

DERLEME MAKALESİ / REVIEW ARTICLE

KİNETİK SİSTEMLİ BİNA CEPHELERİNİN
MODELLEME YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİBetül KAHRAMANOĞLU¹¹ Mimarlık Bölümü, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Turkey
kahramanoglubetul@gmail.com, ORCID No: 0000-0002-7452-9084Neşe Çakıcı ALP²² Mimarlık Bölümü, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Turkey
nesecakici@gmail.com, ORCID No: 0000-0002-7626-9212

Geliş Tarihi/Received Date: 14.01.2021 Revizyon Tarihi/Revision Date: 28.05.2021

Kabul Tarihi/Accepted Date: 10.06.2021

Özet

Bir binanın mimari formu, cephenin çevreyle etkileşimini tanımlamaktadır. Etkileşimli bir bileşen olan kinetik cepheler, en uygun yönlendirmeyi ve yapılandırmayı tespit etmek için gerçek zamanlı hareketler kullanılmaktadır. Kullanıcı aktivitelerini ve davranışlarını öğrenerek ve bunlara uyum sağlayarak termal ve görsel konfor, yapay ışığı azaltma, güneş takibi ve elektrik üretme gibi fonksiyonlar sunmaktadırlar. Ancak kinetik cephelerin tasarlanırken amaçlanan performansın sonuç üründe elde edilmesinin sağlanabilmesi için doğru modelleme araçlarının ve yöntemlerinin seçilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, interaktif cephe geometrisi oluştururken en uygun yönlendirmeyi ve yapılandırmayı sağlayan, yüksek performanslı, çevreye duyarlı alternatifler tespit edilmesi için farklı modelleme yöntemlerinin uygulanması bir gereklilik haline gelmektedir. Bu çalışma çevre koşullarına ve tasarım ilkelerine uyum sağlayan çevre dostu kinetik sistemli bina cephelerinin modelleme yöntemlerini sunmaktadır. Çalışmada, ilk önce parametrik tasarımın kinetik cepheyle ilişkisi ortaya konulmuştur. Sonrasında, 2000'den 2020'ye kadar incelenen 20 çalışmadan elde edilen modelleme yöntemleri sunulmuş ve bu yöntemlerin avantajlarından bahsedilmiştir. Kinetik cepheleri parametrik tasarım ile modelleme yöntemlerinden yararlanılarak oluşturulan çalışmalar evrimsel tabanlı modeller ve şekil gramerleriyle oluşturulan modeller olarak 2 farklı modelleme yöntemi altında detaylı olarak incelenmiştir. Çalışma, parametrik tasarım ile oluşturulan kinetik cephe tasarımlarında en uygun cephe geometrisine ulaşılabilmesi için uygulanabilecek modelleme yöntemlerine girdi oluşturmakta ve bir çerçeve sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Form Bulma, Kinetik Cephe, Kural Tabanlı Tasarım, Evrimsel Tabanlı Tasarım, Parametrik Tasarım

INVESTIGATION OF MODELING METHODS OF KINETIC SYSTEM BUILDING FACADES

Abstract

The architectural form of a building describes the interaction of the facade with the environment. Kinetic facades, an interactive component, use real-time movements to determine the optimal orientation and

configuration. By learning and adapting to user activities and behaviors, they offer functions such as thermal and visual comfort, artificial light reduction, sun tracking and electricity generation. However, when designing kinetic facades, it is necessary to choose the right modeling tools and methods in order to achieve the intended performance in the final product. For this reason, it becomes a necessity to apply different modeling methods to identify high-performance, environmentally friendly alternatives that provide the most appropriate guidance and configuration while creating interactive facade geometry. In the study, firstly, the relationship of parametric design with the kinetic front has been revealed. Afterwards, modeling methods obtained from 20 studies examined from 2000 to 2020 were presented and the advantages of these methods were mentioned. The studies created by using the methods of modeling kinetic facades with parametric design have been examined under two modeling methods as evolutionary based models and models created with shape grammars.

Keywords: Form Finding, Kinetic Facade, Rule Based Design, Evolutional Based Design, Parametric Design

1. GİRİŞ

Mimari çoğunlukla çevresindeki değişen ortama ve konumunun özel koşullarına tepki vermeden statik, değişmeyen ve katı bir unsur olarak algılanmaktadır (Kormaníková, vd., 2017). Sürekli değişen ve gelişen fiziksel çevrede mimarlığın en önemli sorumluluklarından biri kullanıcılara yaratıcı, sosyal, çevresel ve estetik bilgilerini genişletme fırsatları sunan bir ortam oluşturmaktır. Bu türden esnek ve etkileşimli mimari, kullanıcılar ile çevre arasında karşılıklı etkileşimin olduğu mekanlar tasarlayarak sağlanabilmektedir (Asefi, 2012). Mimari tasarıma sayısal yaklaşım, malzeme girdilerindeki ve hatta dış girdilere şeklindeki değişikliklerle tepki veren mimari prototipler oluşturmanın mümkün olduğunu göstermektedir. Uyarlanabilir sistemler, ayarlanabildiklerinden, bireysel kontrol, optimum gölgeleme ve gün ışığı kullanımının en üst düzeye çıkarılmasına izin verebileceğinden sabit sistemlerden daha ziyade dinamik sistemlere olanak sağlamaktadır (Hosseini vd., 2019b).

Sayısal tasarım araçlarının potansiyeli, mimari geometrilerin ve yapıların geliştirilmesi olanaklarını incelemek için büyük ölçüde kullanılmaktadır (Hosseini vd., 2019a). Sayısal tasarım araçlarının potansiyeli kullanılarak geliştirilen kinetik cephe sistemleri, bina kabuğu sektöründeki mevcut ihtiyaçları karşılayan yenilikçi bir çözüm olarak görülmektedir. Son birkaç yılda, hızla renk ve biçim değiştirebilen ve bina enerji tasarrufunu artıran, iyi bir ısı yalıtımı sağlayan ve binanın üretim maliyetlerini düşüren kinetik cephe sistem tasarımları görülmektedir (Cimmino vd., 2016).

Bu çalışmanın amacı literatürde anlatılan örnekler üzerinden, çevre koşullarına ve tasarım ilkelerine uyum sağlayan çevre dostu kinetik cephelerin modelleme yöntemlerini incelemektir. Aynı zamanda kinetik olarak oluşturulan bina cephelerinin faydaları, modelleme yöntemleri ve işlevsel avantajları araştırılmıştır. Çalışmada, ilk önce parametrik tasarımın kinetik cepheyle ilişkisi ortaya konulmuştur. Sonrasında, incelenen çalışmalardan elde edilen modelleme yöntemleri sunulmuş ve bu yöntemlerin avantajlarından bahsedilmiştir.

2. PARAMETRİK TASARIM İLE KİNETİK CEPHE

Kinetik mimari terimi, hareketle üretilen binaların tasarımını ifade etmektedir. Birçok tanıma sahip olan kinetik mimari, değişken hareketlilik, konum ve / veya geometriye sahip binalar ve / veya yapı bileşenleri ya da dönüşen ortamlar, duyarlı bina öğeleri veya etkileşimli kamusal alanlar olarak tanımlanabilmektedir (Fouad, 2012).

Duyarlı kinetik cepheler, değişen performans gereksinimlerine ve değişken sınır koşullarına yanıt olarak zaman içinde bazı işlevlerini, özelliklerini veya davranışlarını tekrar tekrar ve geri dönüşümlü olarak değiştirme yeteneğine sahip olanlardır ve bunu genel bina performansını iyileştirmek amacıyla yapmaktadırlar (Juaristi, 2020). Parametrik tasarım yöntemleri ve uygun algoritmalar yardımıyla, teknoloji doğrusal olmayan tasarım sistemine getirilmekte ve karmaşık geometriye sahip tasarım birden çok amaç için gerçekleştirilebilmektedir. Burada önemli olan çalışma prensiplerine uygun matematiksel bir çözüme ulaşmaktır. Hesaplama sistemleri her biri basit bir kurallar dizisine göre çalışan, önceki aşamasının sonuçlarını alarak ve bir işleve uygun olarak bir sonraki aşamaya dönüştürerek bilgileri ayrı bir adım dizisi aracılığıyla işleyen sistemlerdir (Chu, 2006).

Türk Dil Kurumu Sözlüğü'nde parametre, cebirde bir denklemin katsayılarına giren değişken nicelik olarak tanımlanmaktadır. Bilgisayar biliminde parametre, bir dizi komutun sisteme girilen çeşitli veriler üzerinde işlem yapmasıyla ilgili bir terimdir. Parametrik tasarım yöntemi, CAD/CAM sistemlerinde kısıtlılık (*constraint*) kavramı ile uygulanmaktadır. Kısıtlılık, bir nesne veya nesnel grubunun davranışını sınırlandıran bağlantılardır. Çizgilerin paralel veya dik olmaları, bir çizginin bir eğriye teğet olması, dairelerin eş merkezli olmaları, bir boyutun bir başka boyutun belirli bir katı olma zorunluluğu kısıtlılığa örnek olarak gösterilebilmektedir (Terzi, 2019).

Mimaride, bina cephelerinin tasarımında ilk tasarım stratejisi, statik özelliklere sahip barınak ve koruma sağlamaya odaklanan geleneksel bina cephelerini ifade etmektedir. İkincisi, cephenin yapısının veya mekanizmalarının tasarımının güneş ışığı, yağmur suyu ve benzeri çevre koşullarını depolama, yeniden kullanma, yanıtlama ve değiştirme önemli bir rol oynadığı teknik bina sistemlerini ifade etmektedir (Khosromanesh ve Asefi, 2019). Singh ve Gu, birçok bilgisayar destekli tasarım yönteminin geliştirildiğini belirtmişlerdir (Sing ve Gu, 2012). Bununla birlikte, tasarımda yaratıcılık açısından, birkaç tasarım yaklaşımının birlikte kullanılması daha verimli olmakta ve daha çeşitli ve yenilikçi sonuçlar vermektedir. Bilgisayar destekli tasarım yöntemleri mimari tasarım sürecinin yönünü değiştirebilmekte, yenilikler ve alternatif kombinasyonlar getirebilmektedir.

