin anlatıldığı çizimlerdir. Betonarme ve çelik kullanımının ön plana çıktığı tasarımda; binalar, dinamik ve büyük makineler gibi inşa edilerek şehrin yeniden keşfi vurgulanmıştır. Bu çizimlerde bina; köprü ve yürüyüş yolları ile bir dış asansöre bağlıdır. Bina yüzeyinde yer alan mekaniğe ait bileşenler, binanın tasarımında ön plana çıkmaktadır (Çakmaklı & Arslan 2019) (Kasaboğlu, 2016). Bu düzenleme ile Sant'Elia, 1914'teki tek düze tasarım fikirlerine yeni bir boyut kazandırmıştır.

- **Gelişmiş Kinetik Sistemler (20. yüzyıl);** 20. yüzyılın ikinci yarısında kinetik sistemleri destekleyen tekniklerde önemli gelişmeler yaşanmıştır. Bu dönemde elektronik ve dijital sistemlerdeki gelişmeler, öncü mimarların tasarımlarına dahil edilerek farklı tasarım fikirlerinin gelişimine katkı sunmuştur. Bu kapsamda ilk dikkat çekici çalışmalar; Metabolist School ve Archigram'ın mimarları tarafından ortaya konmuştur. Mimarlar; yapıların canlılarda olduğu gibi bir miktar canlılık ve enerjiyi yansıtmaya gerektiğine inanmışlardır. Ayrıca, klasik ve geleneksel anlayıştan farklı olarak bir binanın yüzlerce yıl dayanması yerine kolayca yıkılıp yerine yenisinin konabilmesi gerektiğini ve mega bir yapıya asılan veya bölünebilen modüler birimler yardımıyla, binaların genişleyebilmesine veya değişebilmesine imkân sağlayan tasarım fikirleri sunmuşlardır (Ramzy & Fayed, 2011). Yine bu dönemin öncü tasarımcılarından başlıcaları; Richard Buckminster Fuller, Frei Otto, Santiago Calatrava ve Chuck Hoberman'dır. Richard Buckminster Fuller, genellikle hafif malzemelerin kullanıldığı yeni yapısal sistemlerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Kinetik mimarideki en önemli başarısı fabrikada üretilip, birimler halinde sahaya taşınabilen ve bu sayede nakliye ve montaj kolaylığı sağlayan "Dilation House Deployable" olmuştur. Frei Otto ise hafif asma-germe sistemleri

üzerine yaptığı araştırmalar, katlanabilir çatı sistemleri ve bu tür sistemlerin tasarımını destekleyen bir bilgisayar programını geliştirmesi ile ön plana çıkmıştır (Ramzy & Fayed, 2011). Santiago Calatrava, doğadan ve doğal kompozisyonlardan ilham alan tasarımlarında ileri teknolojileri kullanmasıyla tanınmaktadır. Tasarımlarında dönüştürülebilir / sıkıştırılabilir model çalışmaları kinetik mimarlığın gelişimine önemli katkılarda bulunmuştur. Fakat kinetik mimarlık adına, bu dönemin en başarılı tasarımları; menteşeli üniteler kullanarak mekanik, hafif ve esnek bir yapı sistemi geliştiren Chuck Hoberman'a aittir. Forma hareket özgürlüğü sağlamak için tasarladığı bu sistemde genellikle alüminyum parçalar kullanmıştır (Ramzy & Fayed, 2011). Bu dönemde yaşanan önemli gelişmeler, günümüzde kinetik mimari anlayış ile tasarlanan pek çok yapıya öncülük etmiştir.

- **İleri Kinetik Sistemler (Yapay Zeka Çağı);** 20. yüzyılın sonlarında, gelişen teknoloji ile birlikte yapay zeka terimi yaygınlaşmaya başlamıştır. Yapay zeka; insan beyniyle benzer işler yapabilen bilgisayarlı makinelerden oluşmaktadır. Bunlardan bazıları; robotlar ve uzaktan kontrol sistemleridir. Bu kavram son yıllarda mimarlık alanında da akıllı kinetik sistemlerin geliştirilmesi adına popülerlik kazanmıştır. Gelişmeye başlayan akıllı kinetik sistemlere; akıllı asansör sistemleri, otomatik araba park sistemleri ve akıllı biyomekanik kinetik sistemler örnek olarak verilebilmektedir. Fakat bu sistemlerin çoğu henüz deneme aşamasındadır (Ramzy & Fayed, 2011). Geliştirme aşamasında olan sistemlere ek olarak mevcut kullanılan birçok kinetik sistem, bina cephelerine entegre edilerek; tasarım, iç konfor ve sürdürülebilirlik konusunda önemli katkılar sunmaktadır.



Şekil 2. Kinetik sistemlerin tarihsel gelişiminin şematik gösterimi (Kaynak: Ramzy & Fayed, 2011)

3. KİNETİK MİMARLIK KAVRAMININ ORTAYA ÇIKIŞI, ÖZELLİKLERİ VE SINIFLANDIRMASI

Kinetik mimarlık kavramı, hareket yeteneği kazandırılmış binaların tasarımını ifade etmektedir (Fouad, 2012). Odak noktası hareket kavramı olması nedeniyle mimarideki değişimi ve esnekliği de içinde barındıran bir alandır (Çınar, Yazıcı, 2022). Kinetik mimarlık kavramının tanımlarını, tasarım felsefesini ve mimari uygulamalarını kapsamlı bir şekilde ifade eden ilk kitap Zuk ve Clarke'ın "Kinetic Architecture" kitabıdır. Zuk ve Clark (1970)'a göre; bir form, belirli bir denge kurarak bir dizi baskıya tepki verebilmeli, yani zamana karşı stabil olmamalıdır. Bu durum, yapıların belli statik gereklilikler dışına çıkılarak tasarlanması anlamına gelmeseyse de mimari formun, kendisine etki eden baskılar dizisi ve bu baskıları yorumlama imkânı sunan teknoloji dahilinde meydana gelen değişikliklere uyum sağlama konusunda özgür olması gerektiğini vurgulamıştır (Fouad, 2012; Zuk & Clark, 1970). Kinetik mimarlık kavramı ortaya çıktığından bu yana önemli teknolojik gelişmeler yaşanmakta ve mimarlıktaki kullanım alanı hızla artmaktadır. Bu da kinetik mimarlığa farklı yapı sistemlerini ve biçimlerini içeren geniş bir çalışma alanı kazandırmaktadır.

Kinetik mimarının artan çalışma alanı ile birlikte inşaat sektöründe trend haline geldiği görülmektedir. Bu konu üzerine yazılan pek çok akademik yazı mevcuttur. Yıllar geçtikçe araştırmacılar kinetik mimariye yönelik çeşitli sınıflandırmalar geliştirmişlerdir. Fakat bu sınıflandırma yöntemleri her yazarın kendi bakış açısına ve çalışma alanına dayanmaktadır. Megahed (2016), yaptığı kapsamlı incelemeler sonucunda sınıflandırmaların statik ve dinamik hareket olmak üzere iki ana yaklaşım üzerinde yoğunlaştığını, bu iki yaklaşımın alt başlıklara ayrıldığını ve çeşitlilik gösterdiğini belirtmiştir. Statik hareket, sadece çizim aşamasında bina tasarımındaki hareketi temsil etmekte; dinamik hareket ise değişen çevresel koşullara göre özelliklerinde amaç veya ihtiyaç doğrultusunda değişiklik yapabilen mekanik sistemlerin binaya dahil edilmesi ile sağlanan hareketi temsil etmektedir (Razaz, 2010; Megahed, 2016). Kinetik mimarlıktaki statik ve dinamik hareket yaklaşımlarının daha net anlaşılması için daha geniş bir tanımlama yapılarak, örnekler üzerinden anlatılacaktır.

3.1. Statik Hareket

Bu hareket yaklaşımı genellikle estetik bir etkiyi yansıtmaktadır. Gerçek hareketi içermemekte, sanal olarak kabul edilebilecek hareketi ifade etmektedir. Diğer bir ifade ile hareket, yalnızca çizim aşamasında bina tasarımındaki, hareket hissi uyandıran modellerin kullanımıyla etkisini göstermektedir (Megahed, 2016). Binanın formunda; deformasyon, yan yana – üst üste dizilim, sürtünme, ölçeklendirme vs. ile hareketleri ima ederek sanal hareket oluşturma, mimarların kullandığı tekniklerden birkaçını oluşturmaktadır (Razaz, 2010). Kısacası statik hareket, tasarımdaki gerçek hareketi değil, formda belli tekniklerle oluşturulan sanal hareketi yansıtmaktadır. Statik hareketi temsil eden iki örnek; Pearl River Tower ve The New Shanghai Super Tower yapılarının formlarıdır.

