

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE HAREKETLİ MEMBRAN YAPILAR İÇİN TASARIM METODOLOJİSİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Derya BAKBAK¹, Mustafa ÖZAKÇA², Mehmet Tolga GÖĞÜŞ²

¹Gaziantep Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 27310, Gaziantep, Türkiye

²Gaziantep Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 27310, Gaziantep, Türkiye

bakbak@gantep.edu.tr, ozakca@gantep.edu.tr, mtgogus@gantep.edu.tr

(Geliş/Received: 11.11.2014; Kabul/Accepted: 01.12.2015)

ÖZET

Bu çalışmada, son zamanlarda inşaat sektöründe kullanılmaya başlanılan farklı şekillerde biçimlendirilebilen, açılıp kapanabilir, hareketli yapılar için bütüncül bir tasarım yöntemi geliştirilmiş olup, çok fonksiyonlu ve iklim koşullarına uyum sağlayan, yapıların ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. İki farklı disiplin olan, mühendislik ve mimarlığın bir araya gelmesi ile söz konusu yapılar için bütüncül tasarım yaklaşımı doğmuştur. Çağımızın dinamik, esnek ve sürekli değişen ihtiyaçlarına cevap veren teknolojik yapılar, bu iki alanın birbiriyle kesiştiği noktada bulunmaktadır. Bu çalışmanın sonucunda geliştirilen tasarım yaklaşımının, açılıp kapanabilir, hareketli, esnek yapılar için, yapısal prensipleri ve uygulama tekniklerini dikkate alan etkin ve elverişli bir yöntem olduğu bir örnek üzerinde gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hareketli yapılar, makas-mafsals mekanizması, asma-germe yapılar, bütünleşik tasarım

DEVELOPMENT OF DESIGN METHODOLOGIES FOR DEPLOYABLE FABRIC STRUCTURES IN CIVIL ENGINEERING

ABSTRACT

In this paper, the integrated design methodology for flexible, responsively adaptable, deployable, kinematic structures, which are recently starting to use in the construction industry, has been developed and also intended to design a deployable structure which is multi-functional and adapting itself to climatic conditions. Integrated design methodology for these structures arises from two different disciplines engineering and architecture. Technological structures which are existed at the intersection of these areas, tuned to address today's dynamic, flexible and constantly changing needs. The results of this study show the effectiveness and the feasibility of the proposed design approaches, structural principles and implementation strategies for flexible, deployable, kinematic structures.

Keywords: Deployable structures, scissor-hinge mechanism, tension structures, an integrated design

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tarih boyunca insanoğlu sürekli değişen ihtiyaç ve koşullara uyum sağlayabilecek esnek yapıların inşasını denemiştir. İnşaat uygulamalarının birçoğu çok katlı binalar, köprüler havaalanları vb. sabit yapılardan oluşmaktadır. Teknolojinin hızlı gelişimi, doğal afetler, iklim koşullarındaki değişkenlik ve insanoğlunun teknolojiye bağlı yeni yaşam alanları beklentisi işlevsellik, esneklik, uyumluluk, sürdürülebilirlik ve daha uzun performans kabiliyetine

sahip yapılara ihtiyacı artırmıştır. Bunun sonucu olarak açılıp kapanabilir, farklı konumlanabilir hareket edebilir yapılar, bu ihtiyaçları karşılamak üzere sabit yapılara alternatif çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Bu yapılara olan ilgi, mimari programlama, malzeme bilimi, inşaat, bilgisayar ve imalat teknolojilerindeki en son gelişmeler ile artmıştır. Kolay ve hızlı kurulum gerektiren geçici afet ve güvenlik yapılarında; taşınabilirlik, fonksiyonellik ve esneklik gibi özellikleri gerektiren fuar, sergi ve festival yapılarında; görsel etkinin ve estetiğin önemli

