

## Kinetik Cephe Sistemlerinin Performansa Dayalı Tasarımı ve Tasarım Süreci

### Performance-Based Design and Design Process of Kinetic Facade Systems

Ahmet Necip BELEK<sup>1\*</sup>, Ruşen YAMAÇLI<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Eskişehir Teknik Üniversite, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye

<sup>2</sup> Eskişehir Teknik Üniversite, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Eskişehir, Türkiye

#### ÖZET

Uyarlanabilir olma fonksiyonu sayesinde dış çevreyle ve/veya iç mekandaki kullanıcılarla etkileşime girip cephede günışığına bağlı yüksek performans ve binanın yaşam döngüsü boyunca enerji etkinliği sağlayarak kullanıcıların konforunu arttıran kinetik cephe sistemleri, güneş kırıcı bir kabuk olarak verimli ve efektif çözümler sunmaktadır. Kinetik cepheyi oluşturan güneş kırıcı bileşenlerin optimum uyarlanabilirlik performansını göstermesi, bu cephelerin tasarımına ve tasarım sürecine bağlıdır. Bu bağlamda, kinetik cephenin morfolojik (fiziksel-biçimsel) yapısının modellenip kinetik dönüşümü tasarımının yapıldığı, fonksiyonel özelliklerinin belirlendiği ve performans analizlerinin gerçekleştirildiği tasarım sürecinde; benimsenen tasarım yaklaşımları, kullanılan tasarım sistemleri ve bu sistemlerin gerektirdiği araç, yöntem ve tekniklerin bir araya gelerek oluşturduğu tasarım prosedürleri önem kazanmaktadır. Çalışma kapsamında, kinetik cephe sistemlerinin performansa dayalı tasarımı ile tasarım sürecinin ilişkisini ortaya koymak amaçlanmıştır. Bu amaçla önce literatür taraması, sonrasında belirlenen kinetik cephe tasarım örneklerinin karşılaştırmalı analizi ve değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışmanın sonuç bölümünde, elde edilen bulgulardan yola çıkarak performansa dayalı optimum kinetik cephe tasarımı ve tasarım sürecine dair genel tespitler yapılmış ve literatürdeki bu sistemlerin tasarımına ilişkin çalışmaların eksikliğinden bahsedilip bu alandaki tasarım yöntem ve yaklaşımlarının artırılıp geliştirilmesi gerektiği önerilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kinetik Cephe Tasarımı, Kinetik Cephe Tasarım Süreci, Parametrik ve Algoritmik Tasarım, Performansa Dayalı Tasarım, Cephe Tasarımı Optimizasyonu

#### ABSTRACT

Kinetic facade systems, which increase the comfort of the occupants by interacting with the external environment and/or occupants interior space thanks to their adaptability function, and providing high daylight performance on the facade and energy efficiency throughout the life cycle of the building, offer efficient and effective solutions, as a sunshade shell. The optimum adaptability performance of the sunshade components that form the kinetic facade depends on the design and design process of these facades. In this context, in the design process where the morphological (physical-formal) structure of the kinetic facade is modeled and its kinetic transformation is designed, its functional properties are determined and performance analyzes have happened; The design approaches adopted, the design systems used and the design procedures created by the tools, methods, and techniques required by these systems gain importance. Within the scope of the study, it is aimed to reveal the relationship between the performance-based design of kinetic facade systems and the design process. For this purpose, comparative analysis and evaluation of the kinetic facade design samples were determined after the literature review has been done. In the conclusion section of the study, general determinations were made about performance-based optimum kinetic facade design and design process based on the findings, and the lack of studies on the design of these systems in the literature was mentioned and it was suggested that design methods and approaches in this field should be increased and developed.

**Keywords:** Kinetic Facade Design, Kinetic Facade Design Process, Parametric And Algorithmic Design, Performance-Based Design, Facade Design Optimization

Başvuru: 12.05.2023 Revizyon Talebi: 20.09.2023 Son Revizyon: 24.11.2023 Kabul: 28.11.2023

Doi: 10.51764/smutgd.1296435

1\*Sorumlu yazar; E-mail: ahmetnecipbelek@gmail.com; ORCID: 0000-0001-8670-5682

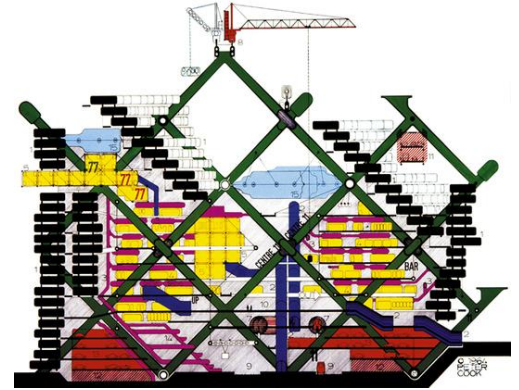
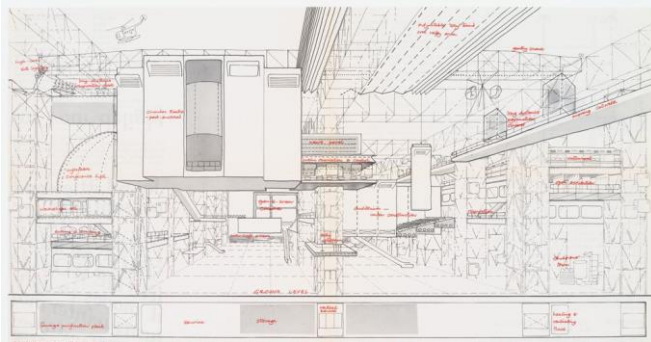
2 E-mail: ryamacli@eskisehir.edu.tr; ORCID: 0000-0001-9659-9246

## 1. GİRİŞ

Kinetik mimarlık, mimarının statik bir yapıdan dinamik bir yapıya dönüşmesidir. Kinetik mimarının genel tanımını Fox ve Yeh (1999), şu şekilde yapmaktadır: “Kinetik mimariyi, değişken konum, hareketlilik ve/veya geometriye sahip binalar veya bina bileşenleri olarak tanımlarız.”. Bu tanımlamadan hareketle bir binadaki kinetiklik özelliğinin binanın tamamında olmak zorunda olmadığı; bu binanın herhangi bir bölümünde de kinetikliğin olabileceği anlaşılmaktadır.

Mimaride hareket edebilen sistemlerin ve mimari elemanların kullanımı yüzyıllara dayanmaktadır. Tarihsel süreçte erken örnekleri antik dönemdeki katlanabilir, taşınabilir göçebe barınakları sayılabilir. İlerleyen dönemlerde ise yapım tekniği, yöntemi ve teknolojinin gelişmesiyle beraber; menteşeli, sürgülü kapı, pencere ve hareketli güneş kırıcı sistemler binalarda kullanılmaya başlanmış daha sonraları da taşınabilir çağdaş konutlar ve katlanır köprüler gibi yapılar inşa edilmiştir (Stevenson, 2011; Ramzy, Fayed, 2011). Kinetik sistemler zamanla manuel, mekanik, elektronik ve akıllı sistemler olarak gelişim göstermiştir (Ramzy, Fayed, 2011). Kinetik mimarlığın tanımına giren uygulanmış örneklerin dışında, kinetik mimarlığa dair akademik araştırmaların temelleri de ilk kez 20. yüzyılda atılmıştır. Bu dönemdeki modernist mimarlar öncelikle kinetik mimarlığın teorik çerçevesini ortaya koymuştur.

20. yüzyılın modern mimarlık döneminden sonra, “sürekli olarak üretilebilen ve yenilenebilen” mimarlık konsepti sorgulanmaya başlanmıştır. Cedric Price’ın 1961’de tasarladığı Fun Palace (Şekil 1), bu konsepti ortaya koyan deneysel bir çalışmadır. Daha sonra dönemin avangard bir mimarlık grubu olan Archigram tarafından 1967’de ortaya konan Plug-in Şehri (Şekil 2) konsepti kinetik mimarının önünü açmıştır. Bu konsept ile kullanıcının istek ve gereksinimlerindeki değişikliklere göre uyarlanabilen mekanlar ortaya konmuştur (Alotaibi F. 2015; Megahed, 2017). Kinetik mimari kavramı ilk kez 1970 yılında William Zuk ve Roger H. Clark’ın Kinetik Mimarlık adlı kitabında tanıtılmıştır. Elmokadem ve diğer yazarların aktardığına göre (2018), Zuk ve Clark kitaplarında kinetik mimarlığı: “Bir mimarının, kendisine etki eden bir dizi baskı içinde meydana gelen değişikliklere ve bu baskıların yorumlanması ve uygulanması için araç sağlayan teknolojiye uyum sağlaması.” şeklinde tanımlamışlardır.



**Şekil 1.** Fun Palace Konsept Çizimi / Cedric Price (URL 1) **Şekil 2.** Plug-in Şehri Konsept Çizimi / Peter Cook (URL 2)

1970’lerden sonra bilgisayar ve telekomünikasyon teknolojisinin gelişmesiyle, kendi bileşenlerini kontrol edebilen, “akıllı” bina teknolojisinin temelleri olan projeler üretilmiştir. 1970’lerin sonunda kişisel bilgisayarların tanıtılmasıyla mimarlık alanında da önemli adımlar atılmış olup 1987’de Jean Nouvel, kinetik mimarının önemli bir örneği olan Paris’teki Institut du Monde Arabe binasını tanıtmıştır (Elmokadem, vd. 2018.). Binanın geleneksel Arap “Mashrabiya” motifinin geometrisi kullanılmış güney cephesindeki kinetik ekranları, günışığı miktarına bağlı olarak mekana alınan doğal ışığı kontrol etmektedir (URL-3). Bu yapıdaki cephe tasarımı, uyarlanabilir kinetik cephe sistemi olarak uygulanmış en erken örnek sayılmaktadır.

Kinetik cepheler, bileşenlerinde geçici olarak biçim, konum veya yön değişikliği yaparak iç mekana alınan günışığını, kullanıcıların konfor taleplerine ve dış çevredeki iklim koşullarına göre otomatik veya kullanıcı etkileşimli olarak ayarlayabilen gelişmiş güneş kırıcı sistemlerdir. Kinetik cepheler, mekanik ve elektronik sistemlerin oluşturduğu sensör, aktüatör ve kontrol mantığı gibi teknolojilerle dışsal bir kontrol mekanizması ile; veya bu donanımlara ihtiyaç duyulmadan, kinetik bileşenlerini oluşturan akıllı malzemelerin içinde barındırdığı gelişmiş özellikler ve fonksiyonlar sayesinde içsel bir kontrol mekanizması ile yönetilmektedir (Alkhatib, vd. 2021; Albag, vd. 2020). Yapılan kapsamlı literatür araştırması sonucunda, uygulanmış olan veya henüz uygulanmamış olup tasarım önerisi olarak geliştirilmiş kinetik cephelerin, barındırdıkları farklı teknolojik donanım, sistem, malzeme veya tasarımlarında benimsenen farklı yaklaşımlar ve stratejilere göre çeşitlendiği görülmüştür.

Kinetik cephe sistemlerinin tasarımında, günümüz dijital teknolojisinin sunduğu çeşitli parametrik ve algoritmik yazılımlardan faydalanılmaktadır. Tepki verebilen kinetik cephe sistemlerinin tasarımı, bu yazılımlar sayesinde tasarımcıların kontrolünde otomatik ve hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Parametrik modelleme araçlarının, bu araçlarla senkronize ve entegre çalışan çeşitli simülasyon ve analiz araçlarıyla birlikte etkin kullanımı ile tasarımda çoklu varyasyonların üretilip bu varyasyonların hedeflenen günışığı performansı ve enerji etkinliği gibi sürdürülebilirlik kriterlerinin parametrelerine göre simülasyonlarla test edilmesi ve test çıktılarındaki optimum değerleri sağlayacak şekilde model üzerinde konfigürasyonların yapılması, kinetik cephelerin tasarım ve optimizasyon sürecini ifade etmektedir. Optimizasyonu yapılarak tasarım süreci tamamlanan kinetik cephelerin performansının, uygulanacağı mekanın veya binanın iç ve dış çevre parametrelerine göre önceden etüt edilmesi sayesinde, günışığını kinetik uyarlanabilir sistemi ile filtreleyerek iç mekana aktaran ve bu şekilde kullanıcıların termal ve görsel konforunu arttırarak enerji verimliliğine katkıda bulunan optimum uyarlanabilir kinetik mekanizma ve morfolojik tasarıma sahip tasarımlar elde edilmektedir.

Bu çalışma kapsamında öncelikle kinetik mimari sistemler, bu sistemlerin özellikleri ve içerdiği sistem katmanları hakkında bilgi verilmiş ve 8 uygulanmış kinetik cephe örneği bu bağlamda analiz edilmiştir. Buna göre, 2. bölümde kinetik cephe sistemlerinin sahip olduğu genel fonksiyonlar, kontrol mekanizmaları ve stratejileri ortaya konmuş olup kinetik cephe teknolojileri ve sistemleri örnekler üzerinden analiz edilerek aktarılmıştır. 3. ve 4. bölümlerde ise sırasıyla kinetik cephe sistemlerinin Yapı Bilgi Modelleme (BIM) ortamındaki tasarımı ve tasarım süreçleri; tasarımda kullanılan araçlar, yöntemler, teknikler ve benimsenen yaklaşımların oluşturduğu prosedürler irdelenerek daha sonra da kinetik cephe tasarım yaklaşımı olarak üretken tasarım sistemleri sınıflandırılarak aktarılmıştır. Çalışmanın son bölümünde, literatürden seçilmiş 8 tanesi kinetik 2 tanesi ise statik parametrik cephe örneği olan toplam 10 örnek, tasarım süreci çerçevesinde analiz edilip değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonuç bölümünde ise, yapılan araştırmalar ve analizlerden elde edilen bulgularla kinetik cephenin performansa dayalı tasarımı ve tasarım sürecine ilişkin sonuçlar çıkartılarak tespitler yapılmış ve bu tespitlerden de hareketle konu ile ilgili genel bir değerlendirmede ve önerilerde bulunulmuştur.

## 2. KİNETİK CEPHE SİSTEMLERİ

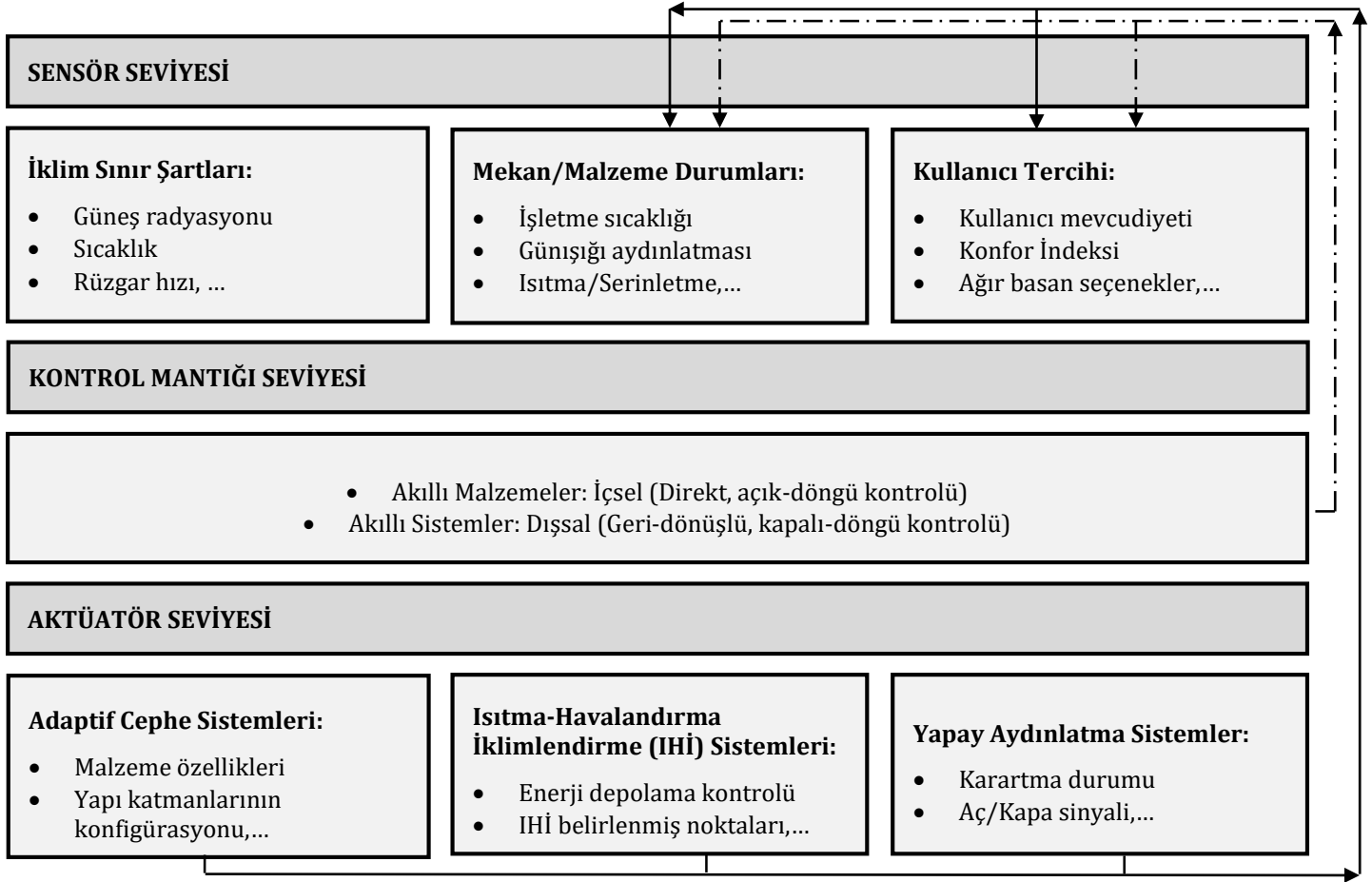
20. yüzyıldaki kinetik mimari üzerine yapılan ütöpic ve deneysel çalışmalar sonrasında yaşanan elektronik ve dijital teknolojiadaki gelişim, mimarların tasarımlarında kinetik sistemleri kullanmasının önünü açmıştır. Kinetik mimarlık, gelişen malzeme-robotik, bilgisayar ve yapım teknolojisi sayesinde; konut, ticari, sanayi, eğitim, sağlık ve askeri olmak üzere farklı tipteki mimari tasarımlara, farklı form ve sistemde entegre edilerek geniş uygulama alanı kazanmıştır (Megahed, 2017). Postmodernist mimarlık, kullanıcı-uzay-bağlam arayüzlerinde alışılmışın dışında idealler getirmiş ve bu da değişikliklere tepki vermek için geri bildirim kullanabilen duyarlı mimarinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Geri bildirim modelleri, doğrudan insan manipülasyonundan, gelişmiş bilgisayar teknolojisinin entegrasyonu ile desteklenen tam otomasyona kadar değişmektedir (Stevenson, 2011). Uzaktan kontrol sistemlerini ve ileri seviye karar verme mekanizmalarını içeren "yapay zeka" entegrasyonu ile mimarlıkta, biyomekanik sistemlerden çevresel koşullara göre uyarlanabilir cephe sistemlerine kadar geniş spektrumda uygulamalar yapılmıştır.