Pearl River Tower örneğinde, rüzgârın doğrusal olarak akması, binanın rüzgâra karşı bariyer olmaması için formda hareket hissi uyandıran oval açıklıklar bırakılarak buradan hava akışının sürekliliği sağlanmış ve binanın üzerindeki rüzgâr yükü azaltılmıştır (Şekil 3). Ayrıca bu açıklıklara da rüzgâr türbinleri yerleştirilerek elektrik enerjisi üretimi sağlanmıştır. The New Shanghai Super Tower örneğinde ise yapı kıvrımlı dairesel bir formda tasarlanarak dönüş hissi uyandırmaktadır. Çift cidarlı cepheye sahip yapıda iç katman çekirdeği çevrelerken, dış katman yükseldikçe dönen bina kabuğunu oluşturmaktadır. İç ve dış katman arasında bulunan atriyum, termal tampon bölge görevi görerek, iç mekân hava kalitesini arttırmaktadır (Şekil 3). Kule,

statik harekete sahip kıvrımlı, asimetrik formu sayesinde üzerindeki rüzgâr yükünü %24 oranında azaltmakta, kare bir binaya göre %14 daha az cam kullanılmakta ve çatının spiral şeklindeki tasarımı ile yağmur suyu toplanılıp iç mekânda kullanılabilir (Razaz, 2010). Sonuç olarak statik hareket, tasarımda estetik bir görünüm yakalanmasının yanında çeşitli çevresel faydalar da sunabilmektedir. Fakat gün içinde bile farklılık gösterebilen dış koşullara karşı formdaki sanal hareket bu hızlı değişime adaptasyon konusunda sorun yaşayabilmektedir.



Şekil 3. Statik hareket yaklaşımı ile tasarlanan bina örnekleri (Kaynak: (a)(b)(c)(d)(e)(f)(g) Razaz, 2010)

3.2. Dinamik Hareket

Sensörlerin, aktüatörlerin ve mikrodenetleyicilerin kullanımıyla, binaların içinde, üzerinde veya genelinde gerçek kontrollü hareketin tasarlanmasını, entegre edilmesini ve uygulanmasını temsil eden yaklaşımdır. Dinamik hareket, geleneksel mimarlığın teknolojik yenilikler sayesinde kinetik ve estetik şekilde yeniden yorumlanmasına fırsat sağlamaktadır (Razaz, 2010). Değişen çevresel koşullara hızlı bir şekilde yanıt verebilen gerçek hareketi barındırdığı için binanın bütünü yerine genelde cephelerde bu yaklaşım temsil edilmektedir. Dinamik hareketi temsil eden iki örnek Al-Bahar Towers ve ThyssenKrupp Quarter Essen yapılarının cepheleridir.

Abu Dabi’de sıcak bir iklimde yer alan Al-Bahar Towers örneğinde; gün boyunca cepheye farklı açılarla gelen güneş ışığına karşı, geleneksel mashrabiya desenlerinden yararlanılarak geliştirilen altıgen form cepheye yerleştirilerek, lineer aktüatörler yardımıyla 5 farklı çalışma konfigürasyonu ile uyarlanabilen katlanır gölgeleme sistemi tasarlanmıştır (Şekil 4). Cephedeki güneş ışığına göre değişen kontrol edilebilir bu sistem, cepheye dinamik bir görüntü katmasının yanında tasarım tahminlerine göre iç mekân soğutma giderlerini %25’e kadar azaltmaktadır (Barozzi vd., 2016). ThyssenKrupp Quarter Essen örneğinde de Al Bahar Towers örneğine benzer bir sistem mevcuttur. Cephe, yaklaşık 1280 paslanmaz çelikten yapılmış motorlu döner panjur ile gölgenmekte ve lineer motor sürücüler tarafından ayrı ayrı kontrol edilmektedir. Ayrıca cephe; kapalı (cepheye paralel), güneşin konuma göre (değişken açılar) ve açık (cepheye dik) olmak üzere 3 farklı çalışma konfigürasyonu sunmaktadır (Şekil 4) (Barozzi vd., 2016). Sonuç olarak dinamik hareket, değişen çevresel koşullara karşı özellikle cephenin hızlı bir şekilde adapte olmasını sağlayarak yapıya dinamik bir görüntü

kazandırmasının yanında örneklerde de bahsedildiği üzere çeşitli çevresel faydalar sağlamaktadır.



Şekil 4. Dinamik hareket yaklaşımı ile tasarlanan bina örnekleri (Kaynak: (a) (URL-1), (b) Habibi vd., 2022, (c) (URL-2), (d)(e) (URL-3), (f)(g)(h)(i)(j) (URL-4))

Kapılar, pencereler, asansörler veya yürüyen merdivenler dışında fiziksel harekete binalarda yaygın olarak rastlanmamaktadır. Genel olarak, ortalama bir binanın yapısı ve formu; istikrar, sabitlik, sağlamlık ve hareketsizliği yansıtır (Razaz, 2010). Bu varsayımlardan farklı olarak, bina yüzeyinde dinamik hareketin etkisinin hissedilmesini sağlayan uyarlanabilir cepheler geliştirilmiştir. Cephenin geleneksel anlayışın dışına çıkılarak yeniden yorumlanması, çeşitli sürdürülebilir ve tasarımsal faydaları da beraberinde getirmiştir.

4. KİNETİK MİMARLIK KAPSAMINDA DİNAMİK HAREKET YAKLAŞIMI OLARAK; UYARLANABİLİR CEPHELER

Cepheler binalarda, enerji performansını ve kullanıcıların refahını etkileyen ana yapı elemanlarından birisidir. Mevcut standartlar, günümüzdeki geleneksel bina cephelerinin performansı değerlendirilirken sabit iklim koşullarını varsaymaktadır (Attia vd., 2018). Fakat iklim koşulları bazı bölgelerde sürekli değişkenlik göstermektedir. Bu bölgelerde çevreye uyum sağlayabilecek binaların tasarlanması önemlidir. Aksi takdirde, iç mekân konfor koşulları bu değişimden olumsuz etkilenecek veya ideal konfor koşullarının sağlanması için fazla enerji tüketimi gerekecektir. Bu bağlamda uyarlanabilir cepheler, değişen çevresel koşullara dinamik bir şekilde tepki vererek kullanıcı refahı ve çevresel fayda bakımından çeşitli fırsatlar oluşturabilmektedir (Attia vd., 2018). Uyarlanabilir cepheler, mevcut hava koşullarına uyum sağlayarak enerji tasarrufu sağlamanın yanında kullanıcıların ihtiyaç ve tercihlerine anında cevap verebilmekte, geçici performans gereksinimlerine ve özel hava koşullarına göre fonksiyonlarını, özelliklerini veya davranışlarını zaman içinde değiştirerek daimi konforlu iç mekânlar sunabilmektedir (Karakoç & Çağdaş, 2021). Buradaki önemli nokta, cephenin değişen çevresel koşullara adaptasyon kabiliyetidir. Bu da; içsel olarak tepki veren malzemelerin cephede kullanımıyla veya dinamik bir sistemle sağlanmaktadır.