Çok fonksiyonlu olan kinetik cephe kavramları doğa, teknoloji ve mimariye göre tasarım problemlerini multidisipliner strateji ile çözmeyi amaçlayan karmaşık sistemlerdir. Parametrelere dayalı oldukları için tasarım sürecinde tasarım geometrisi üzerinde hesaplamalı kontrol sunmakta ve cephe fonksiyonu için uygun geometrinin saptanmasını sağlamaktadırlar. Bu nedenle kinetik cephenin modellenmesi ve değerlendirilmesi için bir gereklilik oluşturmaktadırlar.

Tasarımın ilk aşamalarında parametrik tasarımı kullanmak önemlidir. Grasshopper gibi scriptler* karmaşık modelleri çeşitli parametrelerle analiz etmek ve optimize etmek için kullanılmaktadır. Bir yapının mimari tasarım sürecinde tek tip bir algoritma veya programdan ziyade probleme, tasarımcıya ve diğer etkenlere göre değişen bir süreç görülmektedir. Kinetik cephe tasarım sürecini oluşturmak için dört unsur gerekmektedir. Bunlar; parametrelerin ve koşulların ayarlandığı girdi, algoritmalar ve kurallar dizisi kullanılarak üretim yapılan çıktı, tasarım alternatifleri üretme ve en verimli tasarımın seçilmesidir. Uyarlanabilirlikleri ve tasarım kriterlerini değiştirme yetenekleri, parametrik modelleri kinetik ve dinamik tasarımlar üretebilmek için yararlı kılmaktadır (Razzaghmanesh, 2015). Sürdürülebilir tasarımlar elde etmek için hem faydalı hem de estetik bir ürün elde etmeyi sağlamaktadır.

3. KİNETİK BİNA CEPHELERİNİN MODELLEME YÖNTEMLERİ

Parametrik modelleme, parametrelere dayalı olarak kurulan ve bu değerlerin değişimine izin veren, böylece sonuç biçimin parametrelerin kontrolü altında sürekli değişebildiği modelleme yöntemleridir. Parametrik modellemede tasarımı geometrik olarak sınırlayan kuralların belirlenmesi gerekmektedir (Akipek ve İnceoğlu, 2007). Son yıllarda kinetik cephelerin performansını araştırmak için, parametrik tasarım sistemlerinin kullanımıyla ilgili bazı deneysel ve simülasyon çalışmaları yapılmaktadır. Bu bölümde farklı kinetik cephelerin modelleme yöntemlerine yer verilmiştir. Çalışmalar tasarım yapılırken hangi kurallar dizisine bağlı kalındığını, bunların birbiriyle olan ilişki kurallarını tanımlamakta ve anlatmaktadır. Tablo 1. de bu çalışma için incelediğimiz literatürden elde edilen cephelere ait bilgiler aşağıda verilen sınıflandırmalara ayrılmıştır. Bunlar: cephenin kinetik sistemi, modelleme yöntemi, modelleme yöntemi araçları, konumu, karakteristik elementi, detayı, hareket tipleri ve fonksiyonlarıdır. Ayrıca cephe görselleri de tabloda verilmiştir. Geliştirilmekte olan bazı çalışmalar prototip halindedir ve birkaç çalışmanın da modelleme yöntemi araçlarına ulaşamamıştır. Kinetik cepheleri parametrik tasarım ile modelleme yöntemlerinden yararlanılarak oluşturulan çalışmalar 2 modelleme yöntemi altında incelenmiştir. Bunlar, evrimsel tabanlı modeller ve şekil gramerleriyle oluşturulan modellerdir. Evrimsel tabanlı modeller kendi içinde Genetik Algoritmalar (*Genetic Algorithms*), Voronoi Diyagramları ve Kendisini Organize Eden/ Kendiliğinden Oluşan Sistemler (*Emergent Architecture*) olarak 3 başlık altında incelenmiştir.

3.1 Evrimsel Tabanlı Modeller

Evrimsel sistemler, biyolojik büyüme ve biçimlenme konseptlerinin mimari tasarım süresinde, tasarıma model olarak kullanılmasıyla insanlar için sürdürülebilir çözümler üretmeyi amaçlayan sistemleri oluşturmaktadır (Akipek, 2004; Terzi, 2019). Evrimsel yöntemlerle geliştirilen genetik algoritmalar ile mimarlığın ilişkisi günümüzde araştırılmaya devam etmektedir. Evrim teorisindeki süreçler ve gelişen yeni teknolojiler düşünüldüğünde farklı oran ve süreçlerde oluşan mutasyonlarla daha geniş üretken bir topluluk oluşmakta, bu da sonuç ürünün çeşitliliğini artırmaktadır (Keskin, 2008). Bu sistemler geometrinin

* Script dilleri, sistem programlama dillerinden (C++, Pascal, vb.) farklı olarak özel görevler için tasarlanmış yapılardır. Sistem programlama dilleri sıfırdan başlayıp veri tabanları ve tasarlanmış algoritmalar ile yeni sistemler üretirler. Script dilleri ise, mevcut bir dilin alt bütünlerini kullanarak, bu bütünleri bağlamayı hedefler; kompleks algoritma ve veri yapıları için kullanılmaz. Script dillerinde uygulamayı hızlandırmak, tanımlanmış bütünleri bağlamayı kolaylaştırmak için söz dizim kuralları sadeleştirilmiştir. Script dilinde elemanların nasıl kullanılacağını ve bir araya geleceğini gösteren tanımlanmış kalıplar yoktur. (Keskin & Çolakoğlu, 2008).

ötesinde algoritmalara dayanmaktadır. Bitkiler, hayvanlar ve insanlarda dahil olmak üzere doğadaki çok çeşitli hareketli bileşenler, bina cephesi hareket ve dönüşümleri için uygulanabilirlik anlamında örnek teşkil edebilmektedir (Sheikh ve Asghar, 2019). Aynı zamanda biyomimikri olan adlandırılan bu sistemler, sürdürülebilir bina tasarımı için gerekli olan yapısal verimlilik, su verimliliği, sıfır atık sistemler ve enerji temini için geniş bir çözüm yelpazesi sunmaktadır. Aşağıda literatürde incelenen örnekler bu bakış açısıyla anlatılmıştır. Bu örneklerde genel olarak tasarlanan formlar temel bir başlangıç formunun belirli geometrik kurallarla türetilerek karmaşık bir yapıya dönüşmesinden oluşmaktadır.

3.1.1 Genetik Algoritmalar (*Genetic Algorithms*)

Evrimsel mimari yaklaşımında temel alt kavram olan genetik algoritmada, doğada canlıların oluşumunda ve biçimlenmesinde yönlendirici olan genlerin işlevini algoritmalar ve kodlar almaktadır. Genetik algoritmalar kural dizili bir yapıya sahiptir. Parametreler işlenmekte ve değerleri tasarım boyunca değişmektedir (Akipek, 2004). Khosromanesh ve Asefi (2019) tarafından buz bitkisinin açma / kapama mekanizmasındaki su gücünün etkisine dayanan cephe çalışmasının evrimsel modelleme yöntemiyle tasarlandığı görülmektedir. Rhino'ya eklenti görevi gören Grasshopper programı kullanılarak tasarlanan cephenin membranı hafif ve elastik malzeme kullanarak şeklini değiştirmektedir. Bu bitkinin seçilmesinde vanaları ıslak koşullarda açılan ve kuru koşullarda kapanan tohum kapsülünde çalıştırılmasının, tohum kapsül hareketinin fonksiyonel sürecinde güzel geometrik formların yaratıldığı estetik faktörüne sahip olmasının ve suyun etkisi altında şişen hidroaktüatörlü doku ve deforme edilebilirliğinin etkili olduğu görülmektedir. Temel modülün geometrisinin basit bir dikdörtgenden başlayıp son şekline kadar büyük adımlarla tasarlandığı görülmektedir.

Cephede, her vana birbirine bağlı aktif katman ve pasif katmandan oluşmaktadır. Açma işlemi sırasında sürekli olarak aktif durumdan pasif duruma deforme olmaktadır. Aktif durumda, valflerin zar dokusu şişmekte ve vanalar artan nem (H₂O) ile açılmaktadır. Pasif durumda, zar dokusu kuru koşullar nedeniyle (-H₂O) ile depolanan suyu kaybederek vanaların içe doğru büzülmesine neden olmakta ve kapalı pozisyon gerçekleşmektedir. Estetik faktörlerin yanı sıra bileşenin çevresel koşullardaki değişikliklere tepki olarak sürekli değişmeyi mümkün kılması çevresel koşulların iç mekân üzerindeki etkilerini kontrol etmektedir. Bu şekilde, enerji tasarrufu sağlayan bir mekanizma sunmaktadır (Khosromanesh ve Asefi, 2019).