Kinetik mimari, bir yapıda strüktürel, mekânsal ve cephe veya kabuk sistemleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Çağdaş yöntem ve yaklaşımlarla inşa edilmiş kinetik cephe örneklerinde; manuel, doğal (yani güneş veya rüzgar enerjisi), biyolojik, mekanik, kimyasal, pnömatik, elektrik, manyetik ve bilgisayar donanımlı olmak üzere çeşitli sistemler bulunur. Bilgisayar sistemleri bilgi toplamak, işlemek, yapının davranışını kontrol etmek ve iç konfor koşullarını düzenlemek için bu cephelerde etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Stevenson, 2011). Kinetik cephe sistemlerinin cephe kabuğunu oluşturan dinamik bileşenleri, uzayda bir hareket yaratmak için geometrik veya pozisyonel olarak dönüşüme uğrar. İklima ve kullanıcı gereksinimlerine göre uyarlanabilir kinetik cephe sistemleri, aynı anda bir dizi parametreye yanıt verebilmek için özelliklerini ayarlayabilmeleri açısından geleneksel cephe sistemlerinden ayrılmaktadır (Tabadkani, vd. 2019; Sadegh, vd. 2022). Gelişmiş teknolojilerle üretilen modüler, dinamik ve adaptif özellikteki kinetik cephe sistemlerinin zamanla cephe konfigürasyonlarında meydana gelen değişimle; kışın ısıtma, yazın gölgelendirme ve doğal havalandırma, akustik yalıtım, gün ışığını parlamayacak şekilde iç mekana aktarma, görsel konfor, yapay ışığı azaltma ve elektrik üretme gibi fonksiyonlar gerçekleştirilerek binada oturanlar için iç mekan konforunu en üst düzeye çıkarmak ve iç-dış ortamlar arasındaki etkileşimleri verimli bir şekilde yönetmek hedeflenir (Tabadkani, vd. 2019; Hosseini, vd. 2019). Bu tasarım hedeflerinin gerçekleşmesi; kinetik cephe sisteminin tasarımına, barındırdığı donanım tipine ve özelliklerine, kontrol mekanizmalarına ve malzeme tipine ve özelliklerine bağlıdır.

### 2.1 Kinetik Cephe Sistemlerinin Kontrol Mekanizmaları ve Stratejileri

Kinetik cephe sistemlerindeki kontrol mekanizmaları ve otomatik ve/veya kullanıcı odaklı operasyonel stratejiler, performans açısından etkin cephe sistemlerinin elde edilmesini sağlamaktadır (Loonen, vd. 2017). Bu kontrol

sistemleri, içerisindeki sensör-kontrol yapay zekası ve aktüatörlerle bir mekanizma oluşturarak çevreden alınan girdileri işleyip cephe bileşenlerinde uyarlanabilir hareketi gerçekleştirecek çıktılara dönüştürür (Elkhatay, 2014; Loonen vd. 2017). Şekil hafızalı veya diğer akıllı malzemelerin oluşturduğu kinetik cephelerde, herhangi bir mekanik, elektronik sisteme ve dışarıdan sağlanacak bir enerjiye ihtiyaç duyulmadan, malzemenin kendi gelişmiş özelliğinden kaynaklı olarak algılama ve çalıştırma süreçleri işletilebilmektedir (Formentini, Lenci, 2018). Aşağıdaki diyagram (Şekil 3), kinetik cephe sistemlerinin algı-çalışma süreçlerindeki işleyiş mekanizmasını, katmanlarını ve katmanlar arasındaki ilişkileri göstermektedir.



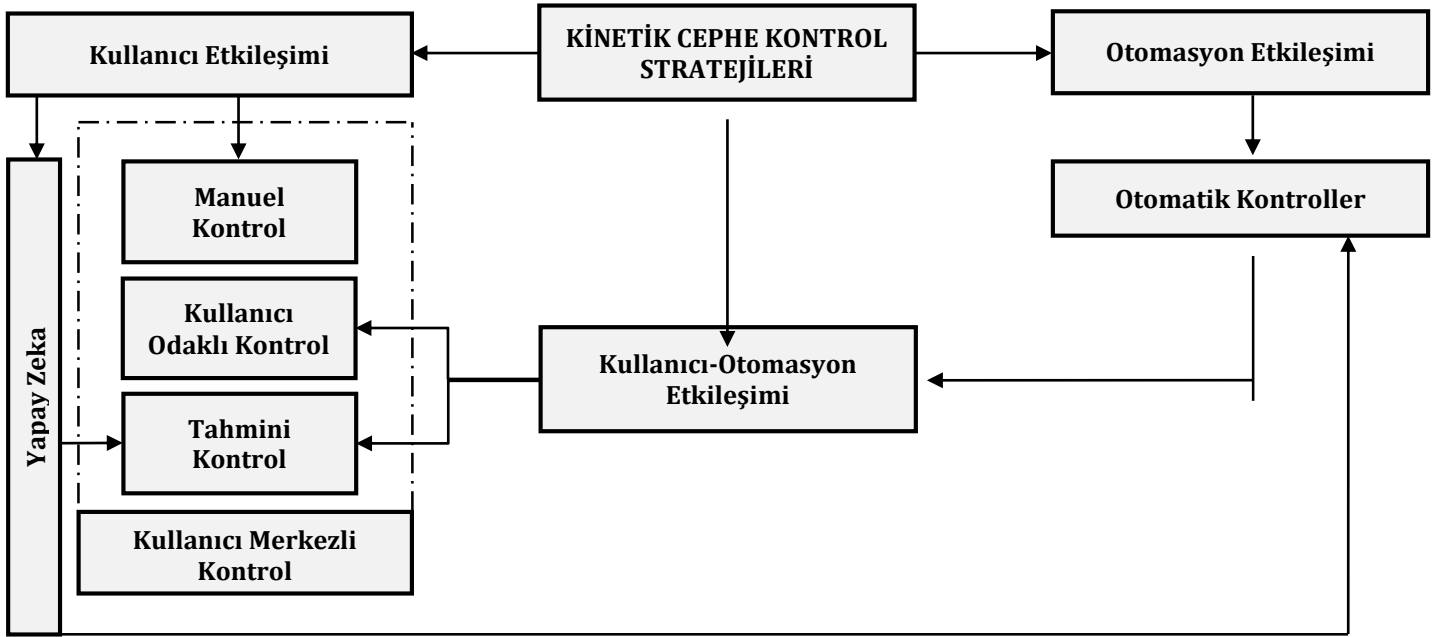
**Şekil 3.** Kinetik Cephe ve Bina Hizmet Sistemlerindeki Kontrol Mekanizması İlişkisel Diyagramı (Loonen, vd. 2017. s.209'dan Uyarlanmıştır)

Diyagramda gösterildiği gibi sensörler, işlemciler ve aktüatörlerden oluşan bir kontrol yönetim sistemi, kinetik cephe sistemlerinin uyarlanabilirliği sağlayan mekanizmasındaki algılanan değişkenler ile aktüatör eylemleri arasındaki bağlantıyı belirli bir kontrol mantığı aracılığıyla gerçekleştirmektedir. Adaptif cephelerdeki kontrol sistemleri dışsal (aktif) ve içsel (pasif) sistemler olmak üzere iki gruba ayrılabilir (Loonen, vd. 2017; Alkhatib, vd. 2021; Albag, vd. 2020). Dışsal (geri dönüslü-kapalı döngü) kontrol; otomatik düzenlemeye dayanan ve sensörler, işlemciler, aktüatörler ve kontrol mantığından oluşan sistemlerdir. Farklı koşullara, bu koşullar tasarım aşamasında beklenmiyor olsa bile, tepki verip binadaki farklı sistemlerle reaksiyona girebilir. İçsel (doğrudan-açık döngü) kontrol ise; cepheyi oluşturan malzemenin kendini ayarlama davranışı sayesinde harici karar verme girdileri olmadan çevresel koşullardan karar alıp, daha az enerjiye ve kontrol yönetim donanımına ihtiyaç duyarak hemen harekete geçebilir (Alkhatib, vd. 2021; Albag, vd. 2020). Gölgeleme cihazlarının hareketini belirleyen kullanıcı talepleri ve iklim koşullarına göre güneşiği alma, görsel konfor, fazla güneşiği kazancını engelleme gibi kontrol stratejileri, elektronik ve akıllı malzeme teknolojisinin sunduğu imkanlar ile bu içsel veya dışsal kontrol sistemleri aracılığıyla gerçekleşmektedir.

Otomatik ve/veya kullanıcı merkezli stratejileri barındıran kontrol sistemleriyle yönetilen kinetik gölgeleme cihazlarının kontrol sistemlerinde bulunan yazılımlar, programlar, internet, akıllı malzemeler ve algılama ekipmanları sayesinde iç ve dış çevre koşulları, hesaplamalı algoritmalar gibi etkileşim yolları aracılığıyla öğrenilir ve cephenin anlık olarak bu koşullara optimum tepkiyi vermesi sağlanır (Samir, Shahin, 2018.; Sherbini ve Krawczyk, 2004.; Tabadkani, vd. 2021.). Otomatik kontrol sistemlerinde gölgeleme cihazları; parlamayı ve doğrudan güneşiği varlığında tutarlı güneşiği performansını sağlamak ve kullanıcı tercihlerini hesaba katmadan aydınlatma yüklerini azaltmak için güneşiğinin durumuna göre otomatik olarak ayarlanabilmektedir. Kullanıcı



merkezli kontrol sistemlerinde ise gölgeleme cihazları; manzara, görsel mahremiyet, gün ışığı algısı ve gölgelendirme estetiğine bağlı olarak kullanıcıların bireysel tercihlerine göre manuel bir şekilde kullanıcılar tarafından kontrol edilebilmektedir (Tabadkani, vd. 2021.). Tabadkani ve diğer yazarların (2021) araştırmalarında elde ettiği bulgulara göre, otomatik ve kullanıcı etkileşimli kontrol stratejilerinin kombinasyonu olarak kullanıcıların, yapay zekaya dayalı veya otomatik olarak kontrol edebildiği gelişmiş sistemler de mevcuttur. Aşağıdaki diyagram (Şekil 4), kinetik cephe kontrol stratejilerini gösteren araştırma çerçevesini sunmaktadır.



Şekil 4. Kinetik Cephe Sistemlerinin Kontrol Stratejileri İlişkisel Diyagramı (Tabadkani, vd. 2021. s.2'den Uyarlanmıştır)

Diyagramda görüldüğü gibi kinetik cephelerin kontrol stratejileri için kullanıcı ve otomasyon etkileşimi olmak üzere temelde iki farklı yaklaşım söz konusudur. Bu iki yaklaşımın alt stratejileri birbiriyle ilişkilenebilir olup yapay zeka teknolojisinin entegrasyonu ile optimum kullanıcı konforunu sağlamak için kinetik cephelerin tasarımında iki yaklaşımın kombinasyonu kontrol sistemleri geliştirilmektedir. Kinetik cephe sistemlerinin bünyesinde barındırdığı uyarlanabilirliği sağlayan katmanları olan: gerçek zamanlı çalışan otomatik ve/veya kullanıcı merkezli kontrol sistemi ve gelişmiş malzeme ve robotik teknolojisinin birbiriyle entegre çalışan sistemi sayesinde genişliği performansı, enerji etkinliği ve kullanıcı konforu optimizasyonu sağlamaktadır.

## 2.2 Kinetik Cephe Tasarımı, Teknolojileri ve Örnek Kinetik Cephe Sistemleri

Dışsal mekanik ve/veya elektronik kontrol ve aktif sistemlerin olduğu kinetik cephelere karşılık; içsel kontrol ve pasif sistemlerin olduğu, uyarlanabilir performansın malzeme davranışıyla gerçekleştiği, şekil hafızalı ve akıllı malzemeleri içeren cepheler de vardır. Bu cepheler, özelliklerinden birini veya birkaçını (kimyasal, mekanik, elektrik, manyetik veya termal) değiştirerek çevresel uyaranlara tepki verir. Değişikliklerin doğrudan ve geri dönüşümlü olması ve sistemi etkinleştirmek için harici bir enerji kaynağının gerekmemesi dolayısıyla şekil hafızalı malzemeler, kinetik cephe sistemlerinde tercih edilebilir bir seçenektir. Bu çalışmanın odaklandığı alan olan yeni nesil kinetik cephelerin, rijit ve esnek bileşenlerinin uyum içinde çalışmasını sağlayan sistemlerinde; uyarlanabilirlik ilkelerine göre tasarlanmış biçim veya özellik açısından geri beslemeli olarak değişime uğrayan malzemeler, gelişmiş yapay zeka ve robotik teknolojisi, akıllı-otonom kontrol sistemleri; kontrol sistemini oluşturan sensör ve aktüatörler veya gelişmiş kontrol sistemi ve teknolojilere ihtiyaç duymadan doğal enerji kaynaklarını kullanarak cephede uyarlanabilme fonksiyonu sağlayan pasif uygulama teknolojileri gibi katmanlar bulunmaktadır. Aşağıdaki tabloda (Tablo 2) analiz edilmek üzere; elektro-mekanik, pasif, bilgi ve gelişmiş malzeme sistemleri olmak üzere farklı teknolojilerin kullanıldığı ve merkezi, merkezi olmayan, malzemeye dayalı kontrol sistemi ve pasif olup kontrol sistemi bulundurmayan olmak üzere farklı sistemlerde, her sistem için 2'şer olup toplam 8 kinetik cephe örneği seçilmiştir. Aşağıdaki maddelerde, bu örnek kinetik cephe sistemlerinin; içerdiği teknolojiler, tasarım özellikleri ve fonksiyonları bakımından karşılaştırmalı olarak analizi yapılmıştır.



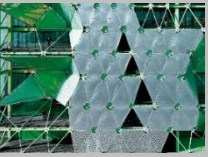
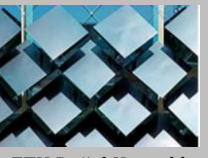




- 1. ve 2. örnekler elektro-mekanik teknolojiye sahip olup bu teknoloji; parçaların standardizasyonu, modüler tasarım bileşenleri, ucuz başlangıç maliyeti ve merkezi izleme ve kontrol gibi avantajlara sahiptir. Bu teknolojinin dejavantajları ise; yüksek bakım ve onarım maliyetleri, sınırlı bileşen dayanıklılığı, yüksek enerji tüketimi ve tek aktüatöre bağlı değiştirilemeyen kontrol olarak sıralanmaktadır. Dışsal kontrol sınıfına giren merkezi kontrol sisteminde; sensörler, aktüatörler ve kontrol işlemcisi birden fazla çevre koşulunu yerel olarak

kontrol etmek için entegre edilerek cephelerin, çevre şartlarına cevap verebilen bir denetleyici kontrol ünitesi tarafından kontrol edilmesi sağlanmaktadır (Matin ve Eydgahi, 2022). 2. örneğin tasarımında benimsenen üretken tasarım sistemleri farklı olup; 1. örnekte kural tabanlı tasarım sisteminin alt sınıfı olan biçim grameri diğerinde ise evrimsel tabanlı tasarım sisteminin alt sınıfı olan genetik algoritmalara dayalı tasarım sistemi kullanılarak kinetik cephe tasarımı ortaya konmuştur. Üretken tasarım sistemleri, 3. ve 4. başlık altında detaylıca açıklanarak aktarılmıştır. 1. örnekteki kinetik cephe sisteminde, güneşin izlediği yolu takip eden otomatik kontrol sistemi ile; akşamları tüm yüzeyler kapanmakta, gündüzleri ise güneşin binanın etrafındaki konumuna bağlı olarak tüm yüzeyler hareket etmektedir (Alkhayat, 2013). Bu şekilde binada parlamayı azaltma, güneş koruması ve enerji korunumu gibi fonksiyonlar gerçekleştirilmektedir. 2. örnekte ise cephe modüllerinde bulunan aktüatörler, karmaşık elastik deformasyon oluşturmak için sıkıştırma kuvvetleriyle panelleri hareket ettirerek gündüzleri doğal ışığın mekana alınmasını sağlayarak parlamayı azaltma, güneş koruması ve enerji korunumu gibi fonksiyonları gerçekleştirmekte, geceleri ise ışıklandırma aracılığıyla görsel olarak estetik bir etki yaratmaktadır (Knippers, vd. 2012).