olduğu simgesel yapılarda hareket edebilen yapıların geleneksel sabit yapılara kıyasla önemli avantajları bulunmaktadır. Hareket edebilen yapılarda kayma, yayılma ve katlanma gibi dönüşümler kullanılabilmekte, dönüşüm sırasında gerçekleşen bu dönme, katlanma ve kayma hareketleri yapı içinde görsellik ve fonksiyonelliği de beraberinde getirmektedir [1]. Tasarımcılar, açılıp kapanabilir ve/veya dönüşebilir hareketli yapılar ile ilgi çekici ve estetiği ön plana çıkarma şansını yakalamaktadırlar. Birçok araştırmacı ve tasarımcı yapısal sanatı; etkin, ekonomik ve zarif tasarımlar olarak ifade etmiştir [2]. Hareketli yapıların zarafeti ise, yapının dönüştürülebilirliği, "zengin ve karmaşık" davranışı ile elde edilmiştir. Hareketli yapıların nasıl tasarlanacaklarıyla ilgili bazı örnekler sunulmuş olsa da, bu çalışmaların çoğunda, yalnızca yapıların hareket şekilleri veya yapılarda kullanılan elemanlardan bahsedilmiştir [3]. Hâlihazırda, yeni gelişmekte olan hareket edebilen yapıların tasarımıyla ilgili, tasarımcıların kullanabileceği kapsamlı tasarım metodolojisi bulunmamaktadır. Ayrıca, bu yapıların hareketi çoğu zaman, iki farklı durum arasında gerçek anlamda değişime neyin sebep olduğu düşünülmeden, soyut olarak sadece bir durumdan diğerine değişim şeklinde ifade edilmektedir. Günümüzde büyük alanlı, farklı teknolojiler içeren ve karmaşık işlevli yapıların tasarımında çeşitli disiplinlerden uzman kişilerin bilgi girişimine ve birlikte çalışmalarına gereksinim duyulmaktadır [4]. Hareketli yapıların tasarımı, inşaat, makine, elektrik-elektronik mühendisleri ve yapı üretim yüklenicisi gibi çeşitli bilgi alanlarının mimari tasarımcıyla birlikte çalıştığı bütüncül bir tasarım sürecinin oluşturulmasını gerektirmektedir. Zira tasarım sürecinde her bir disiplinin aldığı kararlar diğer disiplinlerin tasarımlarını doğrudan etkileyeceğinden her bir disiplin bütüncül bir tasarım yaklaşımı sergileyerek ekip olarak çalışmalıdır [5-8]. Hatta tasarım sürecinin başarılı olabilmesi için, süreci organize eden mimarın diğer disiplinler hakkında da kapsamlı bilgi ve deneyime sahip olması hem zaman hem de elde tasarımın kalitesi bakımından faydalı olacaktır. Bu çalışmanın öncelikli amacı, kolay ve hızlı kurulabilen, esnek, estetik, taşınabilir, fonksiyonel, açılıp kapanabilir makas-mafsalsal mekanizmalı hareketli yapılar için bütüncül tasarım yaklaşımı geliştirmektir. Çalışmada mimari parametrelere bağlı olarak uygun geometrinin seçilmesi, hareketli yapı mekanizmasının belirlenmesi, mekanizmanın kinematik-dinamik tasarımı ve mekanizmayı oluşturan elemanların ve hareketli yapının diğer bileşenlerinin (yüzey kaplaması gibi) tasarımını içeren genel metodoloji açıklanmıştır. Bu süreç, hareket edebilen bir örnek yapı üzerinde gösterilmiştir. Önerilen makas-mafsalsal mekanizmasının geliştirmesi sürecinde, bilgisayar simülasyonları ve dijital prototipler kullanılmış ve yapıyı oluşturan elemanların davranışları ve tasarımı çeşitli kinematik ve yapısal analizler aracılığıyla yapılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE SURVEY)

Kendini yeniden şekillendirerek, işlevsel ya da iklimsel değişikliklere uyum sağlayabilen adaptif mimari ilgili ilk örnekler 1960'lara dayanmaktadır. Hareket edebilen yapı çeşitlerine olan ilgi ve konu ile ilgili çalışmalar bu tarihten itibaren yoğunluk kazanmıştır. Zuk ve Clark [9] başta olmak üzere, Fox ve Hu [10] kinetik mimari ile ilgili çeşitli çalışmalara imza atmış, olsalar da hareketli yapıların bütüncül tasarım süreçleriyle ilgili olarak herhangi bir açıklamada bulunmamışlardır. Araştırmacılar tarafından hareketli yapıların farklı yönleri (yapıların hareket mekanizmaları, yapısal analizi, dinamik hareket analizi, yüzey kaplaması vb.) tek tek ele alınarak araştırmalar yürütülmüştür. Bu çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmiştir. Hareketli yapılar için genel olarak kabul edilmiş ve ortak kullanılan bir terminoloji bulunmamaktadır. Bu nedenle bu alanda araştırma yapanlar arasında kavram karmaşıklığı mevcuttur. Seneler boyunca, dönüştürülebilir mimari için birçok araştırmacı tarafından sınıflandırmalar geliştirilmiştir. Sınıflandırmalar terminolojik olarak dönüştürülebilir, kinetik ya da konumlandırılabilir olarak anılsalar da, sınıflandırma yöntemleri her bir yazarın çalışma alanı ve bakış açısına dayanmaktadır. En çok kabul gören sınıflandırmalar [11] de verilmiştir. Makas-mafsalsal mekanizmalı yapılar, hareket edebilen yapıların tipik örnekleri olarak gösterilebilirler. Pinero [12], Hoberman [13,14], Escrig [15, 16], Valcarcel [16] ve Gantes [17,18] gibi önemli araştırmacılar makas-mafsalsal mekanizmalı yapıların kullanıldığı farklı sistemler öngörmüşlerdir. Adı geçen bu önemli araştırmacıların bazılarının çalışmaları Melin [19] ve Akgün [2] tarafından esneklik ve dönüşüm kabiliyetleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Hareketli yapıların tasarımı sırasında iki farklı yüklenme durumunun göz önünde bulundurulması gerekir. Bu yükler, konumlandırılmış (açık) durumdaki servis yükleri ve konumlandırma (açılıp kapanma) süreci sırasındaki tepkilerdir. Hareketli yapılarda, konumlandırma süreci sırasındaki tepki, geometrik olarak doğrusal olmayabilir [19]. Dahası konumlandırmanın tamamlanmasının ardından, dayanım elde edilmesi ve yapının hareketsiz hale getirilebilmesi için ara elemanların en uygun hangi şekilde yerleştirilmesi gerektiği düşünülmelidir. Konumlandırılmış konfigürasyonun analizi geleneksel çerçeve yapılar ile benzer şekilde yapılmaktadır. Analiz sırasında genel olarak tercih edilen yöntem sonlu elemanlar metodudur. Konumlandırılmış konfigürasyonun bu şekilde modellenmesi genellikle bilgisayar ortamında aşırı hesaplamalar gerektirmemektedir. Makas yapılarında numerik modellerin daha da sade bir hale getirilebilmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Ancak yer değiştirmeler büyük ise, servis yükleri için doğrusal olmayan burkulma analizlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir [19].