Sheikh ve Asghar (2019), Oxalis kekik yaprağından ilham alan biyomimetik cephe çalışmasıyla evrimsel modelleme yöntemini kullanmaktadır. Çalışma güneş yolunu izleyerek açısını ve konumunu buna göre değiştirmektedir. Önerilen cephedeki her gölgeleme modülü dört gölgeleme panelinden oluşmaktadır. Modüller, karmaşık bir menteşe sistemi, kılavuz rayları ve elektrik motorları sistemi ile mevcut binaya bağlı olarak çelik bir çerçeve yapısı üzerinde x ve y ekseninde hareket ettirilmektedir. Tüm sistem sensörler, kontrolör ve enerji kaynağından oluşan bir geri bildirim sistemi ile kontrol edilmektedir. Güneş yolunu izlemekte olan sensörler her modülde bulunmaktadır. Tüm sistem aktif bir kontrol sistemi ile kontrol edilebilmekte ve ayrıca insan kontrolleri tarafından geçersiz kılınabilmektedir. Yatay gölgeleme konumu için gölgeleme cihazı cephenin y eksenini boyunca, dikey konum için ise x eksenini boyunca katlanabilmektedir. Ancak her iki eksende aynı anda katlanamamaktadır. Tasarım, dış ortamın görünürlüğünü engellemeden gölgeleme sağlamaktadır. Sayısal sonuçlar, binanın mevcut enerji yükünün, tasarlanan cephenin güçlendirilmesi ile %32'ye kadar azaltılabileceğini göstermektedir (Sheikh ve Asghar, 2019).

LIFT Architects (2017) tarafından sarı çiğdem çiçeğinin sıcaklık değişimine gösterdiği tepkiden ilham alarak evrimsel tabanlı bir prototipin oluşturulduğu görülmektedir. Cihaz, elastik kordonlarla tutturulmuş kare bir çerçevede dönmesine izin veren dört panelden oluşmaktadır. Her karşı panel, bir sensör ve bağımsız bir aktüatör olarak işlev gören bir Şekil Bellek Alaşımı (SMA) kablosu ile bağlanmaktadır. Teller, plakaları açmak için 65° C'nin altında dönüşecek şekilde tasarlanırken, elastik kordonlar plakaları kapatmak için soğuduklarında yumuşak bir şekilde geri düşmektedirler. Sonuçlar yeni ve mevcut binalarda pasif havalandırma yoluyla enerji giderlerini azaltmak için Hava Akışı Cihazı adı verilen prototipin kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Paneller SMA telinin malzeme özelliklerine göre açıldığından ve kapandığından, sistemi çalıştırmak için gerekli karmaşık sensörler, devreler veya işlem cihazları bulunmamaktadır. Bu, düşük bakım ve işletme maliyetleri anlamına gelmektedir. Hava Akışı Cihazının modülerliği hemen hemen her açıklığa uyacak şekilde kombine edilmesini sağlamakta ve mevcut binaları daha verimli hale getirmek için kullanılabilen veya yeni LEED sertifikalı yapılarda kullanılabilir (LIFT Architects, 2017).

Schleicher ve diğerleri (2015) tarafından çift kavisli cephelerin geometrik ve mekanik zorluklarla başa çıkacağını esnek gölgeleme cihazlarıyla göstermek için evrimsel tabanlı modelleme yöntemi kullanıldığı görülmektedir. Bu amaçla üç çalışma yapıldığı bilinmektedir. İlk çalışma cennet kuşu çiçeğinin tozlanma mekanizmasından esinlenmektedir. Bu bitkinin pasif ve otonom olmayan, nokta tahrikli bir harekete sahip olduğu için seçildiği görülmektedir. Bu hareket, bitkilerdeki elastik ve geri dönüşümlü bir mekanizmanın parçası olan kuş ağırlığının etkisi altında aşağı doğru bükülme özelliğidir. Kuş uçtuğunda, açık levrek tekrar kapalı duruma dönmektedir. İkinci çalışmanın suda yaşayan etçil su çarkı bitkisi Aldrovanda'dan esinlenerek kinetik yapı ile kaplandığı görülmektedir. Bu cephe bütün bir cephe olarak, dinamik gün ışığına uyum sağlamak için hidrolik ve çift yönlü hareket tiplerini kullanmaktadır. Ayrıca, modüler desenler iki boyutlu bir yüzeyde 0 ile 90° arasında döndürmekte, rozet modülleri ve panjurları güneşe duyarlı bir oryantal sistem üzerinde bulunmaktadır. Üçüncü çalışma daha önce kinetik bir yapıda uygulanmamış olup zambak çiçeğinin çiçeklenme mekanizmasından esinlenmekte ve tek yönlü harekete dayanmaktadır. Zambak çiçeği tomurcuğu açılmadan sıkı bir şekilde kapalı konumda bulunmaktadır. Zambak çiçek açıldığında, büyümenin neden olduğu stres tepeller arasındaki bağı çözerken tomurcuğun açıldığı hareket gerçekleşmektedir. Serbest bırakıldıklarında, bir eğrilik tersine dönerek dışı doğru bükülmekte ve çiçek geniş bir şekilde açılmaktadır. Çiçeğin sıcaklığı 70° C kadar arttırılarak %0.6 gerilmeye neden olmaktadır. Bu da tepeleri dışı doğru bükülmeye zorladığını göstermektedir. Sonuçlar, esnek malzemelerinin kullanılmasının, gerçek zamanlı şekil değişiklikleri ve form uyarlamaları ile farklı gün ışığında performansın artmasına ve farklı senaryolarda parlamının azalmasına neden olduğunu göstermektedir (Schleicher vd., 2015).

Benzer şekilde Schieber ve diğerleri (2017) tarafından kavisli cepheler üzerinde kalkan böceğinin kanadının katlanma modelinden esinlenen bir çalışma yaptığı görülmektedir. Böcek kanatlarının katlanma modellerinin matematiğini açıklamak için Flexagon modeli kullanılmaktadır. Böcek kanatlarındaki karmaşık desenin, kıvrımlı kanadı elytra altındaki çift kıvrımlı karın üzerinde verimli bir şekilde depolamak için tasarlandığı görülmektedir. Genel sistemin davranışını anlamak için, tamamen katlanabilen, tamamen açılabilen ve simetrik bir Flexagon konfigürasyonu seçildiği görülmektedir. Çalışmada, biyolojik rol modelde esneklikle yerel enerji depolaması dikkate alındığı için sistemde cam elyaf takviyeli plastik

(GFRP) kullanıldığı görülmektedir. Katlama çizgileri arasındaki açıların katlanma davranışı ve çalıştırma enerjisi üzerindeki etkisini değerlendirmek için, değişen açılara sahip modellerin test edildiği ve simüle edildiği görülmektedir. Sistem yerel olarak azaltılmış bükülme sertliğine sahip uyumlu menteşelerden oluşmaktadır. Menteşe bölgesi, katlama işlemi sırasında elastik enerjiyi depolayabilmekte ve rüzgâr yüklerine direnebilmektedir. Önerilen mekanizma hala erken bir tasarım aşamasında iken kalkan böceğinin konsept çalışması, yerel esnekliğe sahip malzemelerin kompozit yapının ince ayarıyla mümkün olduğunu göstermektedir (Scheiber vd., 2017).

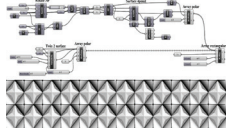
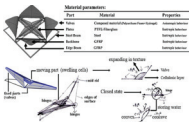

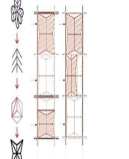
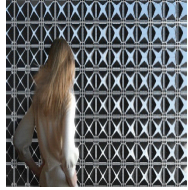
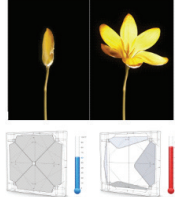
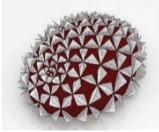
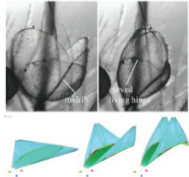
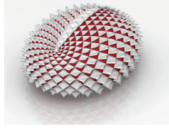
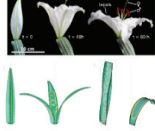
PTFE panelleriyle tüm cephe modeline dönüştürerek yapılan, biyolojik bir üretken sistem yaklaşımına sahip olan Al Bahar Kuleleri (2012) 'nin ise desen formalizmi için mangrove çiçek hareketinden etkilendiği görülmektedir. Modül desen morfolojisini oluşturan üçgenler arasındaki açıların ilişkilerini korumak için kosinüs formüllerinin bir denklem olarak kullanıldığı görülmektedir. Hareketli doğrama olan desenin ana elemanı desen ünitesinin dönüşümü gerçekleştiren, merkeze doğru dönen üç kanat dikenidir. Desen elemanı ile kanat dikenlerini birleştiren kilit eklemleri bulunmakta, omurga yukarı ve aşağı kanat açısı değiştikçe hareket etmektedir. Bu kinetik desen kanat dikenleri sadece Z eksenini olan bir boyutta dönüşmekte, onun hareketi ile kanat dikenleri iki boyutlu bir hareket yapmaktadır (Alkhayyat, 2013). Güneş ışınları sensörlerine çarptığı anda gölgeleme elemanları bir şemsiye gibi açılmakta ve akşam güneş battığında kapanmaktadır. Her bir gölgeleme cihazı, doğrudan güneş ışınmasını önlemek için günde sadece bir kez açılmakta ve kapanmaktadır. Önceden programlanmış doğrusal aktüatörler, tamamen açıktan tamamen kapalıya kadar beş farklı çalışma konfigürasyonuna izin veren elemanları etkinleştirmektedir. Sistem soğutma yüklerini %25'e kadar azaltmaktadır (Barozzi vd., 2016). Bu çalışmada binanın güneş ısı kazanımı ve soğutma yükü azaltılırken iç mekandaki görünürlük ve gün ışığı kalitesinden ödün verildiği görülmektedir.