- 3. ve 4. örnekler bilgi teknolojisine sahip olup bu teknoloji, cephedeki birbirine bağlı panellerin mikrodenetleyiciler tarafından kontrol edilmesini sağlamakta ve yerel sensörler, aktüatörler tarafından yürütülen uygulamalar için işleme ve kodlama amacıyla bu mikro denetleyicilere veri sağlamaktadır (Matin ve Eydgahi, 2022). Merkezi olmayan kontrol sistemiyle yönetilen bu örneklerde kinetik cepheyi oluşturan her bir eleman; küçük, daha az maliyetli ve daha az güçlü bir bilgisayar veya mikro-işlemci olan tek bir denetleyici tarafından aktive ve kontrol edilmektedir (Yekutieli ve Grobman 2014). 3. örnekteki cephe modüllerini oluşturan ETFE hava yastıkları, güneş ısısını ve ışığını algılamak için sensörlerle donatılmış olup bu sensörlerin günışığına bağlı tepkisi, cephe modüllerinde şişirme ve sönme gibi değişim oluşturarak cephe görünümünü de etkileyip bina için güneş koruması ve enerji etkinliği sağlamaktadır (Matin ve Eydgahi, 2022; Elkhayat, 2014). 4. örnekte ise, fotovoltaik panelli kinetik cephe modüllerinin dinamik dönüşümü sayesinde; gölgeleme, günışığı dağıtımı ve bina için elektrik enerjisi üretimi gibi fonksiyonlar gerçekleştirilerek binada enerji etkinliği ve günışığına bağlı kullanıcı konforu arttırılmaktadır (Nagy, vd. 2016).
- 5. ve 6. örnekler malzemeye dayalı teknolojiye sahip olup bu teknoloji, mekanik ve elektro-mekanik sistemlere ihtiyaç duyulmadan malzeme bazlı aktüatörlerle kinetik sistemin yönetilmesine dayanmaktadır. Bu aktüatörler; ışık ve sıcaklık değişimleri, kimyasal maddeler, manyetik alan kuvvetleri ve elektrik akışları gibi dış sinyallerle uyarılarak malzemedeki moleküler değişikliğe dayalı olarak çalışmaktadırlar. Bu sistemlerde sensörler, aktüatörler ve kontrol sistemleri bir malzemede birleşerek harici enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmamaktadır (Matin ve Eydgahi, 2022). Şekil hafızalı malzemeler başta olmak üzere pek çok akıllı malzemelere ve faz değiştiren malzemelere sahip sistemler bu teknolojiye örnektir. 5. örnekte, ahşabın farklılaştırılmış malzeme özellikleri ve performansı hesaplamalı tasarım ve üretim sürecine entegre edilerek iklimle duyarlı ve karmaşık morfolojiye sahip bir kabuk elde edilmiştir. İklim koşullarına ve bağlı nemdeki değişikliklere tepki verebilen bu kabukta, nem kontrolü düzenlenmesi ve ışık geçirgenliği kontrolü fonksiyonları gerçekleştirilmektedir (Reichert, vd. 2015). 6. örnek, termo-bimetal panellerden oluşup yapay enerji yardımı olmadan güneş enerjisi ile ısınmaya dayalı olarak lamellerini hareket ettirebilen pasif bir sistemle çalışmaktadır. Kinetik mekanizması ile; güneş koruması, gölgeleme, havalandırma, parlamayı azaltma gibi fonksiyonları gerçekleştirmektedir (Barozzi, vd. 2016).
- 7. ve 8. örnekler pasif teknolojiye sahip olup bu teknoloji, cephe sisteminin elektrik ve manuel güce bağlı çalışması yerine güç kaynağı olarak rüzgar, su, güneş ışığı gibi doğal kaynaklarının kullanılmasına dayanmaktadır. Bu cephelerin, mekatronik güç kaynaklarından bağımsız çalışabilmesi, minimalist tasarım ve az bakım gerektirip az maliyetli olması gibi avantajları varken; cephenin herhangi bir kontrol sistemine sahip olmaması nedeniyle öngörülemez durumlarda tepki verme özelliğine sahip olmaması gibi dezavantajı da mevcuttur (Matin ve Eydgahi, 2022). 7. örnekte, kinetik cepheyi oluşturan rüzgarın etkisiyle serbestçe hareket edebilen küçük alüminyum paneller, rüzgarı içeri alıp binayı doğal olarak havalandırmanın yanı sıra farklı ışık gölge desenleri oluşturarak güneş koruması ve gölgeleme de sağlamaktadır (URL-4). 8. örnekte ise, otel binasının atriyumunun cephesi boyunca uzanan ve pasif bir sistem olup rüzgar enerjisiyle çalışan kinetik cephe, rüzgar hareketi ve günışığının yansımalarıyla çeşitli desenler oluşturarak fazla günışığı kazanımını önleyip havanın ve ışığın atriyum alanına iletilmesini sağlamaktadır (Khoo, 2013).

Farklı teknolojilere ve bu teknolojilerin içerdiği sistemlere göre çeşitlenen kinetik cepheler, yukarıdaki analizlerden anlaşılacağı üzere; fonksiyonelliği, estetik etki oluşturan tasarımı ve günışığına bağlı performansı sayesinde binanın sürdürülebilirliğine katkı sağlamakta olup kullanıcıların termal ve görsel konfor seviyesini arttırmaktadır. Ayrıca fotovoltaik panelli sistemlerde günışığından faydalanarak binanın kendi elektrik enerjisini üretmesini, pasif sistemlerde doğal havalandırılmasını ve tüm sistemlerde günışığının etkin kullanımına bağlı olarak iç mekanda oluşturulan termal yalıtım ile binanın işletim maliyetininin düşürülmesini sağlamaktadır.

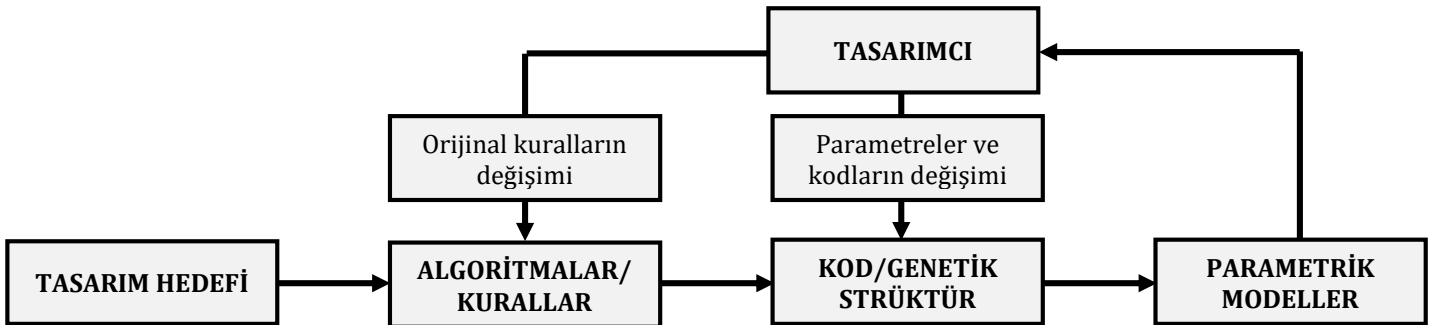
Tablo 2. Örnek Kinetik Cephe Sistemlerin İçerdiği Sistem Katmanları Açısından Analizi

 <p>1. Al Bahar Kuleleri / Origamiye Dayalı Kinetik Cephe (URL-5)</p>	<b>Tasarımcı / Yer-Yıl:</b> Aedas Architects / Abu Dabi, Birleşik Arap Emirlikleri-2012
	<b>Cephe Tasarım Fonksiyonu:</b> Parlamayı azaltma, güneş koruması, enerji korunumu
	<b>Aktüatör:</b> Her güneş kırıcı modül, binayı aşırı güneş ışınlarına maruz kalmaktan önemli ölçüde korumak için doğrusal bir aktüatör tarafından çalıştırılmaktadır.
	<b>Malzemeler:</b> Politetrafloroetilen (PTFE) malzemedan yapılmış, boşluklu üçgen biçimli modüler panellerden oluşmaktadır.
<b>Kontrol Sistemleri:</b> Merkezi kontrol sistemi	
 <p>2. One Ocean Tematik Pavilyonu Expo / Biyo-Tabanlı Kinetik Cephe (URL-6)</p>	<b>Tasarımcı / Yer-Yıl:</b> Soma Architecture / Yeosu, Güney Kore-2012
	<b>Cephe Tasarım Fonksiyonu:</b> Parlamayı azaltma, güneş koruması, enerji korunumu
	<b>Aktüatör:</b> Güneş kırıcı panellerin her birinde, bu panellerin geri dönüşümlü deformasyona uğramasını sağlayan bilgisayar kontrollü mekanik aktüatörler bulunmaktadır.
	<b>Malzemeler:</b> Cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) güneş kırıcı panellerinden oluşmaktadır.
<b>Kontrol Sistemleri:</b> Merkezi kontrol sistemi	
 <p>3. TIC Binası / Pnömatik Kinetik Cephe (URL-7)</p>	<b>Tasarımcı / Yer-Yıl:</b> Cloud-9 Mimarlık Ofisi / Barselona, İspanya-2011
	<b>Cephe Tasarım Fonksiyonu:</b> Güneş koruması, enerji etkinliği
	<b>Aktüatör:</b> Malzeme, mekanik aktüatörlere ihtiyaç duymadan pnömatik tabanlı aktüatörler sayesinde şekil değiştirebilme özelliğine sahiptir.
	<b>Malzemeler:</b> Şişirilebilir ETFE yastıklarından yapılmış cephe modüllerinden oluşmaktadır.
<b>Kontrol Sistemleri:</b> Merkezi olmayan kontrol sistemi	
 <p>4. ETH Doğal Kaynaklar Evi / Fotovoltaik Panelli Kinetik Cephe (Matin ve Eydgahi, 2022)</p>	<b>Tasarımcı / Yer-Yıl:</b> Laboratory of Sustainable Construction / Zürih, Almanya-2015
	<b>Cephe Tasarım Fonksiyonu:</b> Enerji üretimi, cephe opaklığını düzenleme, güneş koruması
	<b>Aktüatör:</b> Yumuşak robotik pnömatik aktüatörler bulunmaktadır.
	<b>Malzemeler:</b> Her bir fotovoltaik panel; foto ve UV sensörlerinden, pnömatik basınç sensörlerinden, yumuşak gövdeli aktüatörlerden ve yumuşak gövdeye gömülü olan mikro-denetleyicilerden oluşmaktadır.
<b>Kontrol Sistemleri:</b> Merkezi olmayan kontrol sistemi	
 <p>5. Meteorosensitive Pavilyon / Malzemeye Dayalı Kinetik Cephe (Matin ve Eydgahi, 2022)</p>	<b>Tasarımcı / Yer-Yıl:</b> Achim Menges Architecture / Fransa-2013
	<b>Cephe Tasarım Fonksiyonu:</b> Nem kontrolü-düzenlenmesi, ışık geçirgenliği kontrolü
	<b>Aktüatör:</b> Malzeme teknolojisine dayalı aktüatör bulunmaktadır.
	<b>Malzemeler:</b> Kompozit veneer malzemedan oluşmaktadır.
<b>Kontrol Sistemleri:</b> Malzemeye dayalı kontrol sistemi bulunmaktadır.	
 <p>6. Bloom / Malzemeye Dayalı Kinetik Kabuk (Barozzi, vd. 2016)</p>	<b>Tasarımcı / Yer-Yıl:</b> DO SU Studio Architecture / Los Angeles, Kaliforniya-2012
	<b>Cephe Tasarım Fonksiyonu:</b> Güneş koruması, gölgeleme, havalandırma, parlamayı azaltma
	<b>Aktüatör:</b> Malzeme teknolojisine dayalı aktüatör bulunmaktadır.
	<b>Malzemeler:</b> Termo-bimetallerinden oluşmaktadır.
<b>Kontrol Sistemleri:</b> Malzemeye dayalı kontrol sistemi bulunmaktadır.	
 <p>7. Charlotte Park Garajı / Pasif Teknolojili Kinetik Cephe (URL-4)</p>	<b>Tasarımcı / Yer-Yıl:</b> Ned Kahn / Charlotte, Kuzey Karolina-2000
	<b>Cephe Tasarım Fonksiyonu:</b> Güneş koruması, gölgeleme, doğal havalandırma
	<b>Aktüatör:</b> Rüzgar enerjisi
	<b>Malzemeler:</b> Alüminyum malzemedan oluşmaktadır.
<b>Kontrol Sistemleri:</b> Pasif teknoloji ile çalışan cephede kontrol sistemi bulunmamaktadır.	
 <p>8. Marina Bay Oteli / Pasif Teknolojili Kinetik Cephe (Matin ve Eydgahi, 2022)</p>	<b>Tasarımcı / Yer-Yıl:</b> Ned Kahn / Singapur-2011
	<b>Cephe Tasarım Fonksiyonu:</b> Güneş ışığı ve ısı koruması, doğal havalandırma, ışık geçirgenliği kontrolü
	<b>Aktüatör:</b> Rüzgar enerjisi
	<b>Malzemeler:</b> Alüminyum malzemedan oluşmaktadır.
<b>Kontrol Sistemleri:</b> Pasif teknoloji ile çalışan cephede kontrol sistemi bulunmamaktadır.	

Çağdaş mimarideki artan karmaşık tasarım problemlerinin çözümünde bu sistemler, geleneksel sistemlere göre daha efektif olmaktadır. Öte yandan kinetik sistemlerin ayarlanabilme özellikleri, oldukça gergin menteşelerle bağlanmış rijit elemanlarla sağlandığı için düzensiz geometrilerde uyum bir problem haline gelmekte ve bu durum kullanılan cihazlarda masraf ve sürekli arızalanmayı ortaya çıkartıp, yoğun bir şekilde bakım yapılmasını gerektirmektedir (Schleicher, vd. 2015). Bu bağlamda kinetik cephe tasarımlarının uygulanmasında ve işletim sürecinde hata payını minimize etmek için, parametrik ve algoritmik tabanlı modelleme, simülasyon analiz ve senkronize uygulama araçlarını içeren Yapı Bilgi Modelleme (BIM) teknolojisinin etkin kullanımı ile optimum tasarım morfolojisini, morfolojik dönüşümünü, hareket mekanizmasını ve zamanlamasını belirleyen konfigürasyonların yapılması önem kazanmaktadır.

### 3. BIM ORTAMINDA KİNETİK CEPHE TASARIM YÖNTEMİ OLARAK ÜRETKEN TASARIM VE KİNETİK CEPHE TASARIM PROSEDÜRLERİ

BIM (Yapı Bilgi Modellemesi) teknolojisi, binanın tüm yaşam döngüsü boyunca dijital bilgilerin oluşturulmasını, kaydedilmesini ve yönetilmesini sağlayan bir dizi kural, prosedür ve teknolojiyi kapsayan bir dijital platformdur (Ma, vd. 2021). Günümüzde kinetik cephelerin tasarım ve modelleme ile üretim tekniklerine ilişkin yeni sayılabilecek bir paradigma olan üretken (Generative) tasarım ise, parametrik (sınırlara bağlı) ve algoritmik (kurallara bağlı) düşünme-modelleme sistemine dayalı bir BIM tabanlı süreç ve tasarım teknikleri bütünüdür (Menges, Ahlquist, 2011; Leach, 2009; Ma, vd. 2021). Üretken tasarımın parametrik model elde etme sürecinde; değişkenler ve dijital veri akışları oluşturulmakta, parametrelerin değerleri ayarlanmakta ve kurallar buna göre belirlenmektedir. Oluşturulan kural setleri, parametrik tasarımın 3 boyutlu modellerini yapılandırma temel tasarım prosedürleri haline gelmektedir (Oxman, Gu, 2015). Üretimsel tasarımda ortaya konulan tasarım hedefleri ile beraber kullanıcılar tarafından tanımlanan kısıtlamaları ve kuralları da karşılayan farklı modeller oluşturularak, çoklu tasarım seçeneklerini otomatik olarak optimize etmek amaçlanmaktadır. Süreç sonunda elde edilen parametrik model, şekil-5'te gösterildiği gibi başa dönülmeden kurallar ve algoritmalar veya komut dosyası değiştirilerek kolayca değiştirilebilir (Henriquez, vd. 2022). Bu sayede tasarımcılar tasarım alternatiflerini, her aşamada paralel olarak geliştirebilmekte ve herhangi bir aşamada değiştirip modifiye edebilmektedir.