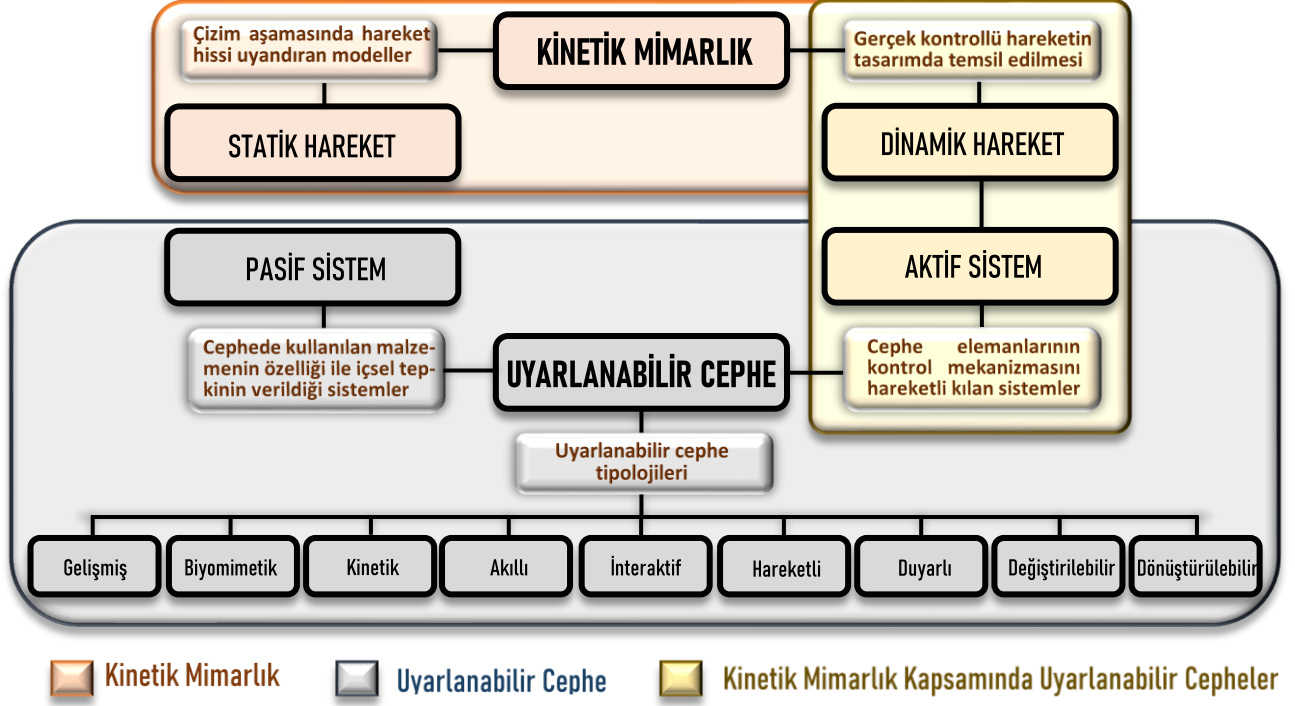
Uyarlanabilir cephelerin sınıflandırılması üzerine pek çok akademik makale mevcuttur. Romano vd., (2018)'nin yapmış olduğu sınıflandırmayı bu çalışma kapsamında yorumlayacak olursak; gelişmiş, biyomimetik, kinetik, akıllı, interaktif, hareketli, duyarlı, değiştirilebilir, dönüştürülebilir cephe olmak üzere birçok uyarlanabilir cephe tipolojisi bulunmaktadır (Romano vd., 2018). Alandaki sınıflandırmanın bilimsel yaklaşımdaki farklılıkları göz önünde bulundurulduğunda uyarlanabilir cephe çeşitlerinin birbirlerinden ayrıldığı noktaları net bir şekilde ifade eden tanımlara sahip olmadığı görülmektedir. Bu nedenle, her cephe sistemi kendine özgü özelliklerine göre sınıflandırıldığında, aynı cephe ile ilgili iki veya daha fazla kavramdan bir arada bahsetmek mümkün olabilmektedir (Karakoş & Çağdaş, 2021). Bu çalışma, uyarlanabilir cephelerin tipolojileri yerine kinetik mimarlık kapsamında hareketi temsil eden çalışma sistematiğine odaklanmaktadır. Uyarlanabilir cepheler çevresel uyaranlara karşı içsel veya dışsal tepkiler vermektedir. İçsel tepkiler, çevresel uyaranlar tarafından uyarlanabilir davranışın otomatik olarak tetiklenerek kendi kendini ayarlamasıdır. Dışsal tepkiler, önce bilginin alınması, işlenmesi ve ardından da eylemlerin gerçekleştirilmesidir. Bu da geri bildirim ve dolayısıyla yapay zekaya olanak sağlamaktadır (Loonen vd., 2015). Malzemenin özellikleri vs. ile içsel tepki veren sistemleri, "pasif uyarlanabilir cephe sistemi"; harici sensörler, kontroller, aktüatörler aracılığıyla dışsal tepki veren sistemleri, "aktif uyarlanabilir cephe sistemi" olarak ikiye ayırmak mümkündür.

- Pasif Uyarlanabilir Cephe Sistemi: Bu sistemde, kullanılan malzemenin özelliği sayesinde algılama, kontrol ve harekete geçme durumu içsel ve otomatik olarak gerçekleşmektedir. Cephe sisteminin yanıt verebilme kapasitesi, malzemenin davranışına özgü olduğu için herhangi bir duyuşal sistem veya motor fonksiyon gerektirmemektedir (Orhon, 2016). Bu yönleriyle pasif uyarlanabilir cephe sistemleri, dinamik bir hareketi temsil etmemektedir. Ancak aktif sistemlere entegre bir şekilde yer alarak çalışma kapsamına girebilmektedir.

- Aktif Uyarlanabilir Cephe Sistemi: İklim koşullarının değişken olduğu ve gece-gündüz/yıllık iklim verilerinin stabil olmadığı durumlarda sensörler, kontroller, aktüatörler ile cephe elemanlarının kontrol mekanizmasını hareketli kılan sistemlerdir (Yaman, 2021). Buradaki önemli nokta, geri bildirimleri kabul etme yeteneği ve buna bağlı olarak hızlı bir şekilde reaksiyon gösterebilme kabiliyetidir. Bu da cephede dinamik hareketin oluşturulmasını sağlamaktadır.

Binalardaki statik cephelerin değişen çevresel koşullara yanıt vermekte zorlanması, iç mekân konfor koşullarının korunması için teknik bina ekipmanlarına duyulan ihtiyacı arttırmakta ve dolayısıyla enerji tüketimi artmaktadır. Bunun hem çevresel hem de ekonomik pek çok sonucu mevcuttur. Binaların sürdürülebilirliğini arttırmak için enerji nötr veya enerji pozitif binalar tasarlamak buradaki esas amaçtır. Bu amaç doğrultusunda uyarlanabilir cepheler: Trombe duvarı, çift cidarlı cephe, sabit panjur ve ışık yönlendirme sistemleri gibi pasif sistemler; hareketli güneş kırıcılar, otomatik çalıştırılabilir pencereler gibi aktif sistemler sayesinde çeşitli çözümler sunmaktadır. Pasif sistemler; gün içinde bile değişkenlik gösterebilen çevresel koşullara kolay adapte olmakta sorun yaşayabilmektedir. Aktif sistemler, kontrol edilebilir özellikleri sayesinde pasif sistemlere göre hızlı adaptasyon ve dinamik hareketin cepheye kattığı estetik değer bakımından daha çok ön plana çıkmaktadır. Ayrıca teknolojik gelişmeler ile birlikte, aktif sisteme sahip uyarlanabilir cephelerin uygulama çeşitliliği artmakta ve sürdürülebilir mimarinin her geçen gün önem kazandığı dünyamızda, mimarlığın gelecekteki

odak noktası haline geleceği ön görülmektedir. Çalışmanın bir sonraki bölümünde dinamik hareketten yararlanan aktif sisteme veya pasif-aktif entegre bir sisteme sahip uyarlanabilir cephelerin sürdürülebilir mimarlık alanında sunduğu fırsatlar incelenecek ve değerlendirilecektir (Şekil 5).



Şekil 5. Sürdürülebilir mimari yaklaşımların inceleneceği çalışma kapsamı

5. UYARLANABİLİR CEPHELERİN SÜRDÜRÜLEBİLİR MİMARİYE KATKISI

Binalar, genel olarak küresel enerji tüketiminin üçte birinden fazlasından sorumludur. Binalarda tüketilen tüm enerjinin üçte birinden fazlası ise ısıtma ve soğutma için harcanmakta, soğuk iklimlerde bu oran %50-60 seviyelerine kadar çıkmaktadır (IEA, 2013). Dolayısıyla, binaların enerji tüketiminin ve karbondioksit emisyonunun azaltılması sürdürülebilir bir çevre için inşaat sektörünün çözmesi gereken en önemli iki konudur. Bunun, uygun maliyet ve kullanıcı konforundan ödün vermeyecek şekilde ele alınması da çözümü kadar önemlidir (Loonen vd., 2015). Binaların sürdürülebilirliğini sağlamak için; sosyal, çevresel ve ekonomik olmak üzere üç faktöre dikkat etmek gerekmektedir. Sosyal açıdan bakıldığında, kullanıcı refahının ve iç mekân çevre kalitesinin üst düzeyde tutulmasına; çevresel açıdan bakıldığında, enerji tüketiminin azaltılmasına ve binanın çevreye etkisinin nötralize edilmesine; ekonomik açıdan bakıldığında, bütün bunların uygun maliyet ile gerçekleştirilmesine ihtiyaç vardır (Attia vd., 2020). Bu nedenle binalarda sürdürülebilir çözümlerden maksimum verimi alabilmek için bu çözümlerin çok yönlü ve kapsayıcı olması gerekmektedir.