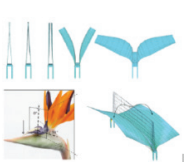
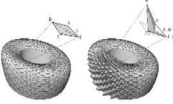
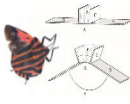
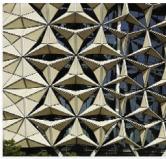
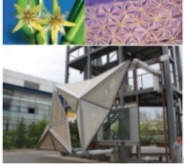
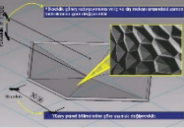

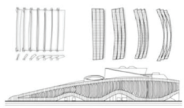

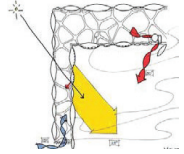

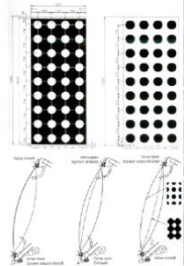
Yeosu Kore'de Expo 2012'de sergilenen Tematik Üst Örtü (2012)'nin, cephede gün ışığı koşullarını kontrol etmek ve aydınlatma etkilerinin estetik yönlerini göstermek için cennet kuşu çiçeğindeki kinetik sistemin elastik deformasyonundan esinlendiği görülmektedir. Tematik Üst Örtü, hareketli bir cephe deseni oluştururken güneşe maruz kalmayı sağlamakta ve ışık koşullarını kontrol eden cam elyaf takviyeli polimerlerin (GFRP) tek tek tabakalarından oluşmaktadır. Aktüatörler lamellerin hem üst hem de alt kenarlarında bulunmaktadır. Aktivasyon gücü, deforme olmuş panjurlarda depolanan elastik enerjiye dönüştürülmekte ve kapatma sırasında servo motorları elektrik jeneratörleri olarak kullanarak kısmen elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Bu sayede sistem enerji tasarrufu sağlamaktadır. Panjurların açılma açısı uzunluklarıyla ilgilidir. Lamel ne kadar uzun olursa aydınlatılmış alan o kadar büyük olmaktadır (Barozzi vd., 2016).

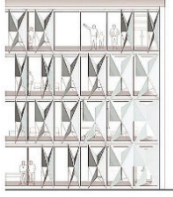
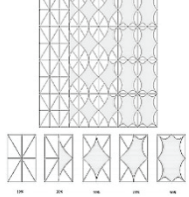
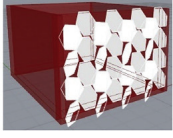
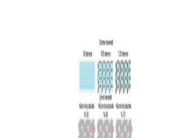
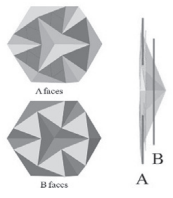
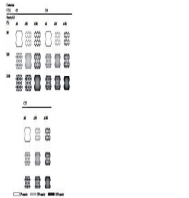

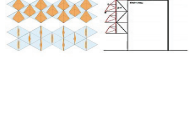

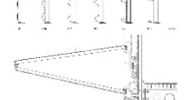
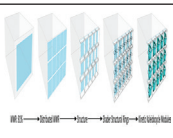
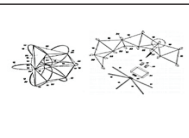
Wang ve diğerleri (2010) tarafından, kelebek kanatlarının petekli mikro yapısından ilham alan doğadan esinlenilmiş kinetik zarf sisteminin tasarlandığı görülmektedir. Sistem güneş radyasyonuna ve yerel iklim koşullarına yanıt vermemeyi amaçlamaktadır. Kinetik sistemin her altıgen yapısı, mevsimsel güneş ışınımına ve iç ve dış hava sıcaklık farkına göre içbükey, dışbükey ve düz olarak üç periyodik modele dönüşebilmektedir (Wang vd., 2010a). Kışın, içbükey altıgen yapı sayesinde paneller ısıyı iç mekâna iletmekte ve güneş ışığının daha fazla alınmasını sağlamaktadır. Ancak kışın gece vakti olduğu gibi güneş ışınımının olmadığı dönemde iç sıcaklık dış sıcaklığa göre daha yüksektir. Böyle dönemlerde her bir panel, yüzey alanını en aza indirmek ve ısı kaybını geciktirmek için pürüzsüz bir yüzeye dönüşmektedir. Bina sakinlerinin faaliyetlerinin iç ortam sıcaklığını arttırdığı durumlarda ise her panelin içeriden daha

fazla termal radyasyon emmesini ve ardından ısıyı dışarıya iletmesini sağlayan dışbükey hale getirilmesi gerekmektedir. Temel formül, panellerin yüksekliği, güneş radyasyonları, mevsimler, iç ve dış hava sıcaklığı parametrelerini içermektedir. Çalışmada diğerlerinden farklı olarak Autodesk Revit'in C programlamalı Uygulama Programlama Arayüzün (API) eklentisi kullanılmaktadır. Uygulama, sadece iç ve dış arasındaki sıcaklık farklılıklarına dayanmakta ve bina enerji verimliliği ve iç mekân termal konforu sağlamaktadır. Özellikle aşırı değişken iklime sahip lokasyonlarda, iklim ve yerel çevre ile yeni bir değişim ve iletişim yaklaşımı ile sürdürülebilir bina araştırmasını sunmaktadır (Wang vd., 2010b).

Tablo 1. Kinetik cephelerin modelleme yöntemi, modelleme yöntemi araçları, konumu, karakteristik elementi, detay, hareket tipleri ve fonksiyonlarına göre sınıflandırılması

Yazar	Kinetik Sistem Kaynağı	Yıl	Modelleme Yöntemi	Modelleme Araçları	Karakteristik Elementi	Detay	Hareket Tipi	Fonksiyon
Khosromanesh & Asefi	Buz Bitkisi	2019	GA	R G			K	DH ETA ST GP
Sheikh & Asghar	Oxalis Kekik Yaprığı	2019	GA	R I E			K D	GP PA
LIFT Architects	Sarı Çiğdem Çiçeği	2017	GA	FD			KA K	GP PA ETA DH
Schleicher ve diğ.	Aldrovanda Bitkisi	2015	GA	FEM			D K G & D	GP PA GE
Schleicher ve diğ.	Zambak Çiçeği (Lilium Casablanca)	2015	GA	FEM			D K G & D	GP PA GE

Yazar	Kinetik Sistem Kaynağı	Yıl	Modelleme Yöntemi	Modelleme Araçları	Karakteristik Elementi	Detay	Hareket Tipi	Fonksiyon
Schleicher ve diğ.	Cennet Kuşu Çiçeği (Strelitzia Reginae)	2015	GA	FEM			D K G & D	GP PA GE
Schieber ve diğ.	Kalkan Böceği (Grapho-Soma Lineatum)	2017	GA	FEM			KA	GP PA
Aedas Architects	Mangrove Çiçeği	2012	GA	R G			Ö D	GP PA
Wang ve diğ.	Kelebek Kanatları	2010	GA	RE			Ö	GP PA ETA
SOMA Lima	Cennet Kuşu Çiçeği (Strelitzia Reginae)	2012	GA	----			D K G & D	GP PA GE
PTW Architects & Ove Arup	Weaire-Phelan Köpüğü	2008	V	----			P/H G & D	GP PA ETA
Cloud 9 architects	Prnömatik Mekanizma	2010	ŞG	----			P/H G & D	GP PA

Yazar	Kinetik Sistem Kaynağı	Yıl	Modelleme Yöntemi	Modelleme Araçları	Karakteristik Elementi	Detay	Hareket Tipi	Fonksiyon
Matheou ve diğ.	Origami Katlama Tekniği	2020	ŞG	R G D EP			D KAY Ö	GP PA HM
Mahmoud & Elghazi	Altıgen Modüler Desen	2016	ŞG	R G D			Ç D KAY	GP PA
Pesenti ve diğ.	Ron Resch Origami Modeli	2015	ŞG	R G H EP			Ç K KA G & D	GP PA GE
Cimmino ve diğ.	Eşkenar Dörtgen Origami Modeli	2016	ŞG	----			KA G & D	GP PA GE EÜ
Giselbrecht & Partner Architects	Poligonal Cam	2007	ŞG	----			KA	GP GE
Tabadkani ve diğ.	Altıgen Kaleidyce Desenleri	2019	ŞG	R G H			D K KAY G & D	GP PA

Modelleme Yöntemleri_ Genetik Algoritma: GA, Kendiliğinden oluşan sistemler: K, Voronoi: V, Şekil Gramerleri: ŞG; Modelleme Araçları_ Rhinoceros: R, Grasshopper: G, Revit: RE, Ecotect: E, Insight: I, Fiziksel model üzerinde deneysel test: FD, FEM yazılımı: FEM, Diva: D, EnergyPlus: EP, Honeybee: H; Hareket Tipi_ Çeviri: Ç, Döndürme: D, Kapak: K, Katlama: KA, Kayma: KAY, Genişleme & Daralma: G&D, Ölçek: Ö, Pnömatik veya Hidrolik: P/ H; Fonksiyon_ Gün Işığı Performansı: GP, Parlamayı Azaltma: PA, Güneş Enerjisi: GE, Cephede enerji üretimi: EÜ, Doğal havalandırma: DH, Hafif Malzeme: HM, Enerji Tüketimini Azaltma: ETA, Su Tasarrufu: ST