Deforme olabilen makas tipli yapıların konumlandırma analizi, konumlandırma sırasında burkulma yoluyla ayrılmalara odaklanmaktadır. Burkulma yoluyla ayrılma, yapının bir ya da daha fazla elemanında oluşan içsel gerilmelerin konumlandırma esnasında yavaş yavaş artarak kritik yüklemeye seviyesine karşılık gelen sınır noktasına ulaşması olarak tanımlanabilir. Yapı daha sonra, kendiliğinden kararlı ve gerilmelerin düşük olduğu konfigürasyona dönmektedir. Bu etki, mekanizmadaki geometrik uyumsuzlıklardan kaynaklanmakta olup yüksek derece doğrusal olmayan bir haldedir. Burkulma yoluyla ayrılma, elemanların akma noktasından daha düşük gerilme seviyelerinde oluşursa, mekanizmanın konumlandırılmış konfigürasyona kilitlenmesi için kullanılabilir. Ancak, gerilme seviyesi aşırı yüksek olursa, yapıya konumlandırılmaz bir hal almakta, ya da konumlandırma yapının tahribatına sebep olmaktadır [20].

Hareketli yapı tasarımlarının korunaklı ya da kapalı alanlar için yapıldığı durumlarda kaplamalara ihtiyaç duyulmaktadır. Kaplama uygulamaları için ise çok çeşitli çözümler mevcuttur. Yüzey kaplaması açık bir konfigürasyonun yapısal, dengeleyici ve/veya kilitleyici elemanı olarak çalışabilmektedir. Kaplamalar çekme yüklerinin taşındığı elemanlar olarak çalışan teflon kaplı naylon, cam yünü kumaşlar vb. dayanıklı, hafif ve esnek malzemelerden ya da metal ya da plastik esaslı rijit malzemelerden üretilebilmektedir. Gerilmeli membranlar özelliklerinden dolayı hareketli yapıların kaplamasında kullanılan en yaygın malzemedir. Gerilmeli membran yapıların tasarımı, yapısal analizleriyle bütünleşik olarak şekil bulma, biçimlendirme ve yük analizlerini de içeren bir yöntemle yapılmaktadır [21-23].

Hareketli yapılar; fonksiyonel kullanım kolaylığı, uyum sağlama yeteneği, dönüşebilme kolaylığı, çevreye uyumu, şekilsel farklılığı ile sürekli artan bir talep görmektedir. Hareketli yapılar ile ilgili günümüzde farklı önemli yapılar bulunmaktadır. Bu yapıların her bir yandan farklı talep ve isteklere cevap verirken, diğer taraftan da kullanıcıya rahat ve konforlu bir yaşam sunmaktadır. Ünlü İspanyol Calatrava'nın tasarladığı Alcoy Toplum Merkezi, Milwaukee Sanat Müzesi, Pflzkeller Acil Servisi [24] ile; Toronto Gökkuşu [25], Starlight Tiyatrosu [26], Falcons Stadyumu [27], Prairie Evi [28] son yıllardaki bazı önemli hareketli yapılara örnek verilebilir.

2.1 Literatür Sonuçları (Literature Conclusions)

Hareketli mimari yapıların tasarımlarıyla ilgili her ne kadar emsal teşkil eden çalışmalar yapılmış olsa da, bu çalışmaların birçoğunda, yapılarda kullanılan elemanlar ve hareket çeşitleri üzerinde durulmuştur.