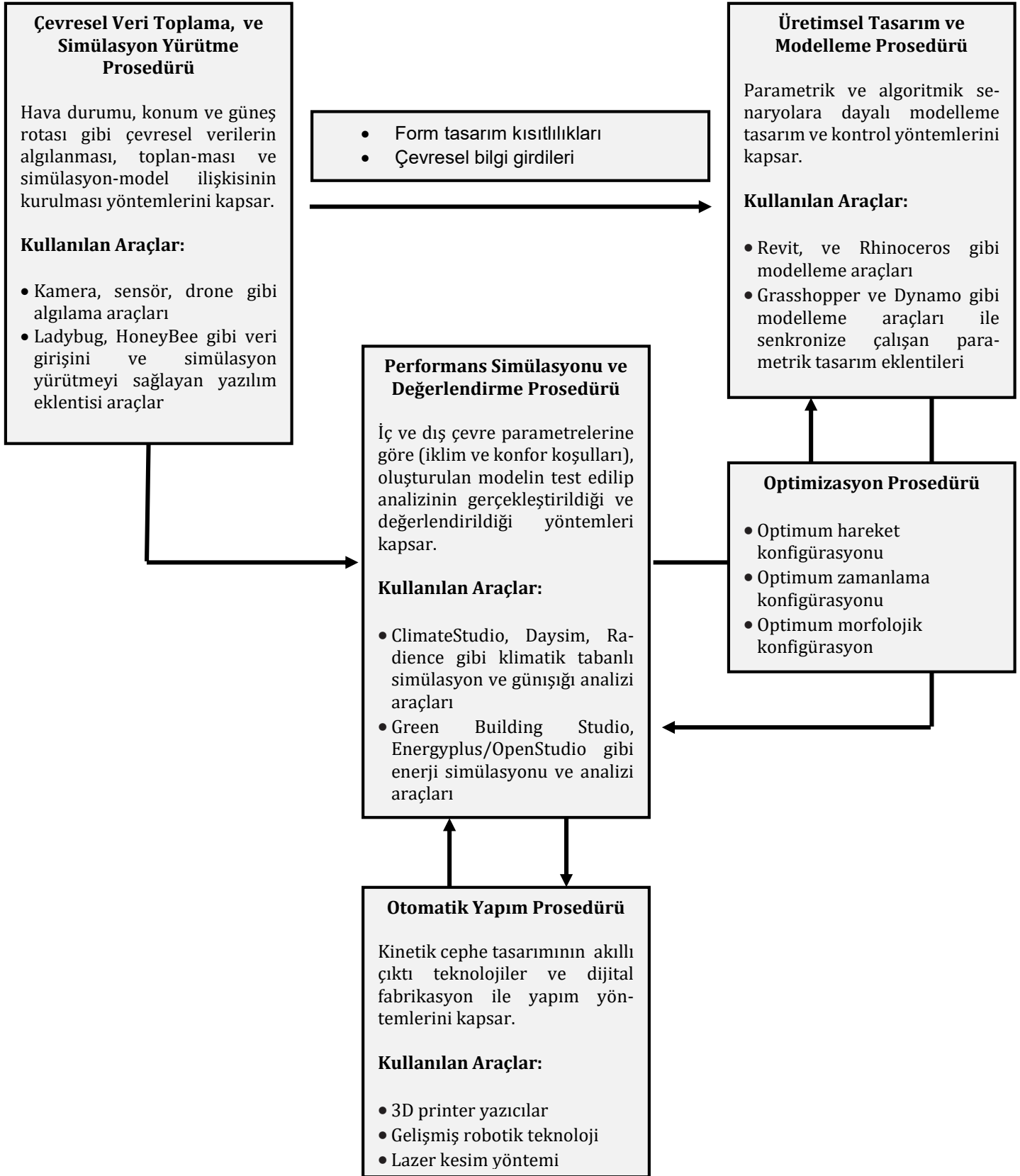
Şekil 5. Üretken Tasarım Sürecinin İlişkisel Akış Şeması (Ma, vd. 2021. s.3 ve Henriquez, vd. 2022. s.4'den Uyarlanmıştır)

Üretken tasarım sistemleri, karmaşık kompozisyonların basit bir dizi denklem ve parametre uygulaması yoluyla formüle edilerek tasarımcıların karmaşık tasarım zorluklarını hızlı bir şekilde keşfetmesini, optimize etmesini, bilgiye dayalı kararlar almasını ve böylece bilgisayar ile insan arasında efektif ve entegre bir iş akışının kurulmasını sağlamaktadır (Ma, vd. 2021). Tasarım perspektifi açısından üretken sistemlerin ana katmanı olan parametrik şemanın tasarım sürecindeki rolü; keşfedici bir mekanizma sağlamak, varyasyon oluşturmak ve dönüşümsel süreçler için bir ortam yaratmaktır (Oxman, Gu, 2015). Bu şemanın okunabilirliği, diğer ekip üyelerinin modeli ne kadar kolay değiştirebileceğini ve yeniden kullanabileceğini belirlemede merkezi bir faktördür. Ayrıca büyük ölçekli ve karmaşık yapıya sahip modellerin tasarımında modeli oluşturan parametrik şemanın yapısı, içerdiği iç içe geçmiş ilişkileri anlamlandırmada da kritik öneme sahiptir (Davis, vd. 2011).

Parametrik tasarım odaklı bir düşünce ve eylem sistemine dayalı yazılımları barındıran Yapı Bilgi Modelleme (BIM) teknolojisi, kinetik cephe tasarımı için kullanışlı ve verimli bir ortam sağlamaktadır. Kinetik cepheler için bilgisayar destekli bir tasarım metodu sağlayan üretken tasarım sistemi, geometrik modelleme ile tasarım keşfini sağlamakta ancak "bilgi" özelliklerinin oluşturulmasında ve modelin bu bilgilere göre analizinde başka araç ve yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır (Ma, vd. 2021). Analiz, simülasyon, kontrol ve optimizasyon fonksiyonlarını gerçekleştiren bu BIM araçlarının, üretken tasarım sürecinin yürütüldüğü modelleme araçlarıyla birlikte oluşturduğu entegre ve senkronize çalışma sistemi, kinetik cephe tasarımı için seri bir şekilde çoklu varyasyonların üretilip belirlenen kriterlere göre bu varyasyonların değerlendirilmesini ve optimize edilmesini sağlamaktadır (Güzer, vd. 2016; Shen,



Wu, 2016; Wang, vd. 2010). Yapılan araştırmalar sonucunda BIM tabanlı kinetik cephe üretim senaryosunun, yukarıda sayılan araçların oluşturduğu senkronize ilişkiye dayalı sistemde; Çevresel Veri Toplama ve Simülasyon Yürütme, Üretimsel Tasarım ve Modelleme, Performans Simülasyonu ve Değerlendirme, Optimizasyon ve Otomatik Yapım olmak üzere 5 ana prosedürde gerçekleştiği anlaşılmıştır. Erken tasarım, geç tasarım ve uygulama süreçlerini kapsayan bu prosedürlerin detayları ve ilişki durumları, aşağıdaki şekilde (Şekil-6) gösterilmiştir (Panya vd. 2020; Shen, Wu, 2016; Ma, vd. 2021; Soleimani, 2019).



Şekil 6. Kinetik Cephe Üretim Senaryosunu Oluşturan Prosedürlerin İlişki Çerçevesi

Revit ve Rhinoceros gibi modelleme araçları, kullanıcı kararlarını doğru bir şekilde etkileyen veriler oluşturmak için matematiksel yöntemlerle çalışmaktadır. Modelleme sürecinde, matematiksel algoritma yoluyla analitik çözümler ve denklemler birleştirilerek geometrik model görselleştirilmektedir. Parametrik modellerin oluşumu, gereksinimleri temel alan hesaplamalı bir sayısal olarak modelleme ve analiz etme sürecinde gerçekleşmektedir (Panya, vd. 2020). Modelleme araçlarında üretilen modelin konfigürasyonları, Grasshopper ve Dynamo gibi modelleme yazılımlarıyla entegre ve senkronize çalışan eklenti yazılımlar aracılığıyla algoritmik ve parametrik sistemde otomatik olarak kontrol edilip değiştirilebilmektedir. Bu eklenti yazılımları, uyarlanabilir kinetik cephe tasarımı için tasarımcıların basitten karmaşığa değişen parametrik formlar oluşturmasına olanak tanıyan grafik algoritma düzenleyicileri olarak işlev görmektedir (Seyrek, vd. 2021).

Kinetik cephelerin üretim sürecinde ilk olarak bilgisayarlarla algılama ve sensör teknolojileri, çevresel verileri toplayarak tasarım kısıtlamalarını ve girdilerini oluşturmaktadır (Ma, vd. 2021). Enerji ve günışığı simülasyonlarının gerçekleştiği ClimateStudio, Radiance, EnergyPlus gibi araçlara Ladybug aracılığıyla veri olarak aktarılan çevresel girdiler, yine bu araç üzerinden 3 boyut arayüzünde anlaşılması kolay analiz grafik ve diyagramlarına dönüştürülmektedir. Diğer simülasyon yürütme aracı olan HoneyBee ise, simülasyon motorlarını Cad yazılımlarına bağlayıp ayrıntılı gün ışığı ve termodinamik modellemeyi desteklemektedir (Seyrek, vd. 2021). Yani, modelleme ve parametrik eklenti araçları işbirliğinde oluşturulan model çıktısı, iklim tabanlı simülasyon araçlarının kombinasyonu ile analiz edilir ve çıkan sonuçlar cephe performansı açısından LadyBug ve HoneyBee gibi eklentiler aracılığıyla; EnergyPlus, Radiance, Daysim ve ClimateStudio gibi simülasyon yazılımları kullanılarak değerlendirilmektedir (Panya, vd. 2020; Seyrek, vd. 2021). Değerlendirme sonucunda tasarımda optimum çözümlere ulaşmak için kinetik cephe modelinin farklı konfigürasyonlarına dayalı varyasyonları türetilerek, performansı geliştirmek üzere optimizasyonu gerçekleştirilmektedir.

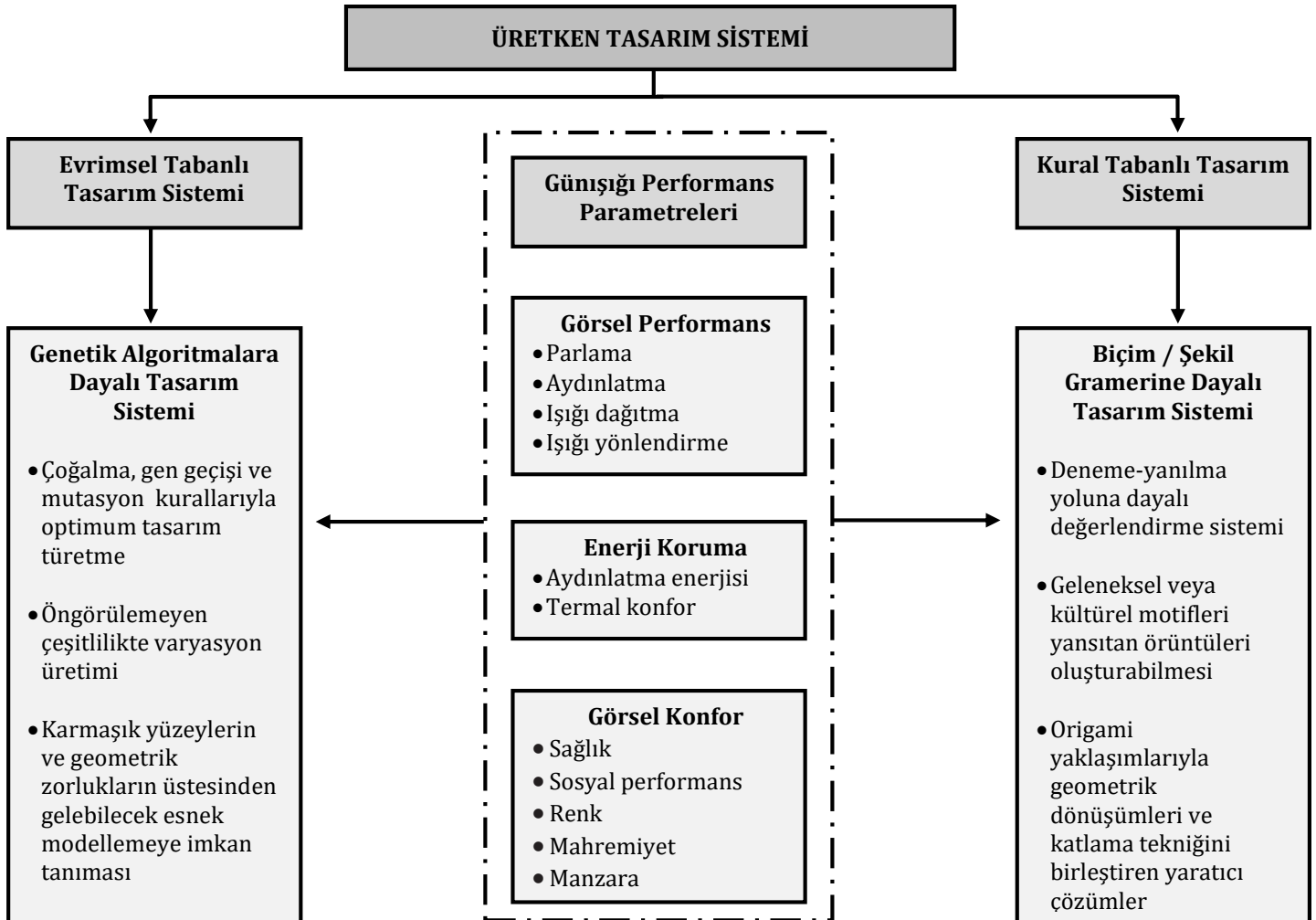
Optimizasyon sonucunda elde edilen varyasyon veya varyasyonların prototip oluşturulmak üzere dijital entegrasyona dayalı çağdaş teknolojilerle fiziksel olarak meydana getirilmesiyle, dijital modelde tanımlanmış malzemelerin kinetik davranışı fiziksel bir model üzerinde test edilmiş olur. Bu test ve optimizasyon mekanizmasını; dijital modellerle sanal model arasındaki veri alışverişini sağlayan kullanıcı arayüzlü yazılımlar ve dijital modellerin bağlı olduğu, bu aracı yazılımlarla senkronize çalışan ve geri besleme düzeneğine sahip robot teknolojisi olan servo-motorlar oluşturmaktadır (Mallasi, 2018). Kinetik cephe oluşum senaryosunun son aşaması olan otomatik yapım prosedürü, dijital teknoloji ve sanal tasarım ortamıyla entegre çalışan robotik, 3 boyutlu yazıcı ve lazer kesim yöntemlerinin kullanıldığı yapım sürecidir (Ma, vd. 2021; Soleimani, 2019). Yapay zeka destekli bu yapım teknolojileri sayesinde tasarım prototipi oluşturulup ortaya çıkan modelin önceden test edilmesiyle; inşa sürecindeki hata payı minimize edilerek erken tasarım aşamasında kinetik cephe tasarımına yönelik yapılan optimizasyonlar sonucu doğru kararlar alınacağı için tasarım ve projelendirme sürecinde zaman ve maliyet açısından da tasarruf sağlanmaktadır.

Bu yöntemlerin kullanıldığı 5 farklı prosedürde gerçekleşen kinetik cephe tasarım sürecinde, üretilecek olan kinetik cephe modelinin günışığı ve enerji etkinliği kriterleri açısından performansını arttırmak amaçlı tasarım optimizasyonu; birbiriyle entegre, eş zamanlı, parametrik ve senkronize bir sistemde çalışan yazılımların ve fiziksel model üretim teknolojisinin işbirliğinde gerçekleşmekte olup tüm süreç tasarımcı veya tasarımcıların kontrolünde, herhangi bir aşamada değişikliklerin yapılabildiği esnek bir mekanizmada yönetilmektedir. Birbirine bağlı prosedürlerde tasarım süreci yürütülen kinetik cephelerin tasarımında benimsenen farklı yaklaşımlar ve süreç boyunca kullanılan farklı teknikler söz konusudur. Tasarım yöntemi, bu yaklaşım ve tekniklerin hangisinin benimseneceğine bağlı olarak belirlenmekte olup, üretilen modelin günışığı ve enerji etkinliği açısından performansını arttıran optimizasyonu, belirlenen tasarım yöntemlerinin kombinasyonu ile gerçekleşmektedir. Bu yöntemlerin belirlenmesinde ise tasarım sürecinde kullanılan modelleme, simülasyon ve analiz araçlarının sınırlamaları, tasarımcı kaynaklı sınırlamalar, tasarlanacak olan kinetik cephenin özellikleri, morfolojisi (biçimi-fiziksel özellikleri) ve gerçekleştirilmesi istenilen fonksiyonları gibi faktörler etkili olmaktadır.