İncelenen bu genetik algoritmaya sahip kinetik cephe modellerinde doğadaki hangi canlıdan esinlendiği ve hangi yaklaşımla tasarlandığının önemli olduğu görülmüştür. Non- Öklidyen geometri biçiminde yapılan

tasarımlar için en önemli ilham kaynağı tasarımları doğanın çalışma prensiplerini anlayarak modellemektir. Bunun için doğadaki canlıların (karınca, kuş, vb.) hareketleri incelenerek veya bitkilerin hareket, tozlaşma özelliklerinden ilham alarak tasarımlar yapılabilmektedir. Mimarlıkta organizma, davranış ve ekosistem olmak üzere üç düzey biyomimikri vardır. Organizma düzeyinde, mimari organizmanın formunu, şeklini veya yapısını bir binaya uygulamaktadır. Davranış düzeyinde biyomimikri, bir organizmanın çevresi ile nasıl etkileşime girdiğini, ona nasıl uyum sağladığını taklit etmeyi içermektedir. Ekosistem düzeyindeki biyomimikri, bir çevrenin çeşitli bileşenlerinin kentsel ölçekte birbirleriyle nasıl etkileşime girdiğini taklit etmeyi içermektedir (Sheikh ve Asghar, 2019). Tasarımcı yaptığı yapıda nasıl bir etki vermek istiyorsa bu düzeylerden birini, ikisini ya da üçünü aynı anda kullanabilmektedir. Örneğin Sheikh & Asghar'ın çalışmasındaki bina cephesinin tasarımı, organizma ve davranış seviyelerinde biyomimikrinin bir kombinasyonudur. Modülün temel formu yaprağın fiziksel görünümünden, işlevi ise yaprağın davranışından türetilmiştir. Oxalis Oregon bitkisinin yaprak damarlarının hiyerarşisi kullanılarak türetildiği ve bunların farklı damar açıları sayesinde güneş yolunu izleyebilen ve güneş yoluna göre farklı pozisyonlara katlanabilen modülü oluşturduğu görülmektedir.

3.1.2 Voronoi Diyagramları

Voronoi diyagramının ilk kez 1644 yılında Descartes tarafından bulunduğu, 1850 yılında ilk kez Dirichlet tarafından kullanıldığı, Rus matematikçi Voronoi'nin ise 1908 yılında diyagramı kullandığı bir algoritma geliştirdiği bilinmektedir (Terzi, 2019). Bir Voronoi diyagramı, yakınlık kriterlerine göre noktaları olan bir alanın ayrışmasıdır.

Pekin Ulusal Su Sporları Merkezi (2008)'nin yapı strüktürün Voronoi geometrisi prensibine dayanan evrimsel tabanlı bir tasarım olduğu görülmektedir. Su moleküllerinin mimari bir dille birleştirilmesi kavramından yola çıkıldığı bilinmektedir. Geometrik formu 3B alanda döşenen, döndürülen ve ardından eksenler boyunca dilimlenerek tekrar eden bir birimi temel almaktadır. Geometrik yapı tamamen düzenli olmasına rağmen, belirli bir açıdan bakıldığında tamamen rastgele ve organik görünmektedir. Bina kabuğu, kabarcık sisteminin gizemi ile suyun şeffaflığını sunmaktadır.

Pekin ulusal su sporları merkezi strüktürünün Weaire-Phelan köpüğü kullanılarak bir küp formu elde edildiği bilinmektedir. Kullanılan yöntemle minimum yüzey alanlarının eşit boyutlardaki hacimlere bölünebilmesi sağlanmaktadır. Bu minimum yüzeyli formun, yapı baloncuklarının bir modüler kafes modeli ile bağlanması sonucu sağlandığı görülmektedir. Bunlar aynı hacimlerde, oldukça idealize baloncuklardır ancak iki farklı düzensiz katının birleşmesinden oluşmaktadırlar. Cephe suyun katı hali gibi olmasına rağmen, akışkan hissettirmektedir. Teknik olarak; birçok katmandan oluşan ETFE (içi hava dolu, opak, plastik malzeme etilen tetrafluroetilen) yüzü karmaşık, hafif bir strüktür oluşturmaktadır. Duvarlar ve çatı örtüsü tek bir eleman olup, yatay ve düşey fonksiyonlara bölünmeyen bir organizma gibi çalışmaktadır. Strüktür ve cephe bütünleşmiş ve tek görülmektedir. Strüktürdeki sistematik değişikliğin, doğal ile üretilen arasındaki sınırların kaldırılmasıyla sağlandığı görülmektedir. Doğal maddelerdeki form, malzeme ve yüzey arasındaki karmaşık etkileşimler, biyomimetik endüstriyel süreçler ve yeni yüksek performanslı malzemeler türetilmesi buna olanak sağlamaktadır. Tasarımda sabun köpüğü şeklini taklit etmenin, %30 oranında enerji tasarrufu ve yapay aydınlatmada %55 oranında azalma sağladığı görülmektedir (Radwan ve Osama, 2016).

Güneş ışığına göre kasılma ve şişirme kullanan Media ICT Building (2010), ETFE tabakası, güneş ışığının varlığına dayanan ışık ölçer sensörleri ile pnömatik mekanizmalar tarafından tetiklenmektedir. Sistem hava odalarında şişirme ve deflasyon ekipmanını otomatik olarak ve bağımsız olarak harekete sağlamaktadır. Işık ölçerler enerji üretimi açısından bağımsızdır. Kaplama, cephede çok fazla güneş ışığına maruz kalan üç madde katmanından oluşmaktadır. Bu katmanların 2 boş oda oluşturmak için sensörler kullanılarak şişirildiği görülmektedir. ETFE'nin ilk katmanı saydamdır ancak ikinci ve üçüncü katmanlar, şişirildiğinde veya söndürüldüğünde cepheyi saydam veya opak hale getiren ters desen tasarımına sahiptir. Buna "ETFE Diyafram" yapılandırması denmektedir. Sistem, havanın cepheden girişini enerji verimliliği açısından uygun hedeflerle ayarlayabilmektedir (Shahin, 2019). Gölgeleme sistemi iç mekân konforunda %13,3 ile %26,9 arasında önemli bir artış sağlayarak ısıyı ve UV ışınlarını %85 oranında filtrelemektedir (Grobman vd., 2016). Bu örneğin modelleme yöntemine ulaşamadığıdır.

3.1.3. Kendisini Organize Eden/ Kendiliğinden Oluşan Sistemler (*Emergent Architecture*)

Karmaşık grup davranışlarını açıklayabilmek için, doğadaki kendi kendini organize eden sistemler, örneğin karıncaların yuva yapma süreci ya da kuş sürülerinin hareketi incelenmektedir. Görünüşte karmaşık olan bu grupların davranışlarının temeli aslında grupta işlev gören bir dizi temel, basit kurala itaat etmeye bağlıdır. Doğadaki bu karmaşık grup davranışları bilgisayar algoritmalarına dönüştürülmekte ve daha sonra mimari tasarımda kullanılmaktadır (Akipek, 2004).

İlk olarak 1940'larda tasarlanan ve 1990'larda bilgi teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte çoğalan çok etmenli modelleme kullanımı ilk kez 1987'de Reynolds tarafından kuş sürülerinin hareketini modellemek amacıyla kullanıldığı bilinmektedir. Reynolds'un Boids adı verilen modellemede sürü olarak hareket eden kuşların karmaşık hareketi ayırma, hizalama ve uyum olarak üç basit kurala bağlıdır. Ayırma kuralı, her kuş aynı yönde hareket ederken, birbirlerinden belirli bir mesafede kalmalarıdır. Hizalama kuralı, etmenlerin (kuşların) ortalama bir yöne göre yönlendirilmesidir. Uyum kuralı, etmenlerin ortalama konumlarına göre yönlendirilmeleri gerektiği anlamına gelmektedir (Çakıcı Alp, 2011).

Ağırbaş voronoi ve metaball geometrilerini sürü simülasyonu ile kullanarak öklid olmayan bir form ile ışık alımı arasında morfodinamik bir ilişki kurmanın mümkün olduğunu göstermektedir. Hem ışık dağılımı hem de ışık alımı, formun oryantasyonundan ve katı bölgeden büyük ölçüde etkilenmektedir (Ağırbaş, 2019). Rhino'ya eklenti görevi gören Grasshopper, Locust ve Diva programları kullanılmıştır. Voronoi ve metaball geometrileri sürü simülasyonu ile birlikte kullanılarak farklı formlar elde edildiği görülmektedir. Tasarımcı sonunda sonucu değerlendirmekte ve eğer bu beklentilerini karşılamazsa, parametre değerleri değiştirilmekte ve simülasyon yeniden başlatılmaktadır. Simülasyon süresince voronoi geometrisine bağlı tüm etmenler tarafından oluşturulan formları çeşitlendiği ve farklı şekiller ortaya çıktığı görülmektedir. Gün ışığı simülasyonları karşılaştırılarak 10x10 m'lik alanın ilk katı boşluk alternatifi kullanıldığında taban alanının %48'inin, Voronoi cephesi kullanıldığında %70'inin, metaball cephe kullanıldığında %40'inin aydınlatıldığı görülmektedir (Görsel 1).