Bazı çalışmalarda ise tepkisel sistemlerin oluşturulabilmesi entegre bir yaklaşım sunmuş olmakla birlikte yüzey kaplamasının tasarım sürecine dahil edilmemesinden dolayı bütüncül bir tasarım metodolojisi olmamıştır.

3. HAREKETLİ YAPI TASARIMI (DEPLOYABLE STRUCTURAL DESIGN)

Hareketli mimari yapılar üzerine yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, bu tarz yapıların tasarımlarıyla ilgili olarak tasarımcılara yol gösterecek bütüncül metodolojinin bulunmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu yapıların hareketi çoğu zaman, iki farklı durum arasında gerçek anlamda değişime neyin sebep olduğu düşünülmeden, soyut bir şekilde yalnızca bir durumdan diğerine değişim şeklinde ifade edilmektedir [29]. Bir hareketli yapıların tasarımı aşağıdaki öğelerden oluşmaktadır:

- Mimari tasarım,
- Mekanizmanın tasarımı,
- Yüzey kaplama membran tasarımı,
- Hareketli mekanizmanın yapısal tasarımı
- Hareket (açılıp kapanma) analizi (simülasyon)

3.1 Mimari Tasarım (Architectural Design)

İlk aşamasında; gereksinimleri karşılamak üzere saptanan işlevleri yerine getirecek olan yapı bütünü, onun kurgusunda yer alan tüm öğelerin ve çevresinin kavramsal, işlevsel, biçimsel, strüktürel ve eylemsel özelliklerini göz önünde bulundurarak ön tasarım oluşturulur. Hareketli yapılar için ön tasarım oluşturulurken istenilen formun, açılıp kapanan mekanizma ile de sağlanıp sağlanamayacağının değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu aşama başlangıçta belirtilen hususlar göz önünde bulundurularak yapının formu ve kullanılacak hareket mekanizmasının seçimi ile tamamlanır. Herhangi bir mimari çizim programı kullanılarak 2 ve 3 boyutlu taslak formlar oluşturulur.

Bina gibi statik yapıların tasarımlarında bir sonraki adım taslak formun detaylandırılması içermektedir. Hâlbuki hareketli yapılarda ise her bir yapı bileşeninin (mekanizma, yüzey kaplaması) tasarımı, diğer bileşenleri de etkilediği için, nihai form oluşuncaya kadar taslak form sürekli değişmektedir. Bu da her bir değişiklik sonrası mimari tasarım çalışmasının yenilenerek 2 ve 3 boyutlu çizimlerin oluşturulması gerektirmektedir.

3.2 Mekanizma Tasarımı (Mechanism Design)

Kinematik tasarım yapı formunu oluşturabilecek hareket mekanizmanın belirlenmesini içermektedir. Hareketli yapılarda birçok farklı mekanizma çeşidi kullanılmaktadır. Mimar tarafından belirlenen yapı işlevleri dikkate alınarak formu oluşturacak

mekanizma çeşidi belirlenir. Mekanizmanın, belirlenen formu oluşturabilecek mekanizmanın tasarımı 2 boyutlu olarak yapılır. Mekanizma tasarımı süresince; eleman boyutları, sayıları, düğüm ve sabit noktaları değiştirilerek ve farklı başlangıç hareket hızları verilerek mekanizmanın çalışması ve uygulanabilirliği ortaya konulur. Günümüzde mekanizma tasarımında kâğıt kullanılan geleneksel yöntemlerin tersine, henüz kavramsal aşamadayken bile paket programlar kullanılarak tasarım hızlı bir şekilde yapılmaktadır. Araştırma ve/veya ticari amaçlı hareket (kinematik) analizi yapabilen bilgisayar programları mevcuttur. Mekanizmanın tasarımı için mevcut birçok program; kullanım kolaylığı, hareketli yapıların tasarımına uygunluğu, erişilebilirliği ve bütüncül tasarımın diğer aşamalarında kullanılacak programlar arasında veri akışı gibi kriterler göz önünde bulundurularak en uygun program seçilebilir.

Bu araştırmada, Autocad yazılımını da geliştiren Autodesk grubunun mekanizma tasarımı ve simülasyon programları kullanım kolaylığı ve programlar arası veri aktarımının uygun olması nedenlerinden dolayı tercih edilmiştir. Mekanizma tasarımı "Autodesk Force Effect Motion" adlı yazılım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hareketli elemanlara sahip mekanik sistemler adı geçen mühendislik programı aracılığıyla hızlı bir şekilde modellenerek simülasyon yapılmış ve bu sayede tasarımın gerçeğe uygunluğu kolay bir şekilde gözlemlenmiştir. Ancak bu program 2 boyutlu olup eleman kesit ve birleşim detaylarını dikkate almadığı için sadece genel bir çözüm vermektedir.