#### **4. BIM ORTAMINDA KİNETİK CEPHE TASARIM YAKLAŞIMLARI VE ÜRETKEN TASARIM SİSTEMLERİ**

Kinetik cephe tasarımında ortaya konan üretken model; üretici kurallardan, ilişkilerden ve ilkelerden türeyen biçimlerin ortaya çıkışıyla ilgilenen karmaşık mekanizmaların tasarımına dayanmaktadır (Oxman, 2006). Oxman (2006) yazısında, üretken dijital tasarım modellerinin biçimlendirilmiş üretim süreçleri için; hesaplama mekanizmalarının sağlanmasıyla karakterize edildiğini ve bu modeli oluşturan şekil ve formların önceden formüle edilmiş üretken süreçlerin bir sonucu olarak kabul edildiğini aktarmaktadır. Üretken tasarım sürecinde, bütünü oluşturan parçalar arasındaki strüktürel ilişkiler ve biçimsel potansiyelleri keşfetmeyi sağlayan linguistik (dilsel) kurallar önemli rol oynamaktadır (Arida, 2000). Yapılan literatür taramalarından yola çıkarak üretken tasarım sistemlerindeki model oluşumu için, bu ilişkilerin ve kuralların morfolojiye dönüşümünde kullanılan temelde iki farklı tasarım sisteminin olduğu anlaşılmıştır. Bunlardan biri olan evrimsel tabanlı tasarım sisteminde; doğadaki

tasarımların, sistemlerin ve süreçlerin incelenmesi yoluyla insan sorunlarına çözüm bulmak için bu süreç ve sistemlerden ilham alan biyomimikrinin prensipleri kullanılarak, kinetik cephe tasarımında sürdürülebilirliği sağlayan fonksiyona sahip morfolojik çözümler araştırılmaktadır (Radwan, Osama, 2016). Bir diğeri olan kural tabanlı tasarım sisteminde ise; kinetik cephe tasarımı için en çok kullanılan alt sistem: Biçim veya şekil gramerine dayalı tasarım sistemidir. Alkhayat'ın (2013) aktardığına göre Knight (2000), şekil gramerine dayalı tasarım sistemini; orijinal şekiller üzerinden gerekli ilişki tiplerini formüle ederek alternatif tasarımlar üretebilen, modifikasyon temelli, tanımlayıcı ve üretici kurallar olarak tanımlamaktadır. Şekil-7'deki diyagram, kinetik cephe tasarımında kullanılan üretken tasarım sistemlerini alt sınıflarına ayırmakta ve bu sistemlerde bağlı kalınan günışığı performans parametrelerini göstermektedir.



**Şekil 7.** Kinetik Cephe Üretimsel Tasarım Sistemlerinin Sınıflandırılması ve Günışığı Performans Parametreleri

Biçim gramerine dayalı tasarım, hesaplamalı olarak dönüşüm kuralları yoluyla şekil oluşturma mekanizmasına dayalı bir tasarım sistemidir (Oxman, 2006). Biçim gramerine dayalı tasarım sisteminin hesaplama mekanizması; noktaların, çizgilerin, düzlemlerin ve hacimlerin temel geometrik bileşenlerini kullanmaktadır. Biçim grameri tasarım sistemi, optimum çözümler üretmek için kurallar uygulayarak mevcut üretmenin tasarım sorununa uyup uymadığını belirleyen bir değerlendirme mekanizması kullanıp, tasarım problemini deneme yanılma yoluyla ele almaktadır. Tasarımcıya, model üzerindeki parametreleri ayarlayarak her adımda tasarıma müdahale etmesine izin verip daha fazla kontrol imkanı sağlamaktadır (Arida, 2000). Biçim grameri üretken tasarım sistemi ile oluşturulan örüntüleri meydana getiren güneş kırıcı bileşenlerin origami tekniklerinden ilham alınarak tasarlanan kinetik mekanizması sayesinde, katlama tekniklerinin ve geometrik dönüşümlerin birleştirilmesiyle; yaratıcı, işletimi kolay ve esnek çözümler meydana getirilmektedir.

Evrimsel tabanlı tasarım sistemi ile bir kinetik cephe modelinin oluşumu, genetik kodlamaya dayalı evrimsel bir süreçte gerçekleşmektedir. Tasarımda belirli bir üretici mekanizmanın formülasyonu ve etkileşim türü esas olmakta ve genetik formun evrimi, genetik kodu tanımlayan kurallara dayanmaktadır (Oxman, 2006). Evrimsel tabanlı tasarım sistemindeki kinetik cephe modeli için form oluşturma süreci ve farklı model varyasyonları türetilerek optimum tasarım çözümüne ulaşma mekanizması, doğadaki canlı organizmaların hayatta kalmalarını

ve çevreye adapte olabilmelerini sağlayan genlerin mutasyon veya melezleme yoluyla nesiller boyunca aktarıldığı evrimsel mekanizmaya benzemektedir. Kinetik cephe modelinin evrimsel tabanlı sistemdeki üretim sürecinde; topolojik yüzey, izomorfik alan, kinetik iskelet, kuvvetler alanı ve parametrik modelin oluşturduğu hesaplamalı bir yapının eş zamanlı olarak manipüle edilmesiyle, öngörülemez çeşitlilikteki varyasyonlarda farklı alternatifler oluşturulabilmekte ve optimum tasarım çözümü için bu alternatifler değerlendirilmektedir (Kolarevic, 2001). Yapılan kapsamlı literatür taramasından yola çıkarak evrimsel tabanlı tasarım sisteminin bir alt türü olarak genetik algoritmalara dayalı tasarım sisteminin daha yaygın olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda makalede, evrimsel tabanlı tasarım sistemi olarak genetik algoritmalar alt sistemi ele alınmış ve bu tasarım sistemine sahip örnekler analiz edilip değerlendirilmiştir. Akıpek ve İnceoğlu (2007) yazılarında, genetik algoritma tasarım sisteminin; çoğalma, gen geçişi ve mutasyon kurallarının işlendiği kromozom sarmalı benzeri bir kural dizili yapıya sahip algoritmalar bulundurduğunu ve bu algoritma sarmalına, değerleri sürekli değişebilen parametrelerin işlenmesiyle oluşturulan “yapay organizma” yani tasarım modelinden optimum tasarım için farklı alternatiflerin türetilbildiğini aktarmaktadırlar. Biyo-esinli tasarım yaklaşımına sahip genetik algoritmalara dayalı tasarım sistemi, karmaşık yüzeylerin ve geometrik zorlukların üstesinden gelebilecek esnek modellemeye imkan tanınması yönünden de avantajlıdır.

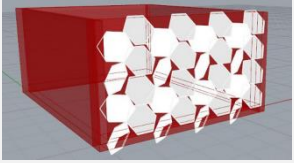
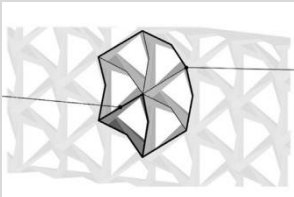
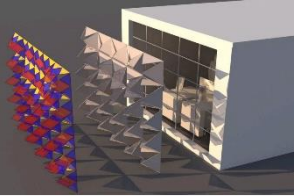
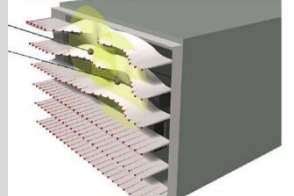

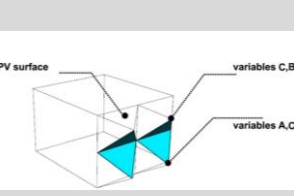
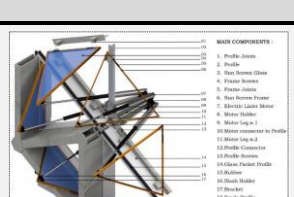
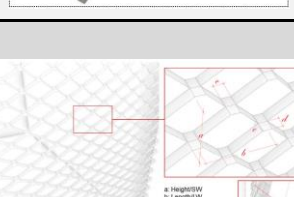
## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kinetik cephelerin BIM ortamındaki tasarımı ve modellenmesinde, temelde 2 farklı yaklaşımın benimsendiği ve bu yaklaşımların da 2 farklı tasarım sistemi içerisinde; farklı yöntem, yaklaşım, ve araçlarla ortaya konduğu yapılan araştırmalar sonucunda anlaşılmıştır. Biyo-ilhamlı tasarım yaklaşımına dayalı evrimsel tabanlı tasarım sistemi ve dilsel (linguistik) tasarım yaklaşımına dayalı kural tabanlı tasarım sistemi olarak ayrılan bu sistemlerin tercihi, ortaya konacak tasarımın; hedeflerine, kriterlerine, sınırlamalarına ve tasarımda etkili parametrelere (bağımlı-bağımsız değerlendirme değişkenleri) bağlıdır. Çalışmanın bir sonraki bölümünde, kinetik cephe tasarım ve optimizasyon süreçlerini, bu süreçlerde kullanılan yöntem, sistem ve araçların ilişkisi üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirebilmek için Web of Science, Science-Direct ve Taylor and Francis veritabanındaki 2016-2023 yılları arasında yayınlanmış olan çalışmalardan, kinetik ve statik parametrik cephe tasarım önerilerinin olduğu dergi ve konferans makaleleri taranmış olup taranan makaleler arasından model tasarımında üretken tasarım sistemi olarak biçim grameri ve genetik algoritmalar sistemlerinin kullanıldığı 10 örnek seçilmiştir. Örnek çalışmalardan iki tanesinde (8 ve 10. örnekler) ortaya konmuş olan cephe tasarımı, kinetik sistem olmayıp statik parametrik cephe tasarımı tanımına girmektedir. Bu örneklerin seçilme amacı, performans dayalı kinetik parametrik cephe ile statik parametrik cephe sistemlerinin BIM ortamındaki tasarım ve optimizasyon süreçlerini de karşılaştırıp birlikte değerlendirerek bu süreçlerin barındırdığı parametreler bağlamında benzer ve farklı yönlerini ortaya koymaktır. Aşağıdaki tablolarda yer alan literatürden seçilmiş örnek çalışmalarda ortaya konmuş performans dayalı kinetik ve statik parametrik cephe tasarımları, tasarım süreci ve prosedürleri açısından bu prosedürlerin barındırdığı tasarım; sistemleri, yöntemleri, teknikleri, stratejileri ve araçlarının içerdikleri alt parametreler çerçevesinde analiz edilip değerlendirilmiştir.

**Tablo 3.** Kinetik ve Statik Parametrik Cephe Tasarım Önerilerinin Tasarım ve Optimizasyon Süreci Açısından Analizi

Ref.	Yıl	İklim/ Konum	Uygulanan Mekan Tipolojisi/ Ölçeği	Kinetik Cephe Sistemi	Kinetik Dönüşümler	Öne Çıkan Güneşli Performansı Ve Enerji Etkinliğine Dayalı Fonksiyonu	Tasarım Görünümü
[1]	2022	Tropikal İklim / Tayland	Home Ofis/Bina Cephesi Ölçeğinde	Doğal Fenomenlere Dayalı Kinetik Cephe Sistemi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dönme</li> <li>• Kıvrılma</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• İç mekana, kullanıcı faaliyetlerine uyumlu ve faydalı güneşli filtreleme</li> </ul>	
[2]	2022	Soğuk-Yarı kurak / Tahran	Ofis Mekânı/Oda Cephesi Ölçeğinde	Çok Fonksiyonlu Kinetik Cephe Sistemi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dönme</li> <li>• Bükülme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kullanışlı güneşli aydınlanması</li> <li>• Bağımsız güneşli kullanımı</li> <li>• Fazla güneşli kazancını önleme</li> </ul>	



[3]	2016	Çöl İklimi / Kahire	Ofis Mekanı/Oda Cephesi Ölçeğinde	Düzgün 6-gen Örüntülü Cephe Sistemi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dönme</li> <li>• Ötellenme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Güneşliği ve enerji kazancı</li> <li>• Kullanışlı güneşliği aydınlanması sağlama</li> </ul>	
[4]	2021	Tropikal İklim / Vietnam	Ofis Mekanı/Oda Cephesi Ölçeğinde	Origami İlhamlı, 3-Gen Tessalasyonlu Gridal Cephe Sistemi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dönme</li> <li>• Katlanma</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• İç mekan güneşliği kalitesini artırma</li> <li>• Leed 4.0 güneşliği performans kriterlerini karşılama</li> </ul>	
[5]	2020	Sıcak ve Kuru İklim / İran	Ofis Mekanı/Oda Cephesi Ölçeğinde	Orosi Geleneksel Pencere İlhamlı Renkli Cam Entegre Üçgensel Kinetik Cephe Sistemi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dönme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parlamayı azaltma</li> <li>• Aşırı ısınmayı önleme</li> <li>• Kullanıcı ve güneş pozisyonuna göre uyarlanabilme özelliği ile güneşliği filtreleme</li> </ul>	
[6]	2021	Sıcak ve Kuru İklim / İran	Ofis Mekanı/Oda Cephesi Ölçeğinde	Kullanıcı Etkileşimiyle Dinamik Geçişe Duyarlı, Stoma İlhamlı Izgaralı Cephe Sistemi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dönme</li> <li>• Kayma</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parlamayı azaltma</li> <li>• Aşırı ısınmayı önleme</li> <li>• Kullanıcı ve güneş pozisyonuna göre uyarlanabilme özelliği ile güneşliği filtreleme</li> </ul>	
[7]	2016	Bu Bilgiye Ulaşılamamıştır	Bu Bilgiye Ulaşılamamıştır	Mikro İklimin Dinamik Değişikliklerine Göre Kendi Kendini Ayarlama Özelliğine Sahip Parametrik Adaptif Cephe Sistemi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Katlanma</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dinamik güneş ısı adaptasyonu</li> <li>• Güneş pozisyonuna göre uyarlanabilme özelliği ile güneşliği filtreleme</li> </ul>	
[8]	2023	Subtropikal Ve Kurak İklim / Abu Dhabi	Ofis Mekanı/Oda Cephesi Ölçeğinde	Morfoloji Konfigürasyonu Yoluyla Çevresel Koşulların Değişimine Uyum Sağlayabilen İklim Dirençli Bina Cephesi	Bu Bilgiye Ulaşılamamıştır	<ul style="list-style-type: none"> <li>• İç mekan güneşliği kalitesini artırma</li> <li>• İklim uyumlu tasarım</li> <li>• Tasarımında, uygulanacak farklı iklimlere ve cephe ölçeğine göre test ve optimizasyon imkanı sunan metodoloji barındırma</li> </ul>	
[9]	2023	Ilıman Okyanusal İklim / Brüksel	Ofis Mekanı / Bina Cephesi Ölçeğinde	Hexagonal Desenli, Rüzgar Enerjisine Bağlı Olarak Otomatik Mekanizmada Çalışan Kinetik Cephe Sistemi	Bu Bilgiye Ulaşılamamıştır	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enerji etkinliği ve CO2 emisyonunun azaltılması</li> <li>• Leed kriterlerine dayalı tasarım</li> <li>• PV panel ve rüzgar türbinleri aracılığıyla enerji üretimi</li> </ul>	
[10]	2022	Nemli Subtropikal İklim / Kitakyushu, Fukuoka, Japonya	Bu Bilgiye Ulaşılamamıştır	Çok Amaçlı Optimizasyon Yoluyla Tasarlanmış Parametrik Genişletilmiş Metal Cephe Sistemi	Bu Bilgiye Ulaşılamamıştır	<ul style="list-style-type: none"> <li>• İç mekan güneşliği kalitesini artırma</li> <li>• Güneşliği koruması</li> <li>• Malzeme dolayısıyla atık yönetimine katkı bulunulması</li> <li>• Malzemenin perfore yapısıyla binanın havalandırılmasına katkı sağlaması</li> </ul>	

[1]: Sankaewthong, vd. 2022; [2]: Sadegh, vd. 2022.; [3]: Mahmoud, Elghazi, 2016; [4]: Thanh, vd. 2021; [5]: Hosseini, vd. 2020.; [6]: Hosseini, vd. 2021; [7]: Shen ve Lu, 2016; [8]: Figliola, 2023; [9]: Haghighat, Sadeh, 2023; [10]: Khidmat, vd. 2022

Belirlenen 10 kinetik ve statik parametrik cephe tasarım önerisinin 5'i biyolojik temelli tasarım yaklaşımının benimsendiği evrimsel tabanlı tasarım sistemi olarak genetik algoritmalar sistemi, diğer 5'i de dilsel temelli tasarım yaklaşımının benimsendiği kural tabanlı tasarım sistemi olarak biçim grameri tasarım sistemi kullanılarak modellenmiştir. Aşağıdaki maddelerde, seçilen 10 kinetik cephe tasarım önerisinin analiz tablosunda (Tablo 3) yer alan parametreler bağlamında analiz edilip değerlendirilmesiyle elde edilen bulgular yer almaktadır.

- Tüm tasarım önerilerinde, tasarımın içinde bulunduğu yerin günlük/aylık/yıllık iklimsel verileri Honeybee ve Ladybug gibi eklenti araçları kullanılarak veya farklı yollarla çıkartılmış olup günışığı performansı ve/veya enerji etkinliğine dayalı analizler yapılarak tasarım simülasyonları gerçekleştirilmiştir.
- Önerilen kinetik cephe sistemlerinin morfolojik tasarımları ve kinetik dönüşümlerindeki farklılıklar, cephenin uyarlanabilirlik özelliğinin çalışma mekanizmasında farklılık oluştursa da, bu sistemlerin işlevsel olarak benzer veya aynı fonksiyonlara sahip oldukları anlaşılmaktadır. Kinetik cephe modellerinin günışığı performansı ve enerji etkinliği tasarım kriterlerine yönelik; parlamayı azaltma, aşırı ısınmayı önleme, günışığı ve enerji kazancı, iç mekan günışığı kalitesini artırma, kullanışlı günışığı aydınlanması, kullanıcı ve güneş pozisyonuna göre günışığı filtreleme, enerji etkinliği, enerji üretimi ve CO<sub>2</sub> emisyonunun azaltılması gibi fonksiyonları, bu sistemleri oluşturan bileşenlerinin; dönme, katlanma, kayma, ötelenme, kıvrılma ve bükülme gibi kinetik dönüşümler geçirerek cephede uyarlanabilir özellik göstermesi ile gerçekleştiği ve bazı örneklerin ise (4 ve 9.) Leed (sürdürülebilirliğe dayalı sertifika sistemi) kriterlerine dayalı olarak test edildiği gözlemlenmiştir.