		Euclidean geometry	Non-Euclidean geometries	
		Solid-void proportion alternative 1	Voronoi (54 agents, 30 s)	Metaball (54 agents, threshold: 8 unit, 30 s)
Façade alternatives (12 meters high*)				
Daylighting analyses (for the first floors' plans only**)	Visualization			
	Daylight area (DA _{500lx} [50%])***	48% of floor area	70% of floor area	40% of floor area
	Daylight factor (DF)	1.9%	3.6%	1.8%
	Daylight autonomy (DA)	47%	69%	41%
	Continuous daylight autonomy (cDA)	70%	85%	64%
Useful daylight illuminance (UDI)	UDI <100-2000lx	UDI <100-2000lx	UDI <100-2000lx	

Görsel 1. Farklı tipte cephe alternatiflerinin gün ışığını ortalama alımının karşılaştırması (Ağırbaş, 2019, s. 148)

Sonuç olarak belirtilen sınırlara göre, sürü zekasının kendi başlarına organizasyon sağladıkları ve böylece özerk bir sistem oluşturdukları görülmektedir. Bu sistemle ilgili formların voronoi ve metaball tabanlı oluşturulması, tasarımcıların daha önce tahmin edemediği özellikleri içeren, öklidyen olmayan geometriye sahip formların oluşmasını sağlamaktadır. Etmenler her yeni sürü simülasyonu sırasında kendilerini morfojenetik olarak organize etmekte ve bunun sonucunda form alternatifleri meydana gelmektedir. Voronoi'nin kullanıldığı cephede daha fazla ışık alımının nedeni, voronoi hücrelerinin çizgilerinin çok ince olmasından kaynaklanmaktadır. Bu çizgilerin kalınlıklarının parametreleri değiştirilirse, istenen miktarda ışığı boşluğa kabul etmek mümkün hale gelebilmektedir. Bu çalışmanın sonucu olarak bir cephe modeli bulunmamaktadır. Bundan dolayı tabloya eklenmemiştir. Fakat sürü simülasyonu ile cephe tasarımı yapıldığında ne kadar çok farklı form alternatifleri oluşabileceğini gösteren önemli bir örnektir. Aynı zamanda hem voronoi diyagramının hem de sürü simülasyonunun bir arada kullanıldığı evrimsel tabanlı hibrit bir modelleme çalışması örneği oluşturmaktadır.

Genel olarak doğadan esinlenen hesaplama olan Sürü Akıllı (Swarm Intelligence), son yirmi yılda büyük ilgi görmekte ve birçok SI tabanlı optimizasyon algoritması büyük bir popülerlik kazanmaktadır. Bu kadar popülerlik ve dikkatin en önemli nedeni SI tabanlı algoritmaların esnek ve çok yönlü olması ve doğrusal olmayan tasarım problemlerini gerçek dünya uygulamalarıyla çözmede çok verimli hale getirmeleridir (Yang ve Karamanoğlu, 2013).

3.2. Kural Tabanlı Modeller / Biçim Gramerleri (*Shape Grammars*)

Teknolojilerin ve dolayısı ile yazılımların gelişmesiyle birlikte geleneksel ve bilgisayar destekli tasarım yöntemlerinin bir alanı olan kural tabanlı tasarım yöntemleri üzerinde araştırma ve tartışmalar yapılmaktadır. Bunlar bilgisayar algoritmaları yardımıyla ya da benzer matematiksel ya da mekanik süreçlerle oluşturulan tasarımlardır. Belirli bir biçim grubundaki elemanların çeşitli kombinasyonlarının belirlenmesine dayalı alternatif çözümler araştırılmaktadır (Akipek, 2004). Kural tabanlı tasarım yöntemlerinden en çok kullanılan, biçim ve form üretmeye dayalı olan, 70'li yıllarda Geoerge Stiny ve Jim Gibs tarafından geliştirildiği bilinen biçim gramerleridir. Konu ile ilgili olarak yapılan ilk çalışma Stiny'nin 1977 de yazdığı "Ice-Ray: a note on the generation of Chinese lattice designs" isimli makalesidir (Keskin, 2008). Biçim gramerlerini diğer üretici tasarımlardan ayıran en önemli özellik, soyut sembollerle veya harflerle değil, biçimlerle tanımlanmasıdır. Kurallar matematik ve geometri temellidir. Biçim kurallarının oluşturulduğu elemanlar nokta, çizgi, yüzey ve masiftir. Biçimler arası ilişkiler ve üretmeler yapılırken kullanılan aritmetik biçim operasyonları basit aritmetik işlemlerle (toplama, çıkartma vb.) ve döndürme, yansıtma gibi temel öklid dönüşümleriyle tanımlanmaktadır. Biçim gramerleriyle geometride ilk kez "parametre" kavramına yer verildiği görülmektedir (Tok, 2008).

Gramer tabanlı analiz yönteminde kurallar tasarımcı tarafından manipüle edilebilmekte, yeni kurallar ekleyip, çıkarabilmekte veya mevcut kuralları değiştirerek yeni bir tasarım grameri oluşturabilmektedir. Biçimlerin seçimi ve biçimler arası ilişkilerin geometrilerine göre belirlenmesi tasarım probleminde, programına ve tasarımcının yorumuna göre belirlenmektedir. Biçim grameri kural tabanlı olmasına rağmen esnek ve değişime açık bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

Çalışmanın bu kısmında, incelediğimiz literatürden elde edilen cephelerde modüler elemanlar kendi yüzey konfigürasyonları ile form oluşumuna katkıda bulunan kural tabanlı modelleme yöntemlerini kullanmaktadır. Bu cepheler kinetik elemanlarının konfigürasyonunu katlama, çevirme, döndürme, kayma, ölçeklendirme, genişletme ve çıkarma gibi farklı hareket türleriyle değiştirebilmektedirler.

Matheou ve diğerleri (2020), şeklin genişlemesine, büzülmesine ve bükülmesine izin veren dinamik özellikleri nedeniyle origami modelini kullanmaktadır. Tasarım, her biri membran ile doldurulmuş 8 origami üçgeninden oluşan birimleri tutan bir alüminyum çerçeve yapısından oluşmaktadır. Ünitelerin açık alanları havanın iç mekâna girip çıkmasına izin vermektedir. Ünitenin dönüşümü, kasnakların yönlendirme sisteminden geçen ve ünitenin üst ve alt kenarlarına sabitlenmiş ikincil bir sürekli kablo sistemi ile gerçekleştirilmektedir. Kabloları çekerek veya serbest bırakarak ünite farklı ara konfigürasyonlara dönüşmeyi başarmaktadır. Temel tasarım konsepti, hafif tekstil yüzeyinin dönüştürülebilirliğine dayanmaktadır. Sekiz destek noktasında kenar kablolarının uzunluğunun kontrol edilmesiyle membran farklı şekillerde ayarlanabilmektedir. Mekanizma, güneş ışığının iç ortama gerektiği kadar nüfuz etmesi için genişleyerek yansıtılan alanda bir artış sağlamaktadır (Matheou vd., 2020).

Mahmoud ve Elghazi (2016)'nin yaptığı altıgen modüler desenlere sahip kinetik cephe çalışması gün ışığı performansının iyileştirilmesini amaçlamaktadır. Araştırma, Rhino, Grasshopper ve DIVA olmak üzere üç farklı dijital aracın bir entegrasyonunu sunmaktadır. Temel model olarak yan aydınlatmalı bir ofis alanı inşa edildiği görülmektedir. Kinetik deri, tamponlu iç tabaka ile birleştirilmiş bir gölgeleme perdesi olarak

işlev gören çift cephe tipinde bir dış tabakadan oluşmaktadır. İstenen performans sonuçlarına ulaşabilmek için altıgen birimlerin hareket türlerinin değiştirildiği görülmektedir. Dönme hareketinde altıgen birim, 15 derecelik bir adım boyutu ile 30 ila 165 derece arasında değişen merkez eksenini etrafında dönmektedir. Öteleme hareketinde, birim tamamen açılmak üzere merkezden merkeze hareket ederek diğerinin üzerinde kaymaktadır. Dönme hareketinin öteleme hareketinden daha iyi aydınlatılmış alanlar ve daha iyi aydınlatma seviyeleri sağlamaktadır (Mahmoud ve Elghazi, 2016).

Tabadkani (2019)'nin, altıgen kaleidocycle desenleri ile uyarlanabilir kinetik cephede origami tekniği ve kombinasyonlarında yatan kural tabanlı bir form bulma çalışması gerçekleştirdiği görülmektedir. Temel konsept, üçgen modellerin istenmeyen gün ışığını kontrol etmek için merkezleştirilebildiği zamanlama eğrilerine dayalı eklem yer değiştirmeleridir. Çalışma, Rhino / Grasshopper, Honeybee, Radiance ve Daysim entegrasyonuna sahiptir. Gün ışığı performansı ve parlama olasılığına ulaşılacak amaçtır. Önerilen altıgen kaleidocycle kabuğu, üçgen ve altıgen desenlerin bir karışımı olan tekrarlayan altı kaleidocycle halkasından oluşmaktadır. Her modül, tüm camlı cepheyi kaplamak ve yapısal performans sağlamak için ilginç bir dönme hareketi oranı ve geometrik oranlar sağlama potansiyeline sahiptir. Dişli kutularının yapısal konumlandırması ve zamanlama hareketi her bir geometrinin belirli bir coğrafi konumlandırma ve sisteme uygulanabildiği ayrı bir geometriye dönüşmektedir. Her bir yapısal halkanın içindeki yerleştirilebilir kabuk panellerinin her birine komut verebilecek şekilde tasarlandığı görülmektedir (Tabadkani, 2019).

Pesenti ve diğerleri (2015), origami modeli şekil hafızalı alaşım (SMA) aktüatörlerinin deformasyonu ile görsel konfor ve enerji verimliliği etkisini gösteren kural tabanlı bir modelleme yöntemiyle çalışma yapmaktadırlar. Kinetik sistemin bir ofisin güneşe bakan pencerelerine uygulandığı görülmektedir. Modülü oluşturmak için origaminin oranları korunarak şeklin basite indirildiği görülmektedir. Basitleştirilmiş desen, kasılma oranını ve malzemelerin iki katmanı (A, B) için opaklığını değiştirerek yeniden üretildiği görülmektedir. Bu varyasyon yirmi yedi konfigürasyon oluşturmaktadır. Ron Resch origami desenine sahip gölgeleme cihazıyla %68 ve %5 yansıtma dereceleri olan iki farklı malzeme ilişkilendirilmektedir. Bulgular, karışık kombinasyonlar ile tasarımın toplam yıllık enerjiyi düşürdüğünü göstermektedir (Pesenti vd., 2015).