3.3 Yüzey Kaplaması Membran Tasarımı (Fabric Membrane Design)

Bir membran yüzey kaplamasının tasarımı üç aşamada yapılmaktadır [30]:

- Biçim (form) bulma teknikleri kullanılarak kararlı şekiller elde edilebilmesi.
- Uygulanan yükler altındaki kararlı şekillerin üzerinde oluşan gerilmelerin bulunması.
- Membran imalatında kullanılan kesme kalıplarının oluşturulması.

Biçim (Form) bulma sürecinde kablo ve/veya membranın bağlantı noktalarına uygulanan ön gerilmeye bağlı olarak yapının fiziksel biçimi elde edilmektedir. Membran elemanın nihai biçimi uygulanan ön germe değerlerine göre değişmektedir. Membran formu, kablo gerginliği, kiriş eğilme momentleri ve diğer bağlantı noktalarındaki kuvvetlerin genel dengeye ulaşması ile bulunabilmektedir. Tasarımcı ve/veya mimar ön germe değerlerini değiştirerek istediği formu buluncaya kadar form bulma işlemini tekrarlamaktadır. Uygulanan ön germe değerine göre nihai formu bulmak için kuvvet yoğunluğu, doğrusal olmayan sonlu elemanlar veya dinamik gevşeme

metotlarından birisi kullanılmaktadır. *Membranın maruz kaldığı dış (rüzgâr, kar gibi) yükler altındaki kararlı şekillerin üzerinde oluşan gerilmelerin bulunması* için Newton-Raphson yöntemini kullanarak doğrusal olmayan analiz yapılır. ForTen 2000 programı membran, kablo ve kiriş bileşke kuvvetleri ve gerilmeleri hesaplar. Yapı sistemi birlikte çalıştığı düşünüldüğünde membran, kablo ve kiriş bileşke kuvvetleri kaplamanın açılır-kapanır mekanizma ile bağlandığı düğüm noktalarına transfer edilerek daha sonrasında bu mekanizma elemanlarının boyutlandırılması kullanılacaktır. Ayrıca bu analiz, tasarımcı kırışmaya meyilli olabilen yüzeydeki bölgeleri göstererek gerektiğinde potansiyel değişikliklere gidilmesini sağlamaktadır. *Membran imalat kalıplarının üretilmesi* için, 3 boyutlu gerilmiş membran, gerilimsiz 2 boyutlu düzlemsel şekillere dönüştürülür. Tasarımın bu aşamasında mimar temel olarak yüzey kaplaması membranın geometrik şekline odaklanırken, mühendisler ise membran üzerindeki gerilmelerin dağılımı ile ilgilenmektedir. Membran tasarımında elde edilecek şekil başlangıçta seçilen parametrelere (ön germe yükü, kablo-kiriş tanımlamaları ve malzeme türü) bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Parametrelerden herhangi biri değiştiğinde ortaya çıkan yüzey kaplama şekil değişmektedir. Bu nedenle yüzey kaplama membran sistemlerin tasarımında istenilen gereksinimlerin karşılanabilmesi için mühendislerin ve mimarların birlikte çalışması gerekir. Son yıllarda asma germe yapı tasarımı için Forten, Easy, Oasys GSA, WinTess gibi ticari yazılımlar geliştirilmiştir. Form bulma işlemini yapan pek çok program bulunmakla birlikte yük analizi ve imalat kalıplarının üretimini yapan program sayısı azdır [31]. Bu çalışmada yük analizi, biçim bulma ve kalıp imalatı üretebilme özelliklerinin yanı sıra hareketli yapıların tasarımında kullanılan diğer çizim ve hareket analizi programları ile veri akışı yapabildiği için Forten 2000 tercih edilmiştir.

3.4 Hareketli Mekanizmanın Yapısal Tasarımı (Structural Design of Deployable Structure)

Yapının yüzey kaplamasının tasarımından sonra, kaplamadan (yapının maruz kaldığı yükler dahil) gelen yükler de dikkate alınarak mekanizma ve mekanizmanın elemanların yapısal analizleri ve tasarımları gerçekleştirilir. Hareketli yapıların konumlanmış konfigürasyondaki yapısal analizleri, doğrusal davranış göstermeleri sebebiyle kolay bir şekilde yapılabilir. Dayanım, rijitlik ve burulma olmak üzere üç farklı muhtemel kırılma şekli göz önünde bulundurularak her bir elemanın tasarım gerçekleştirilir. Bu üç kırılma şeklini dikkate alarak tasarım yapabilen ve genellikle sonlu elemanlar metodunu kullanan birçok ticari yazılım mevcuttur. Bu çalışmada 2 ve 3 boyutlu hareket analizini (simülasyon) de yapabilen ve diğer kullanılan programlarla kolay veri alışverişini sağlayan Autodesk Inventor Programı tercih edilmiştir.