Yapılan analizler sonucunda kinetik cephe önerilerinin tasarım ve optimum konfigürasyonlara ulaşma sürecinde izlenen yöntem ve yaklaşımların farklılık gösterdiği ve izlenecek yöntemlere göre simülasyon ve eklenti araçlarının tercih edildiği anlaşılmıştır. Kinetik cephe tasarımlarının optimizasyon sürecinde üretilen model varyasyonlarının, aşağıdaki tablonun (Tablo 4) değerlendirme araçları sütununda yer alan yazılımlar aracılığıyla enerji etkinliği ve günışığı performansına bağlı simülasyonları yapılmış olup simülasyon analiz çıktılarının ortaya koyduğu Tablo 5'in bağımlı değerlendirme değişkenleri sütununda gösterilen parametrelerin optimum değerlerine göre Tablo 4'de gösterilen optimizasyon parametreleri konfigüre edilmiştir. KDND parametresinin, tüm kinetik cephe örneklerinin optimizasyon sürecinde ortak değerlendirme değişkeni olduğu gözlemlenmiştir. Bu değişken, modelde meydana gelen kinetik dönüşümdeki (dönme, kıvrılma, ötelenme, bükülme, kayma, katlanma) değiştirilebilir sayısal değerleri ifade etmektedir. Statik örneklerde ise, cephenin morfolojik tasarımının (biçim-geometri) (8. örnek), morfolojisini belirleyen sayısal parametrelerin (8 ve 10. örnek) veya malzeme özelliklerini tanımlayan parametrelerin (8. örnek) değiştirilmesiyle optimizasyon sürecinin yürütüldüğü gözlemlenmiştir.

**Tablo 4.** Kinetik ve Statik Parametrik Cephe Tasarım Önerilerinin Tasarım ve Optimizasyon Süreci Açısından Analizi

Ref	Yıl	Tasarım Araçları	Tasarım Yaklaşımı	Üretken Tasarım Sistemi ve Alt Sistemi	Değerlendirme Sistemi		Değerlendirme Kriterleri	
					Değerlendirme Araçları	Optimizasyon Değişkenleri	Enerji Etkinliği	Günışığı Performansı
[1]	2022	R, GR	BTTY	ETTS, GA	CS, W	CB, CT, KD, KDND	-	+
[2]	2022	R, GR	BTTY	ETTS, GA	W	MT, MTND, KD, KDND	-	+
[3]	2016	R, GR	DTTY	KTTS, BG	D	KD, KDND	-	+
[4]	2021	R, GR	DTTY	KTTS, BG	AS-EP, D	CY, MT, KDND	+	+
[5]	2020	R, GR	DTTY	KTTS, BG	D	KDND, CT	-	+
[6]	2021	R, GR	BTTY	ETTS, GA	D	MTND, CY, KD, KDND	-	+
[7]	2016	RE, DY	DTTY	KTTS, BG	Bu Bilgiye Ulaşılamamıştır	KDND	-	+
[8]	2023	R, GR	BTTY	ETTS, GA	EP, OS, DA, LB, HB	MT, MTND, CMÖ	+	+
[9]	2023	R, RE, GR, DY	DTTY	KTTS, BG	AI	Bu Bilgiye Ulaşılamamıştır	+	+
[10]	2022	R, GR	BTTY	ETTS, GA	RA, LB, HB	MTND	-	+

**R:** Rhino; **RE:** Revit **GR:** Grasshopper; **DY:** Dynamo; **CS:** Climate Studio; **RA:** Radiance; **LB:** Ladybug; **HB:** Honeybee; **W:** Wallacei; **D:** Diva; **DA:** Daysim; **AI:** Autodesk Insight; **AS-EP:** Archsim (Plug-in) - EnergyPlus; **OS:** OpenStudio; **BG:** Biçim Gramerleri; **GA:** Genetik Algoritmalar; **BTTY:** Biyolojik Temelli Tasarım Yaklaşımı; **DTTY:** Dilsel Temelli Tasarım Yaklaşımı; **ETTS:** Evrimsel Tabanlı Tasarım Sistemi; **KTTS:** Kural Tabanlı Tasarım Sistemi; **CB:** Cephe Boyutları; **CT:** Cephe Tipolojileri; **CY:** Cephe Yönlenmesi; **CMÖ:** Cephe Malzeme Özellikleri; **KD:** Kinetik Dönüşümler; **KDND:** Kinetik Dönüşümün Niceliksel Değişiklikleri; **MT:** Morfolojik Tasarım; **MTND:** Morfolojik Tasarımın Niceliksel Değişiklikleri

[1]: Sankaewthong, vd. 2022; [2]: Sadegh, vd. 2022.; [3]: Mahmoud, Elghazi, 2016.; [4]: Thanh, vd. 2021; [5]: Hosseini, 2020.; [6]: Hosseini, vd. 2021; [7]: Shen ve Lu, 2016; [8]: Figliola, 2023; [9]: Haghghat, Sadeh, 2023; [10]: Khidmat, vd. 2022

Tablo 5. Kinetik ve Statik Parametrik Cephe Tasarım Önerilerinin Tasarım ve Optimizasyon Süreci Açısından Analizi

Ref.	Yıl	Bağımsız Değerlendirme Değişkenleri	Bağımlı Değerlendirme Değişkenleri	Tasarım Optimizasyonu
[1]	2022	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Mekan Ölçüleri:</b></li> <li>Cephe Uzunluğu</li> <li><b>Cephe Tipleri:</b></li> <li>Sadece Cam Panel</li> <li>Statik Cephe</li> <li>Kinetik Cephe 1 (Dönme)</li> <li>Kinetik Cephe 2 (Kıvrılma)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Günişliği Faktörü [GF/DF]</li> <li>Yıllık Günişliğine Maruz Kalma [YGMK/ASE]</li> <li>Mekansal Gün Işığı Özerkliği [GÖ/sDA]</li> </ul>	Kinetik cephe tasarımının farklı tipolojileri ve kinetik dönüşüm konfigürasyonlarıyla elde edilen varyasyonlarının, mekana alınan ışık yoğunluğu ve LEED 4.1 kriterlerine göre değerlendirilmesi için gerçek zamanlı simülasyon testleri gerçekleştirilmiş ve analiz çıktılarından hareketle optimum günişliği performansını sağlayan sistem konfigürasyonları bulunmuştur.
[2]	2022	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Cephe Tipleri:</b></li> <li>Kinetik Cephe 1 (Dönme)</li> <li>Kinetik Cephe 2 (Distorsiyon)</li> <li><b>Cephe Morfolojileri:</b></li> <li>Üçgenel Örgü Aksı 1</li> <li>Üçgenel Örgü Aksı 2</li> <li>Üçgenel Örgü Aksı 3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Yararlı Günişliği Aydınlanması [YGA/UDI]</li> <li>Günişliği Özerkliği [GÖ/sDA]</li> </ul>	Önerilen çok amaçlı evrimsel algoritmalar (ÇAEA) çerçeve metoduyla, yüksek performanslı tasarım elde etmede karar verme süreci desteklenmiş ve kinetik cephe sistemi optimize edilmiştir. Değerlendirme ve optimizasyon sürecinde, günişliği performansı için kinetik dönüşümler ve cephe morfolojilerinin optimum konfigürasyonları bulunmuştur
[3]	2016	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Cephe Tipleri:</b></li> <li>Kinetik Cephe 1 (Dönme)</li> <li>Kinetik Cephe 2 (Ötelenme)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Değişken Zaman Faktörüne Göre Günişliği Alan Yüzdeleri [GYA]</li> <li>Değişken Zaman Faktörüne Göre Aydınlanma Seviyeleri [AS]</li> </ul>	Altıgen örüntülü parametrik cephe modeli üzerinde dönme ve öteleme kinetik hareket konfigürasyonları üretilip farklı günişliği simülasyonları gerçekleştirilerek, erken tasarım sürecinde günişliği performansı optimum düzeyde olan cephe varyasyonları bulunmuştur.
[4]	2021	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Cephe Morfolojileri:</b></li> <li>"Cupra Duvarı" benzeri panel düzenine sahip üçgenel örgü</li> <li>"Dağ" ve "Vadi" katlama tekniği kullanılan, şemsiye benzeri katlanma mekanizmasına sahip üçgenel örgü</li> <li><b>Cephe Yönlendirmeleri:</b></li> <li>8 farklı yönlenme durumu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leed 4.0 değerlendirme kriterleri</li> <li>Günişliği Özerkliği [GÖ/sDA]</li> <li>Yıllık Günişliğine Maruz Kalma [YGMK/ASE]</li> </ul>	Erken tasarım aşamasında kullanılan algoritmik paket ve eklenti yazılımı ile optimal tasarım çözümünü bulmada optimizasyon süreci desteklenmiştir. Bu süreçte, cephenin 8 farklı yönlendirmesinin iki farklı cephe morfolojisiyle ve kinetik dönüşümlerin farklı nicel değerleriyle oluşturduğu farklı tasarım kombinasyonları karşılaştırılarak; GÖ, YGMK değişkenleri ve Leed 4.0 kriterlerinin değişkenleri için optimum değerleri sağlayan tasarım çözümlerine ulaşılmıştır.
[5]	2020	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Cephe Tipleri:</b></li> <li>Kırmızı, mavi, yeşil, sarı ve renksiz tipte cam cepheler</li> <li>Orosi renklerini barındıran tipte cam cepheler</li> <li><b>Kullanıcı ve Güneş Pozisyonu</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Yararlı Günişliği Aydınlanması [YGA/UDI]</li> <li>Günişliği Özerkliği [GÖ/sDA]</li> <li>Günişliği Parlama Olasılığı [GPO/DGP]</li> <li>Aşılıymış Faydalı Günişliği Aydınlığı [AFGA/EUDI]</li> </ul>	Orosi renkli cam entegre edilmiş interaktif kinetik cephe tasarımının modüllerinde parametrik ve hiyerarşik dönme hareketi gerçekleştiren kinetik dönüşümün farklı konfigürasyonlarıyla, kullanıcı ve güneş pozisyonu parametrelerine bağlı olarak optimum günişliği performansı gösteren tasarım çözümleri bulunmuştur.
[6]	2021	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Cephe Tipleri:</b></li> <li>Kinetik Cephe 1 (Dönme)</li> <li>Kinetik Cephe 2 (Kayma)</li> <li><b>Cephe Morfolojileri:</b></li> <li>4x1 grid bölünmesi</li> <li>8x1 grid bölünmesi</li> <li>12x1 grid bölünmesi</li> <li><b>Cephe Yönlendirmeleri:</b></li> <li>3 farklı yönlenme durumu</li> <li><b>Kullanıcı ve Güneş Pozisyonu</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mekânsal Gün Işığı Özerkliği [GÖ/sDA]</li> <li>Günişliği Parlama Olasılığı [GPO/DGP]</li> <li>Yararlı Günişliği Aydınlanması [YGA/UDI]</li> <li>Aşılıymış Faydalı Günişliği Aydınlığı [AFGA/EUDI]</li> </ul>	Tasarımında bitkilerdeki stoma yapısından ilham alınan ızgaralı kinetik cephe modelinin; dönme ve kayma kinetik dönüşümleri, morfolojiyi oluşturan grid bölünmesi ve cephe yönlendirmesinin farklı konfigürasyonlarıyla, kullanıcı ve güneş pozisyonu parametrelerine bağlı olarak optimum günişliği performansı gösteren tasarım çözümleri bulunmuştur.
[7]	2016	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Güneş Pozisyonu</b></li> </ul>	Bu Bilgiye Ulaşılamamıştır	Dynamo ve Arduino yazılımları aracılığıyla, üretilen fiziksel model ve revit modeli arasında etkileşimli bir iş akışı oluşturulmuş ve günişliği parametresine bağlı olarak kinetik cephe bileşenlerinde optimum açılma dereceleri otomatik ve hiyerarşik bir kontrol sisteminde ayarlanmıştır.

[8]	2023	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Cephe Malzeme Özellikleri:</b></li> <li>• Yalıtım Kalınlığı (0.2-0.3 cm)</li> <li>• Pencere U değeri</li> <li>• Isı Kazancı Katsayısı (0.9-0.4)</li> <li>• Görünür Geçirgenlik</li> <li>• <b>Cephe Morfolojileri:</b></li> <li>• Geometri A (0.4-1 m)</li> <li>• Geometri B (0.4-1 m)</li> <li>• Geometri C (0.4-1 m)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Güneşli Faktörü [GF/DF]</li> <li>• Yıllık Güneşliğine Maruz Kalma [YGMK/ASE]</li> <li>• Mekansal Gün Işığı Özerkliği [GÖ/sDA]</li> <li>• Solar Radyasyon [SR]</li> <li>• Enerji Analizi-Isıtma / Soğutma (Kwh/m<sup>2</sup>a)</li> <li>• Görüş Kalitesi [GK]</li> </ul>	İki fazda gerçekleşen performansa dayalı tasarım ve optimizasyon sürecinde; ilk olarak farklı geometrik konfigürasyonlardaki tasarım varyasyonlarının değişen parametrelere göre analizi gerçekleştirilmiş olup sonraki aşamada Opossum aracı kullanılarak genetik optimizasyon yoluyla tüm yıl boyunca hesaplanan soğutma yükleri optimize edilmiştir. Bu optimizasyon işleminde, aynı morfolojik konfigürasyondaki ancak cephe malzeme özellikleri değişkeninin farklı değerlerine göre üretilen farklı tasarım varyasyonlarının karşılaştırmalı analizi yapılmıştır.
[9]	2023	Bu Bilgiye Ulaşılamamıştır	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leed değerlendirme kriterleri (Enerji verimliliği kriterleri dahil)</li> <li>• Solar Radyasyon [SR]</li> <li>• Rüzgar Basıncı [RB]</li> <li>• Güneşliğine Maruz Kalma [GMK]</li> </ul>	Cephe sisteminin önerildiği kule yapısının tepesine yerleştirilen rüzgar türbinleri ve gün boyunca güneş radyasyonundan yararlanmayı sağlayan cepheye entegre edilmiş fotovoltaik panel sistemi, çeşitli sensörleri barındıran merkezi bir kontrol sistemi ile yönetilmekte olup bu sistemlerin, bina performansını optimize etmek için BIM araçları aracılığıyla analizleri gerçekleştirilmiştir. Ortaya konan nihai tasarımın sonrasında alınan tasarım kararlarının geçerliliğine ilişkin tespitler yapabilmek amacıyla LEED sertifikası kullanılarak bir değerlendirme yapılmıştır.
[10]	2022	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Cephe Morfolojileri:</b></li> <li>• Yükseklik / SW (5-20 cm)</li> <li>• Uzunluk / LW (1-5 cm)</li> <li>• Kenar / W (1-10 cm)</li> <li>• Birleşim (3-10 cm)</li> <li>• Açılı (1-9 derece)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yararlı Güneşli Aydınlanması [YGA/UDI] (Leed 4.1 kriteri: UDI100-2000lx)</li> <li>• Güneşli Özerkliği [GÖ/sDA] (Leed 4.1 kriteri: sDA300/50%)</li> <li>• Yıllık Güneşliğine Maruz Kalma [YGMK/ASE] (Leed 4.1 kriteri: ASE1000,250)</li> <li>• Güneşli Parlama Olasılığı [GPO/DGP]</li> <li>• Görüş Kalitesi [GK]</li> </ul>	Erken tasarım aşamasında, çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı ve simülasyon araçları kullanılarak Leed 4.1 güneşli performans kriterlerinin optimum değer aralığını sağlayan ve cephenin farklı parametrik morfoloji konfigürasyonlarına dayanan tasarım modellerine ulaşılmıştır. Analizlere dayalı optimizasyon süreci sonunda Kenar (W) ve Yükseklik (SW) parametrelerinin güneşli performansında en etkili olduğu anlaşılmıştır.