Bina cephesi iç ve dış mekân arasındaki arayüzde konumlandığı için binanın enerji dengesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle daha sürdürülebilir ve enerji nötr binaların tasarımındaki rolü büyüktür (Loonen vd., 2015). Cephenin, binaların enerji performansı üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulduğunda ise cephe elemanlarının enerji akışı ve ısı konfor açısından ihtiyaç duyulan esnekliği sağlayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir (Aelenei vd., 2016). Yakın zamana kadar bina cephesinin tasarlanması ve geliştirilmesindeki odak noktası; yapısal, pasif ve dayanım performansı olmasına karşın, günümüzde bu kavramlar

yerini duyarlı, uyarlanabilir, dinamik gibi tanımlamalara bırakması ile cephenin daha esnek davranmasını sağlama isteği daha fazla kabul görmeye başlamıştır (Loonen vd., 2015). Mimarlıktaki bu güncel eğilimler, bulunduğu çevreye uyum sağlayabilen uyarlanabilir cephelere duyulan ilgiyi arttırmıştır.

Uyarlanabilir cepheler; malzeme, bileşen ve sistemler aracılığıyla davranışlarını iç-dış parametrelere göre gerçek zamanlı olarak değiştirerek binanın enerji verimliliğinde ve ekonomisinde iyileştirmeler sağlayabilmektedir (Aelenei vd., 2018). Çevresel faktörleri etkin bir şekilde kontrol etmesi sayesinde kullanıcıya, konforlu ve ideal iç mekân koşulları sunabilmektedir. Sonuç olarak, uyarlanabilir cepheler kullanıcı konforunu ve binanın enerji tüketimini optimize ederek sürdürülebilirliğe önemli katkılar sağlamaktadır (Karakoç & Çağdaş, 2021). Uyarlanabilir cephelerin, belirtilen özellikleri gerçekleştirmesi belli bir sistem ve çeşitli tasarım yaklaşımları ile sağlanmaktadır (Şekil 6). Çalışmanın devamında uyarlanabilir cephelerin tasarım sürecindeki yaklaşımlar, cephenin dinamik ve duyarlı hale getirilebilmesi için kullanılan sensörler ve aktüatörler, kullanılan sistemlerin cephedeki konumlandırılması örnekler ile beraber belirtilecektir. Ardından, örnekler üzerinden uyarlanabilir cephelerin sürdürülebilirliğe katkısı incelenecektir.

Sistemler	Uyum Sağlama Yaklaşımları	Olasılıklar
Cephe Gölgeleme	<ul style="list-style-type: none"> Kinematik Yaklaşımlar Elastik Kinetik Yaklaşımlar 	
Kontrol Sistemleri	<ul style="list-style-type: none"> Harici - Aktif Dahili - Pasif 	<ul style="list-style-type: none"> Sensörler, aktüatörler vs. Akıllı Malzemeler
Cephe Verimliliği	<ul style="list-style-type: none"> Dışarıdan Uygulanan Sistemler Dahili Olarak Uygulanan Sistemler Cepheye Entegre Sistemler 	<ul style="list-style-type: none"> Çift Cidar Değiştirilebilir Cam

Şekil 6. Uyarlanabilir cephe sistemleri (Kaynak: Stankovic, Tanic, Cvetanovic, 2019)

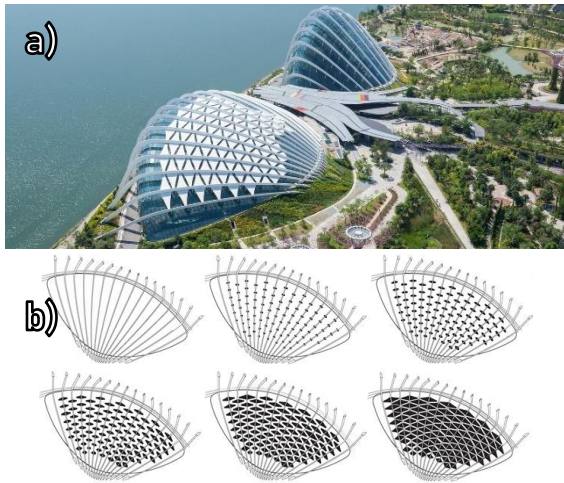
5.1. Uyarlanabilirliğe Kinematik Yaklaşımlar

Sabit güneş kırıcıların verimliliği güneşin geliş açısı ile ilişkili olup, gün ve yıl içinde değişkenlik göstermektedir. Uyarlanabilir sistemler ise güneş ışınımının değişimine göre ayarlanabilmesi ile bireysel kontrole, optimum gölgelemeye, gün ışığı kullanımının maksimuma çıkarılmasına olanak sağlaması bakımından sabit olanlara kıyasla üst düzeyde verimlilik sağlamaktadır. Sabit güneş kırıcı elemanlar dik eksenli ve dik açılı düzlemsel cephelere uygulandığında iyi performans gösterebilirler bile modern mimaride giderek artan kavisli yüzey ve serbest biçimli zarflar için yetersiz ve etkisiz kalmaktadır. Bu duruma bir çözüm olarak, karmaşık geometrilere uyum sağlama konusunda yüksek derecede adaptasyon ve esneklik sunan yeni gölgeleme sistemleri geliştirilmektedir (Barozzi vd., 2016). Bu gölgeleme sistemleri kontrol edilebilir olup, çeşitli mekanik sistemleri barındırmaktadır. Garden by the Bay ve Kiefer Technic Showroom yapılarının uyarlanabilir cepheleri bu konuda önemli iki örneği temsil etmektedir.

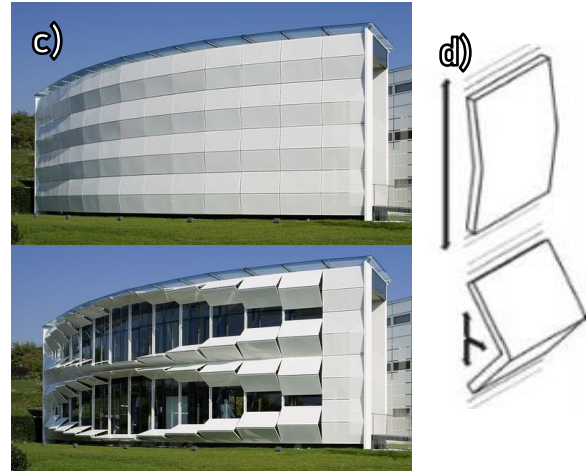
Garden by the Bay, büyük ölçekli kavisli yapılara uygulanan uyarlanabilir gölgeleme sisteminin başarılı örneklerinden biridir. Cephenin dışına yerleştirilen kanvas gölgeliklerden

oluşan açılır kapanır sistem, cepheyi aşırı ısınmalardan korurken, ışık geçişini de sağlayarak doğal aydınlatma imkânı sunmaktadır. İç mekâna yerleştirilen sensörler yardımıyla sıcaklık, ışık ve nem kontrol altında tutularak; değerler ideal seviyenin üstüne çıktığında motorlar gölgeleme sistemini çalıştırmaktadır. Cepheyi saran kemerlere yerleştirilen motorlu panjurların; diagrid düzende açılması maksimum gölgeleme imkânı sunmakta, bireysel üçgen form ve kullanılan kumaş sayesinde ihtiyaç ortadan kalktığında yuvarlanma yoluyla cepheye gizlenip, ihtiyaç olduğunda ise panjurun tekrar açılarak düz bir şekilde kalmasını sağlamıştır. Gölgeleme sistemi bu özelliği sayesinde kavisli bir yüzeye maksimum uyum sağlamıştır (Şekil 7) (Barozzi vd., 2016). Yapının uyarlanabilir cephesi; kullanıcı konforu, soğutmaya harcanacak enerjiden tasarruf, doğal aydınlatma ve panjurların geri dönüştürülebilir malzemeden yapılması ile sürdürülebilirliğini kanıtlamaktadır.

Kiefer Technic Showroom örneği ise ışık sensörleri tarafından merkezi olarak kontrol edilen delikli alüminyum paneller aracılığıyla iç iklim koşullarını dış mekân koşullarına göre optimize eden dinamik bir cepheye sahiptir. Ayrıca bu cephe kullanıcıların gerektiğinde otomatik kontrolü devre dışı bırakarak kullanıcı kontrolü ile kendi alanlarını kişiselleştirmelerine olanak sağlamaktadır (Şekil 8) (Tabadkani vd., 2021). Yapının uyarlanabilir cephesi; otomatik ve manuel gölgeleme sistemi ile kullanıcı konforu ve soğutmaya harcanacak enerjiden tasarruf edilmesini sağlayarak sürdürülebilirliğini kanıtlamaktadır.