3.5 Hareket (açılıp kapanma) Analizi (Motion Analysis)

Yüzey kaplama ve mekanizmayı oluşturan elemanların tasarımından sonra sistemin bir bütün olarak çalışması kontrol edilmesi (simülasyonunun yapılması) gerekmektedir. Yapının maruz kaldığı kar, rüzgar, kendi ağırlığı vb. ile açılıp hareket sonucu oluşan dinamik yükler dikkate alınarak 3 boyutlu model oluşturularak hareket analizi yapılır. Zamana bağlı doğrusal olmayan bu analiz de otomatik yük arttırma algoritması kullanılarak sistemin açılıp kapanması gözlemlenir. Gerçek yapıyı tam olarak modellemek için, geometrik kusurlar ve münferit mafsal boyutları hesaba dâhil edilirken sürtünme etkisi ise sonlu eleman modeline bağlantılarda dönüşümsel yaylar kullanılarak dahil edilmektedir. Yay kuvvetleri, her bir makas tipli elemanı oluşturan ikili çubukların bağlı rotasyonlarına direnen sürtünme momentlerini temsil etmektedir. Özellikle başlangıçta seçilen açılıp kapanma hareket hızına bağlı olarak çok büyük dinamik yükler ortaya çıkabilmekte ve tüm yapının göçtüğü simülasyon ile gözlemlenebilmektedir. Böyle bir durumda değişik hareket hızları ile simülasyon tekrarlanmakta burada da gerçekçi sonuç alınmadığı durumda tüm yapı baştan yeniden tasarlanmaktadır. Simülasyon işlemi için (açılıp kapanma) elemanların tasarımında da kullanılan Autodesk Inventor kullanılmıştır.

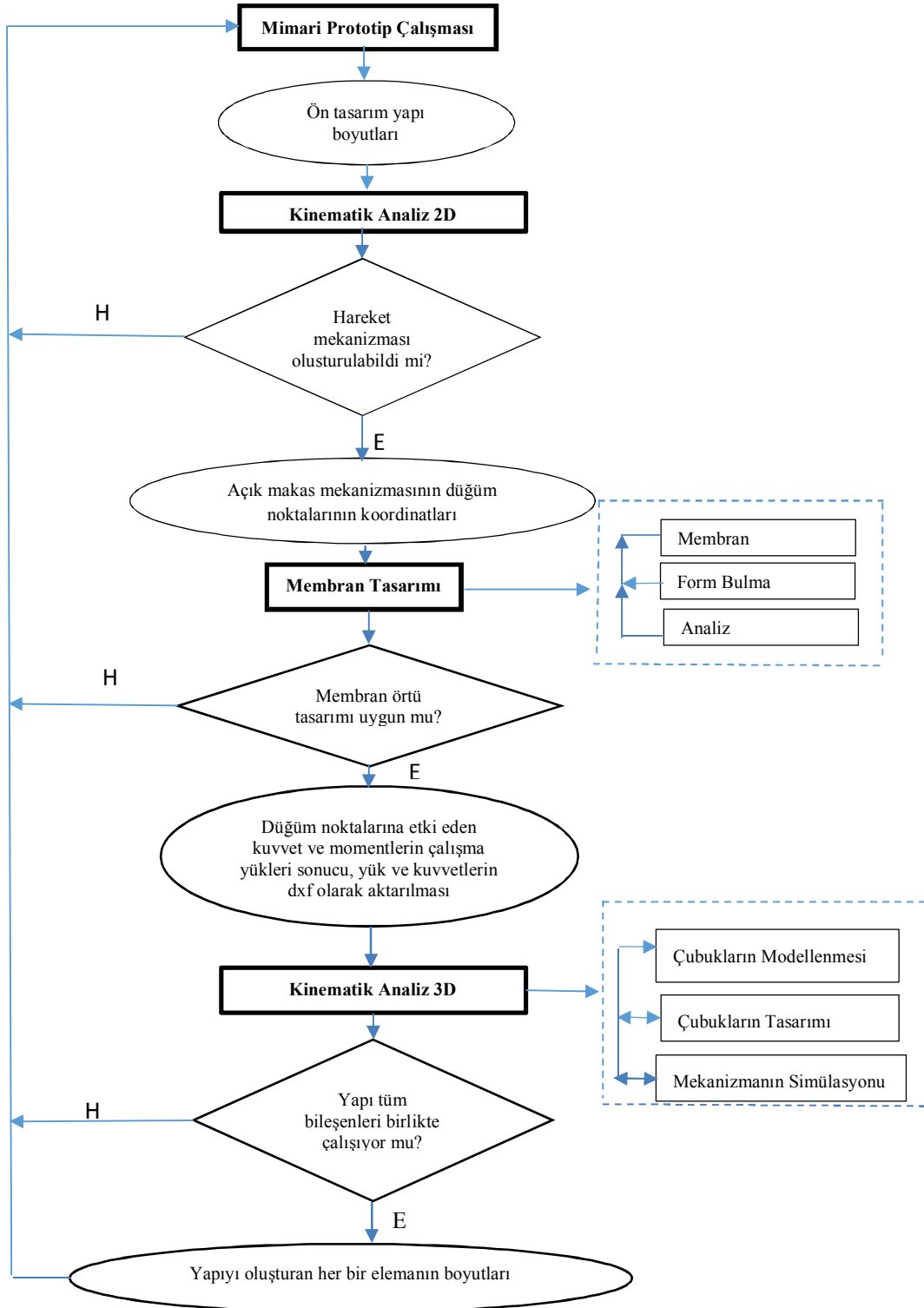
4. BÜTÜNCÜL TASARIM YÖNTEMİ (INTEGRATED DESIGN METHODOLOGY)