[1]: Sankaewthong, vd. 2022; [2]: Sadegh, vd. 2022.; [3]: Mahmoud, Elghazi, 2016.; [4]: Thanh, vd. 2021; [5]: Hosseini, vd. 2020.; [6]: Hosseini, vd. 2021; ; [7]: Shen ve Lu, 2016; [8]: Figliola, 2023; [9]: Haghghat, Sadeh, 2023; [10]: Khidmat, vd. 2022

Kinetik ve statik parametrik cephe tasarımları incelendiğinde, tasarım ve optimizasyon süreciyle alakalı 10 çalışmayı da kapsayan ortak parametreler belirlenmiştir. Bazı örneklerde (7-10.) bazı parametrelere (İklim/Konum; Uygulanan Mekan Tipolojisi/Ölçeği; Kinetik Dönüşümler; Değerlendirme Araçları; Optimizasyon Değişkenleri; Bağımlı-Bağımsız Değerlendirme Değişkenleri) ilişkin bilgiye ulaşılamamıştır. Belirlenen parametreler bağlamında kinetik ve statik parametrik cephe tasarım önerileri, tasarım ve optimizasyon süreci açısından analiz edilmiş olup yukarıdaki iki tabloya göre (Tablo 4 ve Tablo 5) değerlendirmesi ve değerlendirme sonucu elde edilen bulgular şu şekildedir:

- Kinetik ve statik parametrik cephe tasarımlarının güneşli performansı ve enerji etkinliği tasarım kriterlerine dayalı bağımlı değerlendirme değişkenlerinin yukarıdaki tabloda (Tablo 5) gösterilen; GÖ (sDA), GPO (DGP), AFGA (EUDI), YGA (UDI), YGMK (ASE), GF (DF), GYA, AS, GK, SR, RB, GMK ve Leed 4.0-4.1 değerlendirme kriterleri olduğu gözlemlenmiştir. Değişkenlerin, yapılan simülasyonlar ve analizler sonucu hesaplanan değerlerinde optimum seviyeye ulaşmak için, kinetik cephe modelinin yukarıdaki tabloda (Tablo-5) gösterilen bağımsız değerlendirme parametreleri konfigüre edilmiştir. Cephe tipleri, [1], [2], [3], [5] ve [6] numaralı tasarımlarda; cephe morfolojileri, [2], [4], [6], [8] ve [10] numaralı tasarımlarda; cephe yönelmeleri, [4] ve [6] numaralı tasarımlarda; kullanıcı ve güneş pozisyonu, [5] ve [6] numaralı tasarımlarda; mekan ölçüleri, [1] numaralı tasarımda ve cephe malzeme özellikleri ise [8] numaralı tasarımda değişkenleri konfigüre edilen parametrelerdir. Parametrelerin içerdiği konfigüre edilen alt tasarım parametreleri ve detayları, tabloda (Tablo 5) maddeler halinde gösterilmiştir.
- Kinetik cephe tasarımları arasından [5], [6] ve [7] numaralı olanlarda; tasarım optimizasyonu için güneş ve/veya kullanıcı pozisyonu parametresinin, diğer parametrelerle birlikte bağımsız değerlendirme parametreleri olduğu görülmüştür. Bu iki tasarımda kullanılan DIVA programının güneşli simülasyonları sonucunda analiz çıktıları oluşturulmuştur. Analiz çıktılarında gösterilen ve günün farklı saatlerindeki güneş ve kişi pozisyonları bağımsız değerlendirme parametrelerinin meydana getirdiği farklı senaryolara bağlı olarak değerleri değişen YGA, GPO, AFGA ve GÖ bağımlı değerlendirme değişkenleri bağlamında güneş kırıcı modüllerin kinetik dönüşümlerinde optimum konfigürasyonlar yapılmıştır.
- Kinetik ve statik parametrik cephe tasarımı ve optimizasyonu için kullanılan modelleme ve simülasyon yazılımlarının dışında, bu yazılımlar arasında bir arayüz işlevi görüp bağlantı sağlayan algoritmik paket ve



eklenti araçlarının da, güneşiği ve enerji etkinliğinin kriter olarak belirlendiği optimizasyon sürecinde önemli rol oynadığı anlaşılmıştır. Çalışma kapsamında belirlenen tasarımlar tabloda görüldüğü gibi (Tablo 4), parametrik modelleme ve tasarım aracı olarak Rhino Grasshopper ve Revit/Dynamo yazılımlarının kullanıldığı örneklerdir. Analiz sonucunda Optimizasyon sürecinde kullanılan farklı tasarım yaklaşımlarına ve araçlarına ilişkin bazı bulgular elde edilmiştir. Bunlar; [4] numaralı tasarım önerisinin optimizasyon sürecinde kullanılan Kompozit Hareket Optimizasyonu Dengeleme (BCMO) algoritmasının, güneşiği performansına yönelik optimal tasarıma ulaşmada etkili bir yöntem sunması, [7] numaralı örnekteki cephe tasarımı, üretilen sanal ve fiziksel model arasında Dynamo ve Arduino yazılımları aracılığıyla kurulan etkileşimli ve entegre iş akış mekanizmasında gerçek zamanlı ve simüle edilmiş güneşiği parametreleri bağlamında optimize edilmesi, [2] ve [10] numaralı örneklerde, çok amaçlı optimizasyon (MOO) yaklaşımı kullanılarak genetik algoritmalara dayalı optimizasyon gerçekleştirilerek optimal tasarım çözümlerine ulaşılması ve [8] numaralı örnekte Opossum eklenti aracı kullanılarak hızlı hesaplamalı, verimli ve aynı anda birçok hedefin aranmasına olanak tanıyan bir mekanizmada optimizasyon sürecinin yürütülmesi olarak sıralanmaktadır.

- Kinetik ve statik parametrik cephe tasarımlarında, biçim grameri ve genetik algoritmalar tasarım sistemlerinin gerektirdiği teknik ve stratejiler kullanılarak güneşiği performansına bağlı kullanıcı konfor seviyesini arttırmak ve sadece [4] ve [10] numaralı örneklerde olmak üzere, Leed 4.0 ve 4.1 kriterlerinin değerlerini optimum düzeyde karşılayan tasarım çözümlerine ulaşmak hedeflenmiştir. Ayrıca bu hedefler doğrultusunda tasarlanacak olan kinetik cephenin tasarım ve optimizasyon sürecine [1] numaralı örnekte, dijital fabrikasyon ile yapım prosedürü de eklenmiştir. Bu prosedürde, tasarım modelinin prototipi üretilerek modelin gerçek ortamda güneşiği performans testleri gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sürecinde sanal modelin yanında fiziksel modelin de kullanıldığı diğer tasarımlar ise [7] ve [10] numaralı örneklerdir. Optimizasyon sürecinde fiziksel model veya prototip kullanılmasının performansa dayalı optimum cephe tasarımında oldukça etkili olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin [1] numaralı örnekte, simülasyon sonrasında ortaya konmuş tasarım varyasyonlarında belirlenen malzemelerin ve kinetik performansının gerçek koşullardaki durumunun test ve doğrulama işlemi gerçekleştirilerek; [7] numaralı örnekte, hem anlık mikro iklim değişikliklerini hem de mevsimin kalıcı kısıtlamalarını karşılayabilen tasarım varyasyonları bulunarak; [10] numaralı örnekte ise yerinde ölçüm yoluyla parametrik cephenin performans deneyi yapılarak optimizasyon süreci desteklenmiştir.
- Analizi yapılan kinetik cephe tasarımlarında ortak temel hedef olan cephede güneşiği performansını arttırarak kullanıcılar için konforlu bir iç ortam yaratmak, tasarımların her birinde benimsenen farklı yaklaşım ve stratejilerle sağlanmıştır. Genetik algoritma üretken tasarım sistemi kullanılarak ortaya konan modellerden [1] numaralı örnekte, morfolojik tasarımında DNA yapısından ilham alınan kinetik cepheyi oluşturan hareketli panellerin dönme ve kıvrılma; [2] numaralı örnekte, üçgensel grid örgüsü oluşturan güneş kırıcı panellerin dönme ve bükülme; [6] numaralı örnekte, bitkilerin stoma yapısından ilham alınarak tasarlanan ızgara düzenindeki kinetik cephe panellerin dönme ve kayma; biçim grameri üretimsel tasarım sistemi kullanılarak üretilen modellerden [3] numaralı örnekte, altıgen tessalasyonlu cephe panellerinin dönme ve ötelenme; [4] numaralı örnekte, üçgen tessalasyonlu gridal örüntüyü oluşturan origami tabanlı modüllerdeki panellerin, dönme ve katlanma; [5] numaralı örnekte, renkli orosi cam panellerin entegre edildiği üçgen örüntülü bileşenlerin dönme ve [7] numaralı örnekte ise üçgen bileşenlerin katlanma hareketi gerçekleştirilmesiyle cephede kontrollü ve verimli güneşiği geçirgenliğinin sağlandığı anlaşılmaktadır. [8] ve [10] numaralı örneklerdeki optimizasyon süreci, bu örneklerin statik parametrik cephe sistemleri olmaları sebebiyle kinetik dönüşüm parametreleri yerine cephe morfolojisindeki dinamik konfigürasyonlarla gerçekleşmektedir. [9] numaralı örnekte ise, kinetik cephe tasarımı ortaya konmuş olduğu görülmüş ancak cephe modüllerindeki kinetik dönüşüm mekanizmasına dair bilgiye ulaşılamamıştır.
- Performansa dayalı cephe tasarımında değerlendirme kriteri olarak güneşiği performansının barındırdıkları tasarım ve optimizasyon süreciyle tüm örneklerde, enerji etkinliği kriterinin ise yalnızca [4], [8] ve [9] numaralı örneklerde karşılandığı gözlemlenmiştir. [4] ve [9] numaralı örneklerdeki tasarımların Leed 4 ve 4.1 enerji etkinliği kriterlerine göre değerlendirmesi yapılmış olup Autodesk Insight aracılığıyla enerji analizi ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. [8] numaralı örnekteki enerji etkinliği analiz ve simülasyon sürecinde ise, Energyplus ve Openstudio araçlarının, Ladybug ve Honeybee eklenti araçları ile beraber kullanıldığı görülmüştür.
- Kinetik cephelerin tasarım ve optimizasyon sürecinde statik parametrik cephelerden farklı olarak morfolojik tasarımın yanında kinetik dönüşüm parametresine bağlı olarak da farklı tasarım konfigürasyonlarının üretilebildiği ve bu yönden statik cephelere göre daha fazla çeşitlilikte ve esneklikte performansa dayalı tasarım çözümlerinin ortaya konduğu gözlemlenmiştir. Ancak kinetik cephe tasarımındaki form bulma aşamasında, kinetik mekanizmalarının yarattığı sınırlamalardan dolayı morfolojik (biçimsel) tasarım ve optimizasyonda zorluklar ortaya çıkmaktadır.

## 6. SONUÇLAR

Kinetik cephe sistemlerinin; iklimsel koşullara ve kullanıcı taleplerine, bileşenlerinde meydana getirdiği geri dönüşümlü dinamik etki ile gerçek zamanlı tepki vererek kullanıcıların günışığına bağlı konfor seviyesini arttırması olarak tanımlanan uyarlanabilme özelliği ve günışığını verimli kullanıp binanın enerji korunumuna katkısı gibi avantajlarından dolayı cephede güneş kırıcı bir kabuk olarak efektif bir alternatif sunduğu ve gelecekteki cephe tasarımları için de geliştirilebilir potansiyeller taşıdığı, yapılan araştırmalar ve örnek analizleri sonucunda anlaşılmıştır. Mekanik, elektronik donanımları veya akıllı malzemeleri barındıran bu sistemlerin otomasyona, kullanıcı etkileşimine veya her ikisine birden dayanan kontrol stratejileri, dışsal (mekanik-elektronik aktüatör bulunduran akıllı sistemler) veya içsel (akıllı malzemeler) kontrol sistemlerinin yönetim ve işletim mekanizmasını belirlemekte olup bu kontrol mekanizması ve barındırdığı diğer teknolojik donanımlar sayesinde kinetik cephe sistemi, iç ve dış çevre koşullarıyla etkileşime girip uyarlanabilirlik fonksiyonlarını gerçekleştirebilmektedir. Bu uyarlanabilirlik fonksiyonları çalışma kapsamında belirlenmiş olan, enerji etkinliği ve günışığı performansı olarak temelde ikiye ayrılan sürdürülebilir tasarım kriterlerine dayanmaktadır. Yapılan literatür taramalarından ve örnek analizlerinden elde edilen bulgulara göre bu fonksiyonları; kullanıcı-güneş pozisyonuna uyum göstererek günışığını filtreleme, fazla günışığı kazancını engelleme, günışığı enerjisini depolama, elektrik enerjisi üretme, günışığını yönlendirip dengeleyerek faydalı aydınlatma oluşturma, kamaşmayı önleme ve bağımsız günışığı kullanımını sağlama olarak özetlemek mümkündür.

Konu ile ilgili yapılan literatür taramaları ve örnek analizleri sonucu kinetik cephe tasarım sürecinin; parametrik ve algoritmik tabanlı modelleme, simülasyon ve analiz gibi işlemlere sahip yazılımların birbiriyle entegre ve senkronize bir ilişkide çalışan sisteminin oluşturduğu birbirine bağlı farklı prosedürlere sahip ve bu prosedürlerin hangi aşamasında bulunduğu fark etmeksizin geri aşamalara dönülerek, tasarımcı kontrolünde model üzerinde yapılan gerekli konfigürasyonlarla tasarım optimizasyonlarının gerçekleşebildiği esnek bir süreç olduğu sonucuna varılmıştır. Bulgular ve tartışma bölümünde; Rhino/Grasshopper ve Revit/Dynamo tasarım araçları kullanılarak üretilen kinetik ve statik parametrik cephe tasarım örneklerinin, performans dayalı tasarımı ve tasarım süreci, ortak belirlenmiş parametreler bağlamında analiz edilmiş olup analiz sonucunda elde edilen bulgular üzerinden bu örnekler karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu bulgulardan hareketle ortaya konan tespit ve öneriler aşağıda verilmiştir.

- Kinetik cepheler daha iyi enerji ve günışığı performansı gösteren çözümler olabilmekte ancak bakımının zor ve maliyetli teknolojiler olması sebebiyle bu sistemlerin maliyet ve geliştirme açısından fizibilite ve uygulama/yapım süreci önem kazanmaktadır.
- BIM ortamındaki tasarım sürecinin, bu süreci oluşturan tasarım prosedürleri arasında geçişin yapılabilmesi ve prosedürlerde kullanılan araçların birbiriyle senkronize ve uyumlu ilişkisi sayesinde tasarımcılara; esnek, zaman ve maliyetten tasarruf sağlayan ve optimum tasarımların ortaya çıkmasına olanak tanıyan verimli bir tasarım ortamı sağladığı anlaşılmıştır.
- Kinetik cephe tasarım sürecinde kullanılan biçim/şekil grameri tasarım sistemlerinin; kinetik model tasarımında geleneksel motiflerin uyarlanabilmesi, kinetik dönüşümünde origami katlama tekniklerinin kullanılmasıyla yaratıcı çözümlerin sağlanması, deneme-yanılma yoluyla optimum tasarıma kısa sürede ulaştırarak değerlendirme mekanizmasına sahip olması, genetik algoritmalar tasarım sisteminin ise; optimum tasarım alternatifi için kısa sürede ve öngörülemeden çeşitlilikte varyasyon üreterek tasarımcıya daha fazla keşif ve değerlendirme imkanı tanınması, karmaşık yüzey ve geometrilerin oluşturulabilmesi ve doğadan ilham aldığı üretim biçiminin dijital ortamda algoritmik ve parametrik bir model üretme sistemi ile kullanışlı bir optimum tasarım türetme yöntemi sağlaması gibi tasarım sürecini verimli hale getiren ve kinetik cephe modeli üretimini kolaylaştıran özellik ve fonksiyonlarının olduğu tespit edilmiştir.
- Kinetik cepheler, mekana alınan günışığını ayarlayıp dengeleyerek kullanıcıların görsel ve termal konforunu arttırmanın yanında HVAC sistemlerinin kullanımının azaltılmasına sebep olarak binanın işletimi sürecindeki enerji verimliliğini de sağlamaktadır.
- Kinetik cephe sistemlerinin farklı dönüşüm tipleri vardır. Bunlar: Dönme, kıvrılma, bükülme, ötelenme, katlanma ve kayma dönüşüm tipidir. Cephede bu dönüşümlerin gerçekleşmesiyle günışığı performansı ve/veya enerji etkinliği sağlanmaktadır.
- İklimsel koşulların, biçim/şekil grameri veya genetik algoritmalar kinetik cephe tasarım sistemlerinden hangisinin kullanılacağına etkili olmadığı tespit edilmiştir. Aynı iklim koşuluna sahip projelerde, farklı kinetik cephe tasarım sistemi kullanıldığı görülmüştür. Bazı örneklerde görüldüğü gibi ([4] ve [5] numaralı örnekler), kültürel değerler ve geleneksel mimari elemanlar veya teknikler kinetik cephe sistemlerine modelin tasarım tekniği, malzemesi veya oluşturulma biçimi olarak uyarlanabilmektedir.