Şekil 7. Garden by the Bay (a) cephenin genel görünümü, (b) cephenin çalışma prensibi (Kaynak: (a)(URL-5), (b)(URL-6))



Şekil 8. Kiefer Technic Showroom (c) cephenin genel görünümü, (d) cephenin çalışma prensibi (Kaynak: (c)(URL-7), (d) Moloney, 2011)

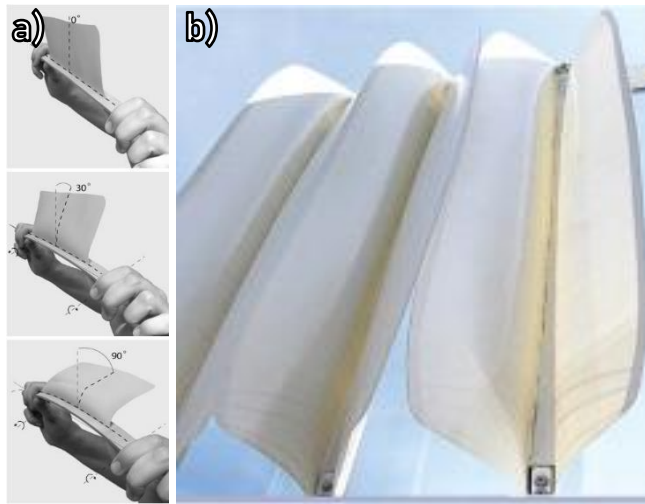
5.2. Uyarlanabilirliğe Elastik Kinetik Yaklaşımlar

Mekanik olarak karmaşık sistemlere ihtiyaç duyulmadan, uyarlanabilirliğin menteşesiz elastik bükülme deformasyonu ile sağlandığı yaklaşımdır (Barozzi vd., 2016). Flectofin® adı verilen gölgeleme sistemleri, bu yaklaşımı yansıtan ideal örneklerden bir tanesidir.

Flectofin®, elastik deformasyon ilkesini kullanmak üzere ITKE'de geliştirilen biyomimetik gölgeleme sistemidir. Cennet kuşu çiçeğine, bir kuş konması sonucu geri dönüşümlü deformasyona uğrayan çiçeğin hareketinden ilham alınarak geliştirilen sistem, menteşesiz gölgeleme elemanlarını esnek bir yapıya dönüştürmektedir. Sistem, omurga görevi gören bir çubuk ve çubuğa bağlı cam elyaf takviyeli polimerden (GFRP) oluşmaktadır. Çubuğa uygulanacak bir kuvvetin yol açacağı bükülme deformasyonu, GFRP'nin de cennet kuşu

çiçeğinin yaprakları gibi yanal bir katlanma hareketini tetiklemektedir (Şekil 9) (Schumacher, Vogt & Krumme, 2019). Buradaki menteşesiz mekanik sistem fikri, gereken bakım miktarını da azaltabilmektedir. Flectofin®'e benzer bir elastik kinetik yaklaşım; Thematic Pavilion Expo 2012'nin cephesine uygulanmıştır.

Thematic Pavilion Expo 2012'nin cephesi, 140m uzunluğunda ve 3-13m arasında değişen yüksekliğe sahiptir. Cephedeki gölgeleme sistemi; üst ve alt kenarların bir köşesi sabit desteklerle, diğer köşesi uzatılabilir aktüatörlerle desteklenen hafif kavisli 108 adet kinetik GFRP panjurdan oluşmaktadır. Aktüatörler üst ve alt kenarları birlikte iterek, GFRP elemanının elastik bükülmesine ve yanal dönmesine yol açmaktadır (Şekil 10). Cephenin elastik deformasyonun ne şekilde gerçekleşeceğini yönlendirmek için panjurun uzunlamasına kenarlarına 200 mm ve 30 mm genişliğinde çubuklar yerleştirilmiştir (Knippers vd., 2012). Yapının uyarlanabilir cephesi; kontrol edilebilir gölgeleme sistemi sayesinde aşırı güneş etkisinden iç mekân konfor koşullarının olumsuz etkilenmesini önleme ve GFRP panjur ile ışık geçişi kontrol altına alınarak doğal aydınlatmanın sağlanması, enerji tasarrufu ve kullanıcı konforunu sağlayarak sürdürülebilir olduğunu kanıtlamaktadır. Ayrıca farklı çalışma modlarında ayrı ayrı çalıştırılabilen panjurlar, cephede dalga hissi uyandırması ile yapının canlı bir form gibi hareket ederek kinetik kimliğini yansıtmasını sağlamaktadır.



Şekil 9. Flectofin®'nin; (a) cennet kuşunun çiçeğinden esinlenen hareket prensibi, (b) örnek uygulaması
(Kaynak: (a) Lienhard vd., 2011, (b) Schleicher vd., 2015)



Şekil 10. Thematic Pavilion Expo 2012 (a) cephenin genel görünümü, (b) cephenin çalışma konsepti (Kaynak: (c) (URL-8), (d) Knippers vd., 2012)

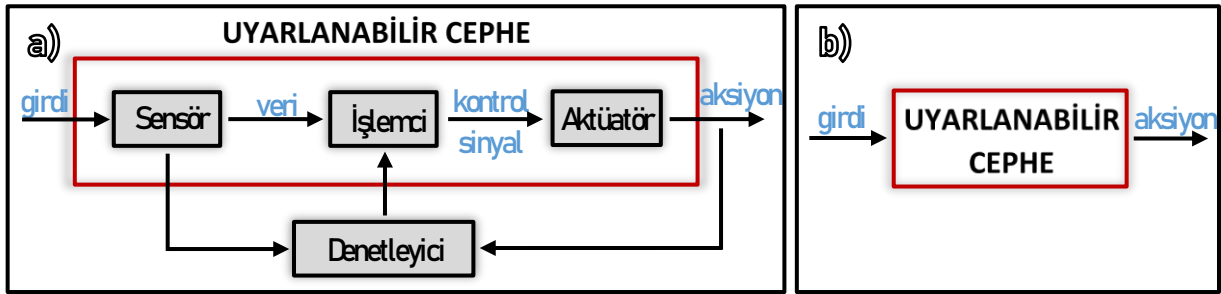
5.3. Sensörler ve Aktüatörler

Çalışmanın önceki kısımlarında çevresel koşulların, yıllık, aylık hatta günlük olarak bile değişkenlik gösterebileceği ve uyarlanabilir cephelerin bu koşullara hızlı adaptasyonu sayesinde enerji verimliliği ve iç mekân konfor koşullarının optimizasyonunun sağlanabileceği belirtilmiştir. Uyarlanabilir cephelerin çevresel koşullara karşı dinamik ve duyarlı hale getirilebilmesi için çalıştırılması, yani sisteme bir hareket girişinin sağlanması gerekmektedir (Barozzi vd., 2016). Bu hareket girişi, içsel ve dışsal kontrol ile iki şekilde gerçekleştirilmektedir. Geri bildirimden yararlanma yeteneği sağlayan aktüatörler, sensörler ve işlemciler dışsal kontrolün (veya aktif sistemlerin) temel unsurlarıdır. İçsel kontrol (veya pasif sistemler) ise herhangi bir yakıt veya elektrik kaynaklarına ihtiyaç duymadan çevresel koşullara bina kabuğunu oluşturan alt sistemlerin doğal özellikleri ile adaptasyon sağlamasıdır

(Loonen vd., 2013). İçsel kontrol sistemlerine akıllı malzemeler, çalışma kapsamında da akıllı malzemeler içerisinde şekil hafızalı malzemeler örnek olarak verilebilmektedir.