Cimmino ve diğerleri (2016)'nin, Salerno Üniversitesi kampüsünde fotovoltaik ve güneş enerjisi tasarım prensiplerini ve çalışma araçlarını tanımlamayı amaçlayan kural tabanlı bir model tasarladıkları görülmektedir. Çalışma yenilenebilir enerjiyi entegre edebilen, yenilikçi bina zarfları tasarlamayı amaçlar. Çalışma gerginlik mimarisine sahip bir yelken gibi oluşturulan modüller bükülebilir, kompozit fotovoltaik modüller ile donatılmış katlanabilir (origami) eşkenar dörtgen modüllerden oluşmaktadır. Yapının modülü altı adet sıkıştırma elemanı çubuk, iki germe elemanı kablo ve beş düğümünden oluşmaktadır. Hareket, bir yelkeni taklit edecek şekilde seçilen kabloların uzamaları kontrol edilerek çalıştırılmaktadır. Temel modülün tasarımı düğüm koordinatlarını tanımlayan iki açılabilir boyut değişkenine bağlıdır. Modüller geceleri katlanarak açılmakta gün ışığında ise kademeli olarak kapatılmaktadır. Seçilen kablolar esnetilerek veya gevşetilerek kontrol edilmektedir. Kablolar güneş panellerini güneşe doğru yönlendirmek ve /veya rüzgarla uyarılan birimlerin kablolarında depolanan gerilim enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren yenilikçi rüzgâr jeneratörleri oluşturulmak için kullanılmaktadır (Cimmino vd., 2016).

Kiefer Technic Showroom (2007), ofis binaları, iç mekân iklimi ve ışığı kontrol etmek için pencere şeritleriyle bölünmüş modüler cephesiyle kural tabanlı bir model oluşturmaktadır. Dinamik güney cephesi,

poligonal camdan yapılmış statik ve önünde bulunan dinamik cephe olmak üzere cephe iki katmandan oluşmaktadır. Dinamik katman, çeşitli pozisyonlara dikey olarak hareket ettirilebilen 122 alüminyum panelden oluşmaktadır. Cephede 56 farklı motor kullanılarak farklı faaliyetler için en uygun ışık seviyesi ve sıcaklık ayarlanabilmektedir. Cephe hem çevresel koşullara hem de bireysel ihtiyaçlara cevap vermektedir. Dinamik cephenin, beyaz delikli alüminyum panellerden yapıldığı ve cephede paslanmaz çelik ve cam kullanıldığı görülmektedir. Dinamik cephenin alüminyum panelleri, karmaşık bir menteşe sistemi, kılavuz raylar ve elektrik motorları aracılığıyla hareket ettirilmektedir. Showroomun güney cephesinin tamamına hareketli bir kaplama yerleştirilerek odalardaki mahremiyeti korurken şeffaf cephenin gerçekleştirilmesini sağladığı görülmektedir (Fouad, 2012).

İncelenen bu şekil gramerlerine sahip modellerde genellikle origami katlama tekniğinin kullanıldığı görülmüştür. Bunun nedeninin de şeklin genişlemesine, büzülmesine, bükülmesine izin veren dinamik özellikleri olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Biçim gramerlerinde bir başlangıç biçimi, ondan türeyen veya diğer biçimlerle oluşan biçimler ve biçimlerin arasındaki ilişkileri tanımlayarak oluşturulan kural setleri olduğu görülmüştür. Bu sistemler sonuç ürün çeşitliliğini artırmaktadır ve farklı farklı cephe modelleri üzerinde uygulanabilirlik sağlamaktadır. Biçimlere öteleme, döndürme, yansıtma, ölçekleme, ekleme, çıkarma gibi aritmetik biçim operasyonları uygulanabilmektedir. Biçimlerin birbirleri ile olan ilişkileri hem ikinci hem de üçüncü boyutta tanımlanabilmektedir.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu makale, kinetik sistem modelleme yöntemlerini ve bunların sağladığı işlevsel avantajları araştırmak için 2000'den 2020'ye kadar kinetik cephe çalışmaları üzerine 19 çalışmayı incelemiştir. İnceleme yeni teknolojilerin ve sistemlerin gelişmeye devam ettiğini göstermiştir. Uyarlanabilir kinetik cephe sistemleri özellikle sıcak iklim bölgelerinde gittikçe önem kazanmaktadır. Küresel ısınmanın da gittikçe artış eğilimi gösterdiği ve fosil yakıtı dayalı enerji kaynaklarında tasarruf gerekliliği düşünüldüğünde, söz konusu sistemlerde yenilikçi fikirlere ihtiyaç olduğu görülmektedir. Algoritmik yöntemler, dijital modelleme ve parametrik tasarım araçlarının geliştirilmesi, bu ilerlemenin ve kinetik sistemli cephe oluşumunun geliştirilmesini kolaylaştırmıştır.

Parametrik tasarım ile kinetik sistemler iklimlendirme, enerji verimliliği ve konfor koşullarının araştırılması gibi ana ilkeleri tespit etmek için daha fazla görünürlük sağlamaktadır. Bu nedenle üretken, parametrik ve hızlı form bulma yöntemi dinamik çevresel uyarılara daha fazla uyum sağlama için bir çözüm olarak görülmektedir.

Bu çalışmada ele alınan örnekler, çevresel etkilere karşı dinamik cevaplar vererek kendini çevreye uyarlayan ve böylelikle iç mekân konfor koşullarını sağlarken enerji ihtiyacını minimuma indiren duyarlı kinetik cephe çalışmalarıdır. Bu tasarımlarının sonucunda enerji korunumu sağlayarak sürdürülebilir mimarlığın oluşturulmasına katkıda bulunurlar. Kinetik cephe tasarlanmanın yolu çok çeşitlidir. Önemli olan çevresel etkilere dinamik bir şekilde karşılık verebilecek yenilikçi bir cephe tasarımı geliştirebilmektir.

Parametrik ve üretken form bulma döngüsünü keşfetmek, kinetik cepheyi etkileyen önemli parametreler bulmak için önemi bir fırsattır. Çeşitli modelleme yöntemleriyle interaktif cephe geometrisi için yüksek

performanslı, ayarlanabilir ve benzersiz alternatiflere sahip farklı geometrilerdeki cephe tasarımlarına ulaşılabilir. İstenilen kriterlere uygun olan form seçilerek en uygun ayarlanabilir ve duyarlı cephe sistemi oluşturulabilir. Kinetik cepheleri parametrik tasarım ile modelleme yöntemlerinden yararlanılarak oluşturulan çalışmalar incelendiğinde 2 modelleme yöntemi bulunmuştur. Bunlar evrimsel tabanlı modeller ve şekil gramerleriyle oluşturulan modellerdir.

Şekil gramerleriyle modelleme yönteminde tasarım alternatiflerinin üretilmesi tasarımcının belirlediği kurallar setine bağlıdır. İşlemi başlatmak için en başta üretimi başlatıcı bir biçime ihtiyaç vardır. Sonra biçim ve dönüşüm kuralları belirlenmekte ve üretilebilecek tüm olası biçimsel kombinasyonlar ve alternatifler bilgisayar tarafından üretilmektedir. Tasarımcı geleneksel olarak ulaşamayacağı sayıda alternatifini değerlendirme imkanına sahip olmakta ve içinden en uygun formu seçerek cephe sistemini oluşturabilmektedir.

Şekil gramerleriyle gerçekleştirilen çalışmalarda çoğunlukla origami uygulamalarından faydalandığı görülmüştür. Son yıllarda origami ve origamiden ilham alan yapılar büyük ilgi gördü ve farklı alanlarda öncü uygulamalar yapıldı. Özellikle, düz tabakaları karmaşık 3 boyutlu şekillere katlamanın görünüşte sonsuz olasılıkları, uzay aracı, medikal cihazlar, kendinden katlanan robotlar gibi çok farklı boyutlarda çok çeşitli katlanabilir yapılara ilham vermiştir (Li ve diğ., 2018). Genel olarak bakıldığında origami, kuvvetleri görmeyi ve hareketi tahmin etmeyi sağlar. Ayrıca, katlama işlemi sırasında geometrik dönüşümler göz önüne alındığında, şekli koruyan dönüşüm bir dönüşüm gerçekleşmektedir (Çavuş, 2019). Adaptasyonu gerçekleştirmenin sezgisel bir yolu olarak kabul edilen bu belirli geometriler kendi kendine organize olabilmektedirler. Mozaik katlama kıvrımları sayesinde, sistemin diğer yönlerinde sert kalırken önceden belirlenmiş deformasyon yönüne kolayca deforme olabilmektedirler (Pesenti, 2015). Origami geometrilerinin hafif ve esnek özellikleri, mekanik cihazlar yerine aktif malzemelerin kullanılmasıyla birleştirildiğinde çalıştırma enerjisinin dönüştürülmesine neden olabilme potansiyeline sahiptirler.

Evrimsel sistemlerde tasarım çözümleri değişken iklim faktörlerine yanıt verdiği için küresel koşulların azaltılmasında önemli bir role sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Biyolojik olarak yenilenebilir malzemeler, bina bileşenlerinde biyomimetikler ve çevresel koşullara uygun şekilde tepki veren akıllı ve duyarlı sistemler gibi sürdürülebilirlik yaklaşımlarını kullanan dayanıklı yapılar, temiz su ve hava kaynaklarının azalması ve daha fazla çevre kirliliği ile karşı karşıya kaldığımız mevcut küresel koşullar altında önemli bir rol oynamaktadır.