- Kinetik cephe tasarımlarının optimizasyon sürecinde kullanılan değerlendirme araçlarının analiz bölümündeki cephenin performans ölçütlerini oluşturan belirli bağımlı değerlendirme değişkenleri vardır. Bu değişkenlerin optimum değerlerinin sağlanması ile günışığı performansının artırıldığı ve cephenin enerji etkin tasarımına olumlu katkı sağlandığı gözlemlenmiştir.
- Tasarım optimizasyonu için konfigürasyonu yapılacak bağımsız değerlendirme değişkenlerinin: mekan ölçüleri, cephe tipleri, cephe morfolojileri, cephe yönlendirmeleri, kullanıcı/güneş pozisyonu ve cephe malzeme özellikleri parametrelerinin olduğu tespit edilmiştir. Cephe morfolojileri parametresindeki optimizasyon değişkenleri, morfolojinin niceliksel değerleri veya morfolojik (biçimsel) tasarımı olurken cephe tipleri parametresi içerisindeki kinetik dönüşüm alt parametresinde ise, kinetik dönüşümün tipleri ve niceliksel değerleri olduğu gözlemlenmiştir. Kinetik cephe tasarımındaki optimizasyonun, bu parametrelerdeki değişken değerlerinin ayarlanması ile bağımlı değerlendirme değişkenlerinde optimum değerleri sağlayan konfigürasyonların yapılması şeklinde sağlandığı anlaşılmıştır.
- Örnek analizi için farklı veri tabanları üzerinden yapılan kapsamlı araştırma sonucunda, bu konudaki literatürde yer alan çalışmaların büyük çoğunluğunun tasarım aracı olarak Rhino/Grasshopper araçlarının kullanıldığı örneklerden oluştuğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda literatürde Revit/Dynamo yazılımına dayalı kinetik cephe tasarımına ilişkin boşluk olduğu ve bu yönde daha fazla çalışmanın yapılması gerektiği; ayrıca örnekler arasında yer alan kinetik cephe tasarım yaklaşımı olarak dilsel temelli sistemlerin, biyolojik süreçlerin gerçekleştiği evrimsel temelli sistemlere göre oldukça fazla olduğu da gözlemlenmiş olup evrimsel temelli tasarım yaklaşımı ve bu yaklaşıma dayalı genetik algoritmalar üretken tasarım sistemlerinin de geliştirilmesi gereken bir alan olduğu ve bu yönde çalışmalar yapılması gerektiği önerilmektedir.

Uyarlanabilir bir sistem olan kinetik cephelerin barındırdığı avantajlarla, özellikle ofis mekanlarındaki şeffaf cephelere entegre edilebilecek efektif bir güneş kırıcı kabuk alternatifi olduğu ortadadır. Bu cephelerin katmanlarını oluşturan kontrol sistemleri, bu sistemlerde geliştirilen stratejiler, malzemelerinin ve diğer teknolojik donanımlarının tipleri, özellikleri ve fonksiyonları; kullanıcı/işveren/müşteri talepleri, çevresel faktörler ve tasarımcının sınırlamaları ile talepleri doğrultusunda belirlenmektedir. Kinetik cephelerin günışığı performansı ve enerji etkinliği tasarım kriterlerine bağlı uyarlanabilirlik fonksiyonunu optimum düzeyde gerçekleştirilmesi, prosedürleri eksiksiz ve doğru ilişkilerde kurgulanmış, tasarım süreci ve bu süreçte yeterli optimizasyonu yapılarak ve gerekli tasarım, modelleme ve değerlendirme araçlarının doğru kullanımı sağlanarak üretilmiş optimum tasarım modeli ile mümkün olmaktadır. Kinetik cephelerin tasarımında benimsenecek olan biçim/şekil grameri ve genetik algoritmalar sistemlerinin gerektirdiği araçlar, tasarım teknik ve yöntemlerinin ortaya konulacak olan tasarım için hedeflenen kriterlere bağlı olarak kombine edilip çeşitlendiği görülmüştür. Bu kullanılan yöntem, teknik ve araçların geliştirilmesiyle, kinetik cephe sistemlerinin tasarımdan kullanım sürecine kadar ortaya çıkabilecek problemlerin çözümünde yeni potansiyellerin keşfedilebileceği öngörülmektedir.

### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

### Yazar Katkısı Beyanı

Yazar-1: Fikir, Orijinal Taslak Oluşturma, Yazım, Revize, Metot Oluşturma, Deneysel Çalışma, Verilerin Düzenlenmesi, Sonuç ve Tartışma

Yazar-2: Revize, Metot Oluşturma, Sonuç ve Tartışma

### KAYNAKLAR

- Akipek, F. Ö., & İnceoğlu, N. (2007). Bilgisayar destekli tasarım ve üretim teknolojilerinin mimarlıktaki kullanımları. *Megaron Yıldız Teknik Üniversitesi E-Dergisi*, 2(4), 237-253.
- Albag, O., Anishchenko, M., Grassi, G., & Paoletti, I. (2020). Adaptive skins: towards new material systems. *Digital transformation of the design, construction and management processes of the built environment*, 209-219.
- Alkhatib, H., Lemarchand, P., Norton, B., & 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/10.1016/j.applthermaleng.2020.116331>
- Alkhayyat, J. (2013). *Design strategy for adaptive kinetic patterns: creating a generative design for dynamic solar shading systems*. (M.a. Thesis. Manchester: University of Salford School Of Build Environment MSc Digital Architectural Design). Manchester, England,

[https://www.academia.edu/6978438/Design\\_strategy\\_for\\_adaptive\\_kinetic\\_patterns\\_creating\\_a\\_generative\\_design\\_for\\_dynamic\\_solar\\_shading\\_system](https://www.academia.edu/6978438/Design_strategy_for_adaptive_kinetic_patterns_creating_a_generative_design_for_dynamic_solar_shading_system)

- Alotaibi, F. (2015). The role of kinetic envelopes to improve energy performance in buildings. *Journal of Architectural Engineering Technology*, 4(3), 149-153. DOI:10.4172/2168-9717.1000149
- Arida, S. (2004). *Contextualizing generative design*. (Doctoral dissertation. Massachusetts Institute of Technology). Cambridge, US, <https://core.ac.uk/download/pdf/4385734.pdf>
- Barozzi, M., Lienhard, J., Zanelli, A., & Monticelli, C. (2016). The sustainability of adaptive envelopes: developments of kinetic architecture. *Procedia Engineering*, 155, 275-284  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.029>
- Davis, D., Burry, J., & Burry, M. (2011, July). Untangling parametric schemata: enhancing collaboration through modular programming. *Proceedings of the 14th International Conference on Computer Aided Architectural Design*, University of Liege, Liege, 55-68.  
[https://www.researchgate.net/publication/228843549\\_Untangling\\_Parametric\\_Schemata\\_Enhancing\\_Collaboration\\_through\\_Modular\\_Programming](https://www.researchgate.net/publication/228843549_Untangling_Parametric_Schemata_Enhancing_Collaboration_through_Modular_Programming)
- Elkhayat, Y. O. (2014). Interactive movement in kinetic architecture. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 42(3), 816-845. DOI:10.21608/jesaun.2014.115027
- Elmokadem, A., Ekram, M., Waseef, A., & Nashaat, B. (2018). Kinetic architecture: concepts, history and applications. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 7(4): 750-758.  
DOI:10.21275/ART20181560
- Figliola, A. (2023). Digital workflow for climate resilient building façade generation. *Building Research & Information*, 51(3), 257-278. <https://doi.org/10.1080/09613218.2022.2121907>
- Formentini, M., & Lenci, S. (2018). An innovative building envelope (kinetic façade) with Shape Memory Alloys used as actuators and sensors. *Automation in Construction*, 85, 220-231.  
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.006>
- Fox, M. A., & Yeh, B. P. (1999 December). Intelligent kinetic systems in architecture. In *Managing Interactions in Smart Environments: 1st International Workshop on Managing Interactions in Smart Environments (MANSE'99)*, Dublin, 91-103.
- Güzer, C.A., Kahraman, İ., Kanan, N.Ö, Tombak, E., Kabakçı, O.K., Gül, K. (2016, Mayıs). *Bütünleşik bina tasarımı yaklaşımı ile proje geliştirme süreci uygulama kılavuzu*. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Çankaya, Ankara.  
<https://webdosya.csb.gov.tr/db/meslekihizmetler/ustmenu/ustmenu838.pdf>
- Haghighat, S., & Sadeh, H. (2023). Parametric design of an automated kinetic building façade using BIM: A case study perspective. *Journal of Building Engineering*, 73, 106800.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106800>
- Heidari Matin, N., & Eydgahi, A. (2022). Technologies used in responsive facade systems: a comparative study. *Intelligent buildings international*, 14(1), 54-73. <https://doi.org/10.1080/17508975.2019.1577213>
- Henríquez, D., Herrera, R. F., & Vielma, J. C. (2022). Method for designing prequalified connections using generative design. *Buildings*, 12(10): 1579. <https://doi.org/10.3390/buildings12101579>
- Hosseini, S. M., Mohammadi, M., & Guerra-Santin, O. (2019). Interactive kinetic façade: Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant's positions by 2D and 3D shape changes. *Building and Environment*, 165, 106396. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106396>
- Hosseini, S. M., Mohammadi, M., Schröder, T., & Guerra-Santin, O. (2020). Integrating interactive kinetic façade design with colored glass to improve daylight performance based on occupants' position. *Journal of Building Engineering*, 31, 101404. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101404>
- Hosseini, S. M., Mohammadi, M., Schröder, T., & Guerra-Santin, O. (2021). Bio-inspired interactive kinetic façade: Using dynamic transitory-sensitive area to improve multiple occupants' visual comfort. *Frontiers of Architectural Research*, 10(4), 821-837. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.07.004>
- Khoo, C. K. (2013). *Morphing architecture with responsive material systems* (Doctoral dissertation, RMIT University). <https://researchrepository.rmit.edu.au/esploro/outputs/doctoral/Morphing-architecture-with-responsive-material-systems/9921861599501341>



- Khidmat, R. P., Fukuda, H., Paramita, B., Qingsong, M., & Hariyadi, A. (2022). Investigation into the daylight performance of expanded-metal shading through parametric design and multi-objective optimisation in Japan. *Journal of Building Engineering*, 51, 104241. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104241>
- Knippers, J., Scheible, F., Oppe, M., & Jungjohann, H. (2012 July). Bio-inspired kinetic gfrp-façade for the thematic pavilion of the expo 2012 in yeosu. *International Symposium of Shell and Spatial Structures IASS 2012*, 90(6), 341-347. Seoul, South Korea. [https://www.researchgate.net/publication/311534824\\_Bio-inspired\\_Kinetic\\_GFRP-facade\\_for\\_the\\_Thematic\\_Pavilion\\_of\\_the\\_EXPO\\_2012\\_in\\_Yeosu](https://www.researchgate.net/publication/311534824_Bio-inspired_Kinetic_GFRP-facade_for_the_Thematic_Pavilion_of_the_EXPO_2012_in_Yeosu)
- Kolarevic, B. (2003). *Designing and manufacturing architecture in the digital age*. (1st ed.) Taylor & Francis <https://doi.org/10.4324/9780203634561>
- Le-Thanh, L., Le-Duc, T., Ngo-Minh, H., Nguyen, Q. H., & Nguyen-Xuan, H. (2021). Optimal design of an Origami-inspired kinetic façade by balancing composite motion optimization for improving daylight performance and energy efficiency. *Energy*, 219, 119557. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119557>
- Leach, N. (2009). Digital morphogenesis. *Architectural Design*, 79(1), 32-37. <https://doi.org/10.1002/ad.80>
- Loonen, R. C., Favoino, F., Hensen, J. L., & Overend, M. (2017). Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades. *Journal of Building Performance Simulation*, 10(2), 205-223. <https://doi.org/10.1080/19401493.2016.1152303>
- Ma, W., Wang, X., Wang, J., Xiang, X., & Sun, J. (2021). Generative design in building information modelling (BIM): approaches and requirements. *Sensors*, 21, 21(16), 5439. <https://doi.org/10.3390/s21165439>
- Mahmoud, A. H. A., & Elghazi, Y. (2016). Parametric-based designs for kinetic facades to optimize daylight performance: Comparing rotation and translation kinetic motion for hexagonal facade patterns. *Solar Energy*, 126, 111-127. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.12.039>
- Mallasi, Z. (2018). Using parametric BIM integration for prototyping future responsive façades. *Journal of Facade Design and Engineering*, 6(1): 89-100. <https://doi.org/10.7480/jfde.2018.1.1865>
- Megahed, N. A. (2017). Understanding kinetic architecture: typology, classification, and design strategy. *Architectural Engineering and Design Management*, 13(2): 130-146. <https://doi.org/10.1080/17452007.2016.1203676>
- Menges, A., & Ahlquist, S. (2011). *Computational design thinking: computation design thinking*. John Wiley & Sons.
- Nagy, Z., Svetozarevic, B., Jayathissa, P., Begle, M., Hofer, J., Lydon, G., Willmann, A., & Schlueter, A. (2016). The adaptive solar facade: from concept to prototypes. *Frontiers of Architectural Research*, 5(2), 143-156. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.03.002>
- Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27(3): 229-265. doi:10.1016/j.destud.2005.11.002
- Oxman, R., Gu, N. (2015 16-18 September). Theories and models of parametric design thinking. *Proceedings of the 33rd eCAADe Conference*. 2, 477-482, Vienna, Austria. DOI:10.52842/conf.ecaade.2015.2.477
- Panya, D. S., Kim, T., & Choo, S. (2020). A methodology of interactive motion facades design through parametric strategies. *Applied Sciences*, 10(4), 1218. doi: <https://doi.org/10.3390/app10041218>
- Radwan, G. A., & Osama, N. (2016). Biomimicry, an approach, for energy efficient building skin design. *Procedia Environmental Sciences*, 34, 178-189. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.017>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2011.07.004>
- Reichert, S., Menges, A., & Correa, D. (2015). Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness. *Computer-Aided Design*, 60, 50-69. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.010>
- Sadegh, S. O., Gasparri, E., Brambilla, A., & Globa, A. (2022). Kinetic facades: An evolutionary-based performance evaluation framework. *Journal of Building Engineering*, 53, 104408. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104408>
- Samir, H., Shahin, M. (2018). Adaptive building envelopes of multistory buildings as an example of high performance building skins. *Alexandria Engineering Journal*, 58(1), 346-348.

<https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.11.013>

- Sankaewthong, S., Horanont, T., Miyata, K., Karnjana, J., Busayarat, C., & Xie, H. (2022). Using a biomimicry approach in the design of a kinetic façade to regulate the amount of daylight entering a working space. *Buildings*, 12(12), 2089. <https://doi.org/10.3390/buildings12122089>
- 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 <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.01.005>
- Seyrek, C. I., Widera, B., & Woźniczka, A. (2021). Sustainability-related parameters and decision support tools for kinetic green façades. *Sustainability*, 13(18): 10313. <https://doi.org/10.3390/su131810313>
- Shen, Y. T., & Lu, P. W. (2016, March). The development of kinetic façade units with BIM-based active control system for the adaptive building energy performance service. *International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA* 517-526. DOI:10.52842/conf.caadria.2016.517
- Shen, Y. T., & Wu, T. Y. (2016 17-22 July). Sync-BIM: the interactive BIM-Based platform for controlling data-driven kinetic façade. *HCI International 2016-Posters' Extended Abstracts: 18th International Conference, HCI International Proceedings Part II*, 445-450, Toronto, Canada. DOI:10.1007/978-3-319-40542-1\_72
- Sherbini, K., & Krawczyk, R. (2004 December). Overview of intelligent architecture. *1st ASCAAD International Conference-Design In Architecture KFUPM*, 137-152. Dhahran, Saudi Arabia. <https://www.ascaad.org/conference/2004/pdfs/paper10.pdf>
- Soleimani, A. (2019 18-20 October). Computational Design Thinking and Thinking Design Computing. *2019 Reynolds Symposium: Education by Design*, Portland, US. <https://www.wiley.com/en-us/Computational+Design+Thinking:+Computation+Design+Thinking-p-9780470665701>
- Stevenson, C. M. (2011 March). Morphological principles: current kinetic architectural structures. *Conference: In Adaptive Architecture*, 1-12. Building Centre Trust and the University of Nottingham, London. [https://www.researchgate.net/publication/316885581\\_Morphological\\_Principles\\_of\\_Current\\_Kinetic\\_Architectural\\_Structures](https://www.researchgate.net/publication/316885581_Morphological_Principles_of_Current_Kinetic_Architectural_Structures)
- Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., & Tsangrassoulis, A. (2021). A review of occupant-centric control strategies for adaptive facades. *Automation in Construction*, 122, 103464. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103464>
- Tabadkani, A., Shoubi, M. V., Soflaei, F., & Banihashemi, S. (2019). Integrated parametric design of adaptive facades for user's visual comfort. *Automation in Construction*, 106, 102857. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102857>
- Wang, J., Li, J., Chen, X. (2010 17-19 December). Parametric design based on building information modeling for sustainable buildings. *2010 International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering*, 237-238. Chengdu, China. doi: DOI: 10.1109/ICCIS.2010.351
- Yekutieli, T. P., and Y. J. Grobman. (2014). Controlling Kinetic Cladding Components in Building Facades: A Case for Autonomous Movement. *The proceeding of 19th international conference of the association of computer-aided architectural design research in Asia*, Hong Kong. DOI:10.52842/conf.caadria.2014.129
- URL-1: <https://www.arkitektuel.com/fun-palace-cedric-price/> Erişim Tarihi: 16.04.2023
- URL-2: <https://www.arkitektuel.com/plug-in-city/> Erişim Tarihi: 16.04.2023
- URL-3: <https://www.imarabe.org/en/architecture> Erişim Tarihi: 16.04.2023
- URL-4: <https://nedkahn.com/portfolio/wind-veil/> Erişim Tarihi: 17.04.2023
- URL-5: <https://igsmag.com/features/case-studies/the-al-bahar-towers-shading-the-real-envelope/> Erişim Tarihi: 17.04.2023
- URL-6: <https://www.evolo.us/opening-of-the-thematic-pavilion-for-the-expo-2012-yeosu-south-korea-soma/> Erişim Tarihi: 17.04.2023
- URL-7: <https://arquitecturaviva.com/works/media-tic-building> Erişim Tarihi: 17.04.2023