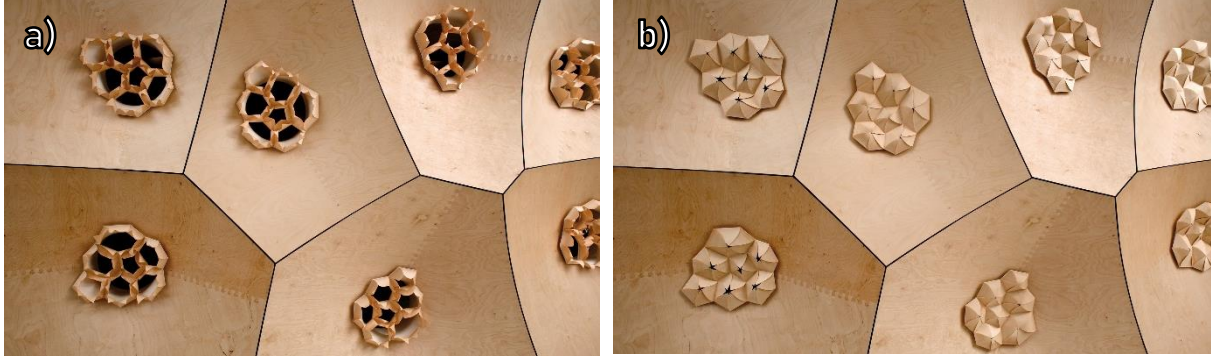
Dışsal kontrol sistemlerinde sensörler, çevresel alan ile uyurlanabilir sistem arasındaki bağlantıyı sağlamaktadır. Bunu; dış değişiklikleri kaydedip, kaydedilen verileri arzu edilen durumla karşılaştırıp, bilgiyi işlemciye aktardıktan sonra yapı üzerindeki tüm etkileri ve tepkileri izleyerek yapmaktadır. İşlemci, gelen verilerin işlendiği ve başlangıçtaki tasarım gereksinimlerine uygun olarak yeterli bir yanıtla detaylandırıldığı kontrol ünitesidir. Aktüatörler; sensörler tarafından algılanan ve işlemci tarafından detaylandırılan uyarılara bağlı olarak enerjiyi harekete dönüştüren ve sistemde bir reaksiyon oluşturarak geometrinin ya da boyut veya sertlik gibi ana özelliklerin değiştirilmesini sağlayan elemanlardır (Şekil 11) (Barozzi vd., 2016). Bu çalışma prensibine sahip olan aktif sistemlere, incelenmiş olan Garden by the Bay, Kiefer Technic Showroom ve Thematic Pavilion Expo 2012'nin uyurlanabilir cepheleri örnek olarak verilebilmektedir.

Sadece pasif sistemlerden oluşan uyurlanabilir cepheler bu çalışmanın kapsamına dahil edilmese de bazı istisnalar mevcuttur. Örneğin; şekil hafızalı malzemelerin çevresel koşullara verdiği içsel tepkiler sonucu formda meydana gelen geri dönüştürülebilir değişiklikler dinamik bir hareketi temsil etmekte ve elastik kinetik sistemlerin çalışma alanına girmektedir (Şekil 11). Şekil hafızalı malzemelerin kullanıldığı örnek projelerden birisi de HygroSkin-Meteorosensitive Pavilion'dur.



Şekil 11. Uyurlanabilir cephelerde; (a) dışsal kontrol sistemi, (b) içsel kontrol sistemi (Kaynak: (a)(b) Loonen, 2010)

HygroSkin-Meteorosensitive Pavilion, şekil hafızalı malzemenin uyurlanabilir cephelere entegrasyonunu gösteren mimari bir prototiptir. Cephenin ana özelliği, bağıl nem ve sıcaklıktaki değişimlere doğal bir şekilde uyum sağlamak için ahşap kaplamanın higroskopik özelliklerinden yararlanılmasıdır. Duyarlı cephe, hava değişikliklerine tepki olarak herhangi bir enerji kullanımı, mekanik veya elektronik kontrole ihtiyaç duymadan gözeneklerini otonom olarak açıp kapatabilmektedir. Burada algılama, kontrol ve harekete geçirme işlemi doğrudan malzemenin doğal özellikleri ile sağlanmaktadır. Cepheyi oluşturan panellerin içbükey yüzeylerine hava şartlarına duyarlı, kapandığında koni şeklini alan açıklıklar yerleştirilmiştir. Açıklıklar %30 ila %90 aralığındaki bağıl nem değişikliklerine yanıt verebilmekte; bu da ılıman iklimlerde parlak güneşli havadan yağmurlu havaya kadar olan nem aralığını ifade etmektedir. Bağıl nem arttığında açılıp, iç nem azaldığında kapanan açıklıklar, cephenin uyurlanabilirliğini sağlamaktadır (Şekil 12) (Orhon, 2016). Aktif sistemlerin pek çok sürdürülebilir katkıları olsa da sistemi harekete geçirmek için belli bir enerji harcanması gerekmektedir. Bu bakımdan, enerji harcamadan değişen çevresel koşullara hızlı tepki verebilen bu prototip, gelecekte tasarlanacak olan enerji-nötr binalar için önemli bir gelişmeyi ifade etmektedir.



Şekil 12. HygroSkin Pavilion'un cephedeki açıklıklarının bağıl neme göre; (a) Açık durumu (b) Kapalı durumu
(Kaynak: (a)(b) (URL-9))

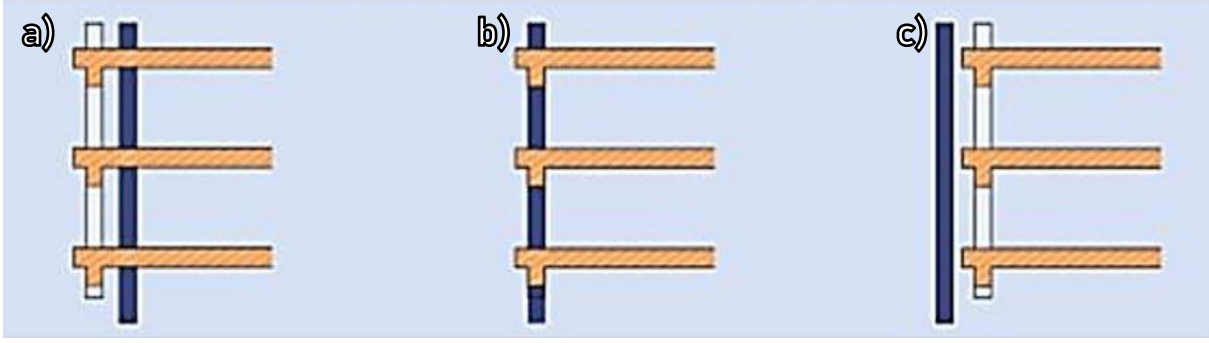
5.4. Cephe Verimliliği

Uyarlanabilir sistemlerin cephedeki konumlandırması performansını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu konuda 3 farklı sistem ön plana çıkmaktadır. Bunlar; içerden(dahili) uygulanan sistemler, cepheye entegre (gömülü) sistemler ve dışardan uygulanan sistemlerdir.

İçerden uygulanan sistemler; uyarlanabilir sistemin ana yapının arkasına yerleştirilmesidir (Şekil 13). Binanın iç kısmında yer alan bu sistemler, dış rüzgâr yüklerinden ve hava koşullarından korunduğu için hasar riski düşüktür ve daha az bakım gerektirmektedir (Barozzi vd., 2016; Zaimen & Laouar, 2020). Dışardan uygulanan gölgeleme sistemlerine kıyasla yazın soğutmaya harcanacak enerji talebini azaltma performansı daha düşüktür. Çünkü, iç güneş kırıcı elemanların, cephenin dışındaki güneş ışınımını filtrelememesi ve bu ışının emilip odaya iletilmesi, iç mekân sıcaklığının artmasına sebep olmaktadır (Barozzi vd., 2016). Tasarımlarda nadiren tercih edilen bir sistemdir. Ayrıca dışarıdan bakıldığında yapının dinamik efektine etkisi genellikle bulunmamaktadır.

Cepheye entegre sistemler; uyarlanabilir sistemin doğrudan zarfın içine entegre edildiği sistemlerdir (Şekil 13). Genellikle çift cidarlı cephelerin katmanları arasına yerleştirilerek uygulanmaktadır. Sistemin toz parçacıklarına karşı korunmasını sağlar ve dışardan uygulanan sistemlere göre bakım maliyeti düşüktür (Zaimen & Laouar, 2020). Yapının dinamik efektine etkisi, dışardan uygulanan sistemlere göre düşüktür.

Dışardan uygulanan sistemler; uyarlanabilir sistemin binanın dış kabuğunun önüne yerleştirilmesidir (Şekil 13). İç mekânı güneşin zararlı etkilerinden korumak için etkili bir çözümdür. Fakat binanın dışında yer alması sebebiyle, daha fazla dış ortam koşullarına maruz kalmaktadır. Bu durum, sistemin bakım maliyetinin artmasına ve kullanım ömrünün kısılmasına sebep olmaktadır (Zaimen & Laouar, 2020). Dışardan uygulanan sistemler, istenmeyen ısı kazancını önleme bakımından en verimli ve özellikle yüksek katlı binaların uyarlanabilir cephelerinde en çok tercih edilen çözümdür. Ayrıca yenilikçi ve benzersiz dinamik cephe tasarımına imkân sağlaması bakımından cephede enerji tasarrufu sağlayan sistemlerden ziyade mimari bir simgeyi temsil etmektedir (Barozzi vd., 2016). Bu nedenle, dışardan uygulanan sistemler hem sürdürülebilir fayda hem de tasarımsal etki bakımından diğer uygulamalara oranla daha çok ön plana çıkmaktadır.