Statik yapılarda, farklı disiplinlerin sadece belirli tasarım aşamalarında birlikte çalıştığı konvansiyonel tasarım yöntemi kullanılmaktadır. Hareketli yapılarda ise, önceki bölümde belirtilen tasarım aşamaları iç içe geçmiş olduğundan diğer bir ifadeyle her aşamanın sonuçları tüm yapıyı etkilediğinden bütüncül bir tasarım yaklaşımı gerekmektedir. Mekanizmanın hareket analizi, aynı sistem içinde kullanılan birden fazla mekanizmanın hareketinin tanımlanması, mekanizmayı oluşturan elemanların tasarımı, asma germe membran örtü tasarımı ayrı ayrı çalışılan konulardır. Ancak tüm bu bileşenlerin hareketi bir yapıda bir araya gelmesi durumunda bileşenlerin ayrı ayrı ele alınamayacağı görülmüştür. Çünkü mekanizmanın hareketi sırasında oluşan hız, ivme ve kuvvetler diğer bileşenlerin tasarımını etkilemekte veya asma germe membran yüzey tasarımında oluşan kuvvetler hareket mekanizmasını ve mekanizmanın elemanlarının tasarımını etkilemektedir. Hareketli yapıyı oluşturan bileşenler arasındaki bu etkileşim bütüncül yaklaşımı zorunlu kılmıştır. Hareketli yapıların tüm aşamalarını yapabilen ticari bir program mevcut değildir. Ancak her aşama için, farklı, birçok kullanıcı dostu ticari program mevcuttur. Tasarım sürecinin etkili ve hızlı olabilmesi için, her bir aşamada kullanılan program ile diğer aşamalardaki programlar arasında veri akışının olması

gerekmektedir. Ayrıca hareketli mekanizmaların tasarımında her aşamanın ara sonuçları yapının formunu etkilediğinden, tasarım sürecinin mimar tarafından organize edilmesi, tüm sürecin etkili ve hızlı tamamlanmasını sağlayacaktır. Hatta mekanizma ve yapı elemanları konularında temel bilgi sahibi bir mimar mevcut ticari yazılımları kullanarak detaylandırma gibi bölümler hariç, tasarımın büyük bir bölümünü yapabilir. Bu çalışmada, mühendislik ve mimarlık, konuları birlikte değerlendirilmiş ve mimari prototipten nihai tasarıma kadar olan tüm sürecin dâhil olduğu, bütüncül bir metodoloji hareketli yapılar için geliştirilmiştir. Şekil 1'de bu metodolojinin adımları ve bu adımlarda uygulanan yöntemler gösterilmiştir. Bu diyagramda dikdörtgen kutular temel adımları, elips içindeki bilgiler ise adımların ara çıktılarını ifade etmektedir.

1. *Adım mimari prototip çalışması:* Kavramsal, işlevsel, biçimsel, strüktürel ve diğer mimari parametreler göz önünde bulundurularak ön tasarım ile yapı formu oluşturulur [32]. Mimari biçimleniş (leke) çalışmaları ile bulunan yapı formu ölçekli olarak 2 ve 3 boyutlu Autocad'de çizilir. Diğer aşamalarda kullanılmak üzere yapının dış boyutlarını içeren dwg ve dxf dosyaları hazırlanır.