Gittikçe karmaşıklaşan üretken evrimsel sistemler tüm disiplinlerin iş birliğiyle gerçekleşeceği bir çalışma ortamının oluşmasına katkı sağlamaktadır. Doğadan esinlenerek tasarlanan projelerde, mevcut çevre verilerini tanımlayan, tasarımcının ölçütlerine, iklimsel özelliklere ve zamana bağlı mekânı biçimlendiren dinamik bir çevre etkisi gözlenmiştir. Bu sonuç ürünler çevredeki performanslarına bağlı olarak değerlendirilir ve sonuçlar genellikle beklenmediktir. Fakat kendiliğinden Oluşan Sistemler (*Emergent Architecture*)' de yapılar birer canlı olarak değerlendirilmekte ve bir yaşam süreci içerisinde olduğu varsayılmaktadır. Bu sayede çevresel verilere ilişkin tasarlama isteğinin arttığı günümüzde ve sonraki süreçte bu yöntem daha da geliştirilerek kullanılabilirliği düşünülmektedir. Bu modelleme yaklaşımının esnek olması, geometrik mekân modellemesine olanak sağlaması, etmenlerin hız ve yön atanabilen hareket kabiliyetine sahip olması ve etmenlerin birbirleriyle etkileşime girebiliyor olması nedeni ile oldukça avantajlı bir modelleme

yöntemidir. Ayrıca etmenlerin öğrenebiliyor olması, kurallara uygun davranabiliyor olması bu modelleme yönteminin gerçek sonuçlar üretebilen bir modelleme yapmasını sağlamaktadır.

Parametrik tasarım etkisi ile yapılan çalışmalar tasarım sürecinde morfodinamik (kullanıcı tanımlı kısım) ve morfogenetik (otomatik kısım) perspektiflerin birlikte kullanımına dayanmaktadır. Böylece, kullanıcı tanımlı parametreler ile dijital tasarım araçları entegre edilerek tasarımın sınırlarının genişlemesine, yeni tasarım yöntemlerinin denenmesine, yeni inşaat tekniklerinin geliştirilmesine ve böylece tasarım dünyasının teorik ve pratikte yenilikçi gelişmesine neden olabilmektedirler.

5. KAYNAKÇA

Alkhayyat, J. 2013. Design Strategy for Adaptive Kinetic Patterns: Creating a Generative Design for Dynamic Solar Shading Systems”, M.Sc thesis University of Salford., Manchester, UK, s. 78–80.

Ağırbaş, A. 2019. Façade Form-Finding With Swarm Intelligence, Automation in Construction 99, s. 140-151.

Akipek, Ö.F. 2004. Bilgisayar Teknolojilerinin Mimarlıkta Tasarım Geliştirme Amaçlı Kullanımları, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı.

Akipek, F.Ö. ve N. İnceoğlu. 2007. Bilgisayar Destekli Tasarım Ve Üretim Teknolojilerinin Mimarlıktaki Kullanımları, Megaron Yıldız Teknik Üniversitesi E-Dergisi, Cilt 2, Sayı 4, s. 237-253.

Asefi, M. 2012. Transformation and movement in architecture: the marriage among art, engineering and technology, Procedia - Social and Behavioral Sciences 51, s. 1005 – 1010. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.08.278>

Barozzi, M., J. Lienhard, A. Zanelli ve C. Monticelli. 2016. The Sustainability of Adaptive Envelopes: Developments of Kinetic Architecture”, Procedia Engineering 155 (275–284), s.1877–7058. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.029>

Cimmino, M.C., R. Miranda, E. Sicignano, A.J.M. Ferreira, R.E. Skelton ve F. Fraternali. 2016. Composite solar façades and wind generators with tensegrity architecture, Composites Part B, s. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.077>

Chu, K. 2006. Metaphysics of genetic architecture and computation, Archit. Des. 76 (4), s. 38–45. <https://doi.org/10.1002/ad.292>

Çakıcı Alp, N. 2011. *Binalarda Kullanıcıların Acil Durum Davranışının ve Hareketinin Etmen Tabanlı Bir Model İle Temsili Ve Benzetimi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı.

Çavuş, Ö. 2019. Learning From Folding For Design In Kinetic Structures In Architecture, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Bina Bilgisi, mimarlık Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, Ankara.

Fouad, S.M.A.E. 2012. Design Methodology: Kinetic Architecture, Doktora Tezi, Alexandria University, Faculty of Engineering, B.Sc. of Architecture.

- Grobman, Y.J., I.G. Capeluto ve G. Austern.** 2016. External shading in buildings: comparative analysis of daylighting performance in static and kinetic operation scenarios, *Architectural Science Review*. <http://doi.org/10.1080/00038628.2016.1266991>
- Hosseini, S.M., M. Mohammadi, A. Rosemannb, T. Schröderc ve J. Lichtenberg.** 2019a. A morphological approach for kinetic façade design process to improve visual and thermal comfort: Review, *Building and Environment* 153, s. 186–204. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.040>
- Hosseini, S.M., M. Mohammadi ve O. Guerra-Santin.** 2019b. Interactive kinetic façade: Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant's positions by 2D and 3D shape changes, *Building and Environment* 165, s. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106396>
- Juaristi, M., R. Loonen, F. Isaia, T. Gómez-Acebo ve A. Monge-Barrio.** 2020. Dynamic Climate Analysis for early design stages: a new methodological approach to detect preferable Adaptive Opaque Facade Responses, *Sustainable Cities and Society*, s. 1-69. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102232>
- Keskin, G.** 2008. Dijital Form Türetici (Froebel Form Türetici) İle Bir Konut Yerleşkesinin Tasarım Süreci, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı.
- Khosromanesh, R. ve M. Asefi.** 2019. Form-finding mechanism derived from plant movement in response to environmental conditions for building envelopes, *Sustainable Cities and Society* 51, s. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101782>
- Kormaníková, L., E. Kormaníková ve D. Katunský.** 2017. Shape Design and Analysis of Adaptive Structures, *Procedia Engineering* 190, s. 7 – 14. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.300>
- Li, S., H. Fang, S. Sadeghi, P. Bhovad ve K.-W. Wang.** 2018. Architected Origami Materials: How Folding Creates Sophisticated Mechanical Properties. *Advanced Materials*, 1805282. <https://doi.org/10.1002/adma.201805282>
- Mahmoud, A.H.A. ve Y. Elghazi.** 2016. Parametric-based designs for kinetic facades to optimize daylight performance: comparing rotation and translation kinetic motion for hexagonal facade patterns, *Solar Energy* 126, s. 111–127. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.12.039>
- Matheou, M., A. Couvelas ve M.C. Phocasa.** 2020. Transformable building envelope design in architectural education, *Procedia Manufacturing* 44, s. 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.212>
- Pesenti, M., G. Masera ve F. Fiorito.** 2015. Shaping an origami shading device through visual and thermal simulations, *Energy Procedia* 78, s. 346–351. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.663>
- Radwan, G.A.N. ve A.N. Osama.** 2016. Biomimicry, an approach, for energy efficient building skin design, *Procedia Environmental Sciences* 34, s. 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.017>
- Razzaghamanesh, D.** 2015. Impact Of Parametric Design On Designing Performative Facades (Parametrik Tasarımın Performatif Cephe Tasarımı Üzerine Etkisi), Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı.

Schieber, G., L. Born, P. Bergmann, A. Körner, A. Mader, S. Saffarian, O. Betz, M. Milwich, G.T. Gresser ve J. Knippers. 2017. Hindwings of insects as concept generator for hingeless foldable shading systems, *Bioinspiration Biomimetics* 13 (1) 016012, s. 1-20. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/aa979c>

Schleicher, S., J. Lienhard, S. Poppinga, T. Speck ve J. Knippers. 2015. A methodology for transferring principles of plant movements to elastic systems in architecture, *Computer Aided Design* 60, s. 105–117. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2014.01.005>

Shahin, H.S.M. 2019. Adaptive building envelopes of multistory buildings as an example of high performance building skins, *Alexandria Engineering Journal* 58, s. 345–352. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.11.013>

Sheikh, W.T. ve Q. Asghar. 2019. Adaptive biomimetic facades: Enhancing energy efficiency of highly glazed buildings, *Frontiers of Architectural Research* 8, s. 319-331. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.06.001>

Singh, V. ve N. Gu. 2012. Towards an integrated generative design framework, *Des. Stud.* 33 (2), s.185–207. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2011.06.001>

Tabadkani, A., M.V. Shoub, F. Soflae ve S. Banihashem. 2019. Integrated Parametric Design Of Adaptive Facades For User's Visual Comfort, *Automation in Construction* 106 102857, s. 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102857>

Terzi, N. 2019. Mimarlıkta Hesaplamalı Teknolojiler ve Geometri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı.

Tok, H. 2008. Gramer Tabanlı Mimari Tasarım: Mardin'de İlköğretim Okulu Tipolojileri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı.

Wang, J., J. Li ve X. Chen. 2010a. Parametric Design Based on Building Information Modeling for Sustainable Buildings, *Challenges in Environmental Science and Computer Engineering [Konferans Sunumu]*, 2. 236-239. 10.1109 / CESCE.2010.285

Wang, J. ve J. Li. 2010b. Bio-inspired Kinetic Envelopes for Building Energy Efficiency based on Parametric Design of Building Information Modeling, *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC.* 10.1109 / APPEEC.2010.5449511

Yang, X.S. ve M. Karamanoglu. 2013. Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation: An Overview, Theory and Applications, s. 3-23. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405163-8.00001-6>

İNTERNET KAYNAKLARI

LIFT Architects. 2017. The Air Flow (ER), <http://www.liftarchitects.com/#/air-flower>, Erişim Tarihi 04 Ağustos 2020.