Şekil 13. Uyarlanabilir sistemin yapıdaki konumu; (a) içerde, (b) ciltte, (c) dışarda (Kaynak: Zaimen, Laouar, 2020)

Uyarlanabilir cephelerden istenen verimi alabilmek için doğru tasarım kararlarının alınması ve doğru sistemlerin seçilmesi önemlidir. Yapılacak tercihlerin artı ve eksileri mevcuttur. Uyarlanabilir cepheye sahip binaların konumu, bölgenin iklimi ve bunlardan kaynaklı oluşabilecek riskler iyi analiz edildiğinde dezavantajların etkisini azaltmak mümkündür. Çalışma kapsamında; incelenen uyarlanabilir cephe sistemlerinin ve yapıdaki konumlandırılmasının avantaj ve dezavantajları değerlendirilerek Şekil 14 hazırlanmıştır.

UYARLANABİLİR CEPHELER		AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
Gölgeleme Sistemleri	Kinematik Yaklaşımlar	- Daha geniş perspektifte hareket kabiliyeti ile gölgeleme sağlama	- Monteşeli sistem olması nedeniyle sık bakım gerektirmesi
	Elastik Kinetik Yaklaşımlar	- Karmaşık mekanik sistemlere ihtiyaç duymaması - Sık bakım gerektirmemesi	- Hareket kabiliyetinin kısıtlı olması
Kontrol Sistemleri	Dışsal Kontrol Sistemleri (Sensörler, aktüatörler vs.)	- Kontrolün hızlı ve ayarlanabilir şekilde gerçekleşmesinin kolay adaptasyon yeteneği sağlama	- Belli bir miktar enerjiye ihtiyaç duyması
	İçsel Kontrol Sistemleri (Akıllı malzemeler)	- Harekete geçmek için enerjiye ihtiyaç duymaması	- Çalışma kapsamındaki şekil hafızalı malzemelerin tasarımda çok fazla uygulama alanı bulamaması
Yapıdaki Konumlandırılması	İçerden Uygulanan	- Harekete geçmek için enerjiye ihtiyaç duymaması	- Yaz aylarında ısı kazanana neden olması
	Cepheye Entegre	- Sık bakım gerektirmemesi	- Yetersiz gölgeleme performansı
	Dışardan Uygulanan	- Sık bakım gerektirmemesi	- Sık bakım gerektirmesi

Şekil 14. Uyarlanabilir cephe tasarımındaki farklı yaklaşımların avantaj ve dezavantajlarının değerlendirilmesi

6. SONUÇ

Teknolojinin gelişmesi ile hareket kabiliyeti, canlılara özgü bir davranış olmaktan çıkıp çeşitli nesnelere uyarlanmıştır. Mimarlık alanına bu durumun, belirli sistemlerin tasarıma entegrasyonu ile dahil olması sonucu kinetik mimarlık kavramı ortaya çıkmıştır. Kinetik mimarlık yapıları, ilgi çekici tasarım yaklaşımları ile estetik değer katarak, onları mimari simge haline getirme fırsatı sunmaktadır. Ayrıca, değişkenlik gösteren çevresel koşullara karşı hızlı adapte olabilen yapılarla sürdürülebilir fayda sağlayabilmektedir. Hızlı adaptasyonun,

binanın geneline etki eden bir hareket ile sağlanması günümüz koşullarında özellikle yüksek katlı bina komplekslerinde pek mümkün görünmemektedir. Bu nedenle tasarımda dinamik bir hareket genellikle yapıların cephelerinde temsil edilmektedir. Sensörler ve aktüatörler yardımıyla hareket özelliği kazandırılan uyarlanabilir cepheler bu mimari yaklaşımın en somut örneklerindedir.

Kinetik mimarlık ve uyarlanabilir cephe kavramlarından her biri kendi başına geniş uygulama alanlarına sahiptir. Bu kavramların sürdürülebilirliğe yaklaşımlarının daha iyi anlaşılması için çalışma, iki kavramın da ortak noktası olan, dinamik hareketi yansıtan tasarım yaklaşımına odaklanmaktadır. Uyarlanabilir cephelerin dinamik hareketi temsil eden pek çok farklı uygulaması mevcut olsa da uygulama çeşidi olarak genellikle gölgeleme sistemleri ile sınırlı kalmıştır. Ayrıca bu sistemleri çalıştırmak için belli bir miktar enerji gerekmekte ve dış etmenlerle fazla temas halinde olduğunda bakım maliyeti artabilmektedir. Bu nedenle uyarlanabilir cephelerin sürdürülebilirliğini arttırmak için dinamik hareket bağlamında uygulama çeşidinin genişletilmesi, sistemi çalıştırmak için gereken enerjinin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmesi ve bakım maliyetinin azaltılması için elastik kinetik yaklaşım ile tasarlanan menteşesiz sistemlerin geliştirilerek kullanılması gerekmektedir.

Uyarlanabilir cepheler, kullanıcı konforu ve enerji verimliliği başta olmak üzere önemli sürdürülebilir katkılar sunmaktadır. Bu katkıları, çeşitli elemanlar, tasarım yaklaşımları ve stratejileri ile sağlamaktadır. Örneğin; kinematik tasarım yaklaşımları ile cephede yer alan güneş kırıcılara kontrol, hareket, katlanabilirlik gibi özellikler kazandırılıp gölgeleme sağlanarak, ısıtma ve soğutma için harcanacak enerjiden tasarruf ve iç mekânda istenmeyen güneş etkisi önlenerek kullanıcı konforu sağlanabilmektedir. Elastik kinetik yaklaşımda benzer etki güneş kırıcıların elastik bükülme deformasyonu ile gerçekleştirilmektedir. Burada elastik kinetik yaklaşım, mekanik olarak karmaşık sistemlere ihtiyaç duymaması, menteşesiz olarak tasarlanması ve bunun sonucunda da daha az bakım gerektirmesi sebebiyle ön plana çıkmaktadır. Uyarlanabilir cephelerin tasarım gerekliliklerini yerine getirebilmesi için sisteme hareket girişi akıllı malzeme özellikleriyle veya sensör, aktüatör ve işlemcilerle olmak üzere iki şekilde sağlanmaktadır. Sensörler, aktüatörler ve işlemcilerin belli bir miktar enerjiye ihtiyaç duyması; çalışma kapsamına giren şekil hafızalı akıllı malzemelerin de mimari yapıların cephelerinde kendine çok fazla uygulama alanı bulamaması dezavantaj oluşturmaktadır. Uyarlanabilir cephelerin sürdürülebilir performansını etkileyen bir diğer önemli konu da yapıdaki konumudur. Yapının iç kısmında yer alan uyarlanabilir cephenin hasar riski düşük olmasına karşın, yaz aylarında ısı kazancına sebep olarak soğutma giderlerini azaltılmasında yetersiz kalabilmektedir. Genellikle çift cidarlı cephelerin katmanları arasına yerleştirilerek yüzeye entegre edilen sistemler ise hasar riski düşük olsada gölgeleme performansı dış kısma yerleştirilen uyarlanabilir cepheler kadar etkili değildir. En sık uygulanan ve en etkili çözüm, uyarlanabilir cephenin yapının dış kısmına yerleştirilmesidir. Bu uygulama, fazla bakım gerektirse bile ısı kazancını önleme ve hareketliliğin cepheye katacağı estetik değer hissedilmesi bakımında en ideal çözümdür.

Uyarlanabilir cepheler, sürdürülebilir mimariye getirdiği etkili çözümler ve dinamik hareketin tasarımsal faydaları sayesinde estetik algının ve sürdürülebilir bir çevrenin önem kazandığı günümüzde, yapay zeka ve akıllı sistemlerin gelişimi ile birlikte mimari tasarımlarda kullanımını her geçen gün artıracakları öngörülmektedir. Sürekli devinim ve gelişim içinde olan dış çevreye karşı, binaların durağanlığıyla meydan okuması yerine buna uyarlanabilir cepheler ile adaptasyon sağlayarak hem çevresel hem de görsel faydalar elde etmesi için tasarımda daha çok yer verilmesi gerekmektedir.