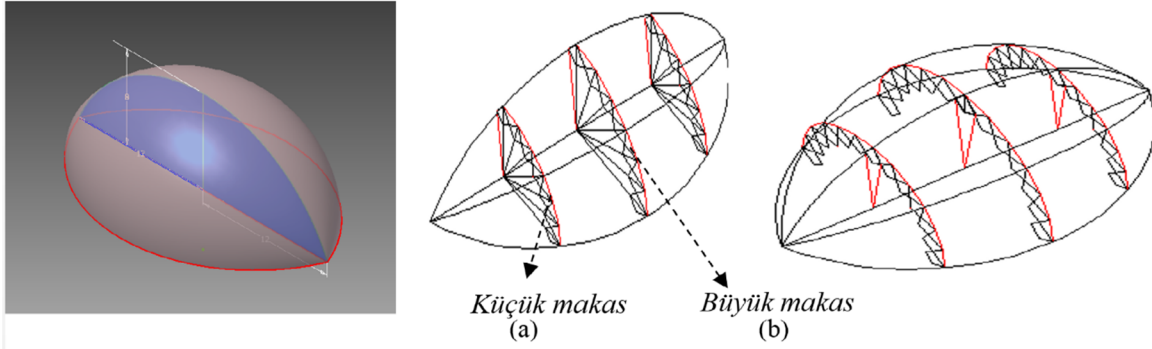
2. *Adım mekanizma tasarımı:* Kinematik tasarımda, sistemin hareket şekli ve bu harekette takip edeceği yol önemlidir. Hareket için verilen kararın tasarım ile bütünleşmesi gerekir. Bu hareket çizgisini yapabilecek mekanizma tipi, literatürdeki örnekler de göz önünde bulundurularak belirlenir. Bu çalışmada hareket mekanizması olarak yaygın olarak kullanılan makas mafsal mekanizması tercih edilmiştir. [2] Çubuklar birbirine bağlanırken orta noktalardan olan mafsal bağlantıyla dönmeye izin verir. Mekanizma hareket yolu (düz, eğik, dairesel, vb.), hareketli makas mekanizmasının çubuklarının mafsal bağlantı noktalarına göre şekillenir. Felix Esrig [20] ve Gantes'in [18] verdiği kinematik denklemlere göre mafsal sayısı, makas sayısı, çubuk eleman sayısı; elemanların koordinatları ve uzunlukları bulunur. Yapının dış boyutlarını içeren dxf dosyası Autodesk Force Effect Motion'a aktararak ve kinematik tasarım sonuçlarına göre mekanizma modellenerek belirlenen hareketin yapılıp yapılamadığı gözlemlenir. Ayrıca farklı başlangıç hızları verilerek mekanizmanın uygunluğu değerlendirilir. İstenilen hareket elde edilemediyse veya mekanizma düzgün çalışmıyorsa (mekanizmadaki olası kilitlenmeler, dinamik yükler sonucu oluşan titreşimler vs.) bu adım ve/veya bir önceki adım tekrarlanır. Böyle bir durumda başlangıçta belirlenen yapı formunda bazı değişikliklerin olması söz konusu olabilmektedir. Çubuk uzunlukları, mafsal ve makas koordinatları, açık ve kapalı durumu için dxf dosya olarak ara çıktı elde edilir.



Şekil 1. Bütüncül tasarım metodolojisi algoritması (Integrated design methodology algorithm)

3. Adım yüzey kaplaması membran tasarımı: Membran çalışması Forten 2000 programı ile yapılmıştır. Force Effect Motion'dan aktarılan dxf dosyası kullanılarak açık formdaki yapı yüzeyi tanımlanır. Burada kablo elemanları, kiriş elemanları, membran elemanları ve malzemeleri; bağlantı noktalarının ve düğüm noktalarının serbestlik dereceleri; ön gerilme değerlerine göre şekil bulma işlemi yapılır. Eğer arzu edilen form elde edilemezse

kablo, kiriş ve/veya malzeme tanımlanması değiştirilerek ve/veya ön gerilme değerleri değiştirilerek istenilen form elde edilinceye kadar şekil bulma işlemi tekrarlanır. İstenilen forma ulaşıldığında rüzgâr yükü eklenerek membran yüzey için analiz yapılarak stres değerleri bulunur. Bulunan stres değerlerine bağlı olarak yüzey kaplamasında yırtılma, katlanma oluşup oluşmadığı incelenir. Gerektiğinde bu aşama veya başlangıçtaki mimari



Şekil 2. Elipsoit yapı formu, büyük ve küçük makas sistem bağlantıları (a) yarım (b) tüm (Ellipsoid structure form, large and small scissors system connections (a) half (b) full)

tasarım çalışması tekrarlanır. Eğer istenen forma ulaşılmışsa yüzey formu dxf dosyası olarak detaylandırma çalışması için Autocad'e aktarılır. Rüzgâr yükü ve germe sonucu oluşan ve membran yapısal analizi sonucunda bulunan düğüm noktalarındaki kuvvet ve momentler Autodesk Inventor'a aktarılmak üzere dwg dosyası olarak saklanır.

4. Adım hareketli mekanizmanın yapısal tasarımı: Bir önceki adımda bulunan kuvvet ve momentler Autodesk Inventor'a dwg dosyası olarak aktararak yapısal analize