YAZAR KATKILARI

Mehmet Esgil: Çalışma konusunun belirlenmesi, çalışmanın yürütülmesi, makale taslağının hazırlanması, literatür taraması yapılması, verilerin yorumlanması, sonuçlarının tartışılması.
Ruşen Yamacli: Çalışmanın yürütülmesi, makale taslağının hazırlanması, verilerin yorumlanması

FİNANSAL DESTEK BEYANI

Bu çalışma için herhangi bir finansal destek alınmamıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

ETİK KURUL ONAYI

Bu çalışma etik kurul onayı gerektirmemektedir.

KAYNAKLAR

- Aelenei, D., Aelenei, L. ve Vieira, C. P. (2016). Adaptive façade: concept, applications, research questions. *Energy Procedia*, 91, 269-275.
- Aelenei, L. E., Aelenei, D., Romano, R., Mazzucchelli, E. S., Brzezicki, M., & Rico-Martinez, J. M. (2018). Case studies: adaptive facade network. *TU Delft for the COST Action 1403 adaptive facade network*. Delft: TU Delft Open.
- Attia, S., Bilir, S., Safy, T., Struck, C., Loonen, R., & Goia, F. (2018). Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive façade systems. *Energy and Buildings*, 179, 165-182.
- Attia, S., Lioure, R. ve Declaude, Q. (2020). Future trends and main concepts of adaptive facade systems. *Energy Science & Engineering*, 8(9), 3255-3272.
- Barozzi, M., Lienhard, J., Zanelli, A., & Monticelli, C. (2016). The sustainability of adaptive envelopes: developments of kinetic architecture. *Procedia Engineering*, 155, 275-284
- Çakmaklı, C., & Arslan Selçuk, S. (2019). Biyomimetik bakış açısı ile fütüristik mimarlık üzerine bir inceleme: John M. Johansen mimarlığını anlamak. *3rd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies* içinde (ss. 297-303). Ankara: ISAS.
- Çınar, M. Ç., & Yazıcı, Y. E. (2022) Kinetik Mimarlık Uygulamalarının Konut Mekanları Üzerinden Okunması. *AURUM Journal of Engineering Systems and Architecture*, 6(1), 27-44.
- Engin, S. (2022). *Kinetik cephe sistemlerinin yapı performansına günışığı, kamaşma ve enerji performansı üzerindeki etkileri* (Yüksek Lisans Tezi). Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Fouad, S. M. A. E. (2012). *Design methodology: Kinetic architecture* (Yüksek Lisans Tezi) Alexandria University, Faculty of Engineering, Alexandria.
- Habibi, S., Valladares, O. P., ve Peña, D. M. (2022). Sustainability performance by ten representative intelligent façade technologies: a systematic review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102001.
- Haidari, H. (2015). Decisive design aspects for designing a kinetic façade. Eindhoven University of Technology, Eindhoven.
- International Energy Agency (IEA) (2013). *Technology Roadmap - Energy Efficient Building Envelopes*. Paris: IEA Publication.

- Karakoç, E., & Çağdaş, G. (2021). Adaptive architecture based on environmental performance: An advanced intelligent façade (AIF) module. *Gazi University Journal of Science*, 34(3), 630-650.
- Kasaboğlu, E. (2016). *Kinetik mimarlık kavramının örneklerle irdelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi) Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Knippers, J., Scheible, F., Oppe, M., & Jungjohann, H. (2012). Bio-inspired Kinetic GFRP-façade for the Thematic Pavilion of the EXPO 2012 in Yeosu. *International Symposium of Shell and Spatial Structures (IASS 2012)* içinde (ss. 341-347). Madrid: International Association for Shell and Spatial Structures.
- Loonen, R. C. G. M. (2010). *Climate adaptive building shells: what can we simulate?* (Yüksek Lisans Tezi). Eindhoven University of Technology, Faculty of Architecture, Building & Planning, Eindhoven.
- Loonen, R. C., Trčka, M., Cóstola, D., & Hensen, J. L. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and sustainable energy reviews*, 25, 483-493.
- Loonen, R. C., Rico-Martinez, J. M., Favoino, F., Brzezicki, M., Ménézo, C., La Ferla, G., & Aelenei, L. L. (2015). Design for façade adaptability: Towards a unified and systematic characterization. *10th Conference on Advanced Building Skins* içinde (ss. 1284-1294). Bern: Economic Forum.
- Lienhard, J., Schleicher, S., Poppinga, S., Masselter, T., Milwich, M., Speck, T., & Knippers, J. (2011). Flectofin: a hingeless flapping mechanism inspired by nature. *Bioinspiration & biomimetics*, 6(4), 045001.
- Moloney, J. (2011). *Designing kinetics for architectural facades: state change*. Taylor & Francis.
- Orhon, A. V. (2016). Adaptive building shells. Efe, R., Matchavariani, L., Yaldir, A., Lévai, L. (Eds) *Developments in Science and Engineering* içinde (ss.555-567). Sofia: St. Kliment Ohridski University Press.
- Ramzy, N., & Fayed, H. (2011). Kinetic systems in architecture: New approach for environmental control systems and context-sensitive buildings. *Sustainable Cities and Society*, 1(3), 170-177.
- Razaz, Z. E. (2010). Sustainable vision of kinetic architecture. *Journal of Building Appraisal*, 5, 341-356.
- 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.
- Schumacher, M., Vogt, M. M., & Krumme, L. A. C. (2019). *New MOVE: Architecture in Motion-New Dynamic Components and Elements*. Basel: Birkhäuser.
- Schleicher, S., Lienhard, J., Poppinga, S., Speck, T., & Knippers, J. (2015). A methodology for transferring principles of plant movements to elastic systems in architecture. *Computer-Aided Design*, 60, 105-117.
- Stankovic, D., Tanic, M., & Cvetanovic, A. (2019). The impact of intelligent systems on architectural aesthetics. *E3S Web of Conferences* içinde içinde (s. 01044). EDP Sciences.
- Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., & Tsangrassoulis, A. (2021). Design approaches and typologies of adaptive facades: A review. *Automation in Construction*, 121, 103450.
- Yaman, M. (2021). Different facade types and building integration in energy efficient building design strategies. *International Journal of Built Environment and Sustainability*, 8(2), 49-61.
- Yaşa, A. 2010. *Mimari Kinetik Sistemler ve Performansa dayalı Tasarım Önerileri* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Zaimen, M., & Laouar, D. E. (2020). *L'effet de la façade adaptative sur le confort thermique intérieur dans les équipements publics en Algérie* (Doktora Tezi). Université de Jijel, Faculté des Sciences et de la Technologie, Jijel.
- Zuk, W. ve Clark, R.H. (1970). *Kinetic Architecture*, New York: Van Nostrand Reinhold Company.
- (URL-1) <https://architizer.com/projects/al-bahr-towers/> [Fotoğraf] [Erişim Tarihi: 10.11.2023]
- (URL-2) <https://inhabitat.com/exclusive-photos-worlds-largest-computerized-facade-cools-aedas-al-bahr-towers/> [Fotoğraf] [Erişim Tarihi: 10.11.2023]
- (URL-3) <https://www.arup.com/projects/al-bahr-towers> [Fotoğraf] [Erişim Tarihi: 10.11.2023]
- (URL-4) <https://www.archdaily.com/326747/q1-thyssenkrupp-quarter-essen-jswd-architekten-chaix-morel-et-associes> [Fotoğraf] [Erişim Tarihi: 29.10.2023]
- (URL-5) <https://architectuul.com/architecture/cooled-conservatories-gardens-by-the-bay> [Fotoğraf] [Erişim Tarihi: 31.10.2023]
- (URL6) <https://www.architecturalrecord.com/ext/resources/archives/tech/techFeatures/2013/images/05/Dynamic-facades-9.jpg> [Fotoğraf] [Erişim Tarihi: 31.10.2023]
- (URL-7) <https://archello.com/project/kiefer-technic-showroom> [Fotoğraf] [Erişim Tarihi: 10.11.2023]
- (URL-8) https://soma-architecture.com/index.php?page=theme_pavilion&parent=2# [Fotoğraf] [Erişim Tarihi: 01.11.2023]
- (URL-9) <https://www.archdaily.com/424911/hygroskin-meteorosensitive-pavilion-achim-menges-architect-in-collaboration-with-oliver-david-krieg-and-steffen-reichert> [Fotoğraf] [Erişim Tarihi: 02.11.2023]



Copyright: © 2024 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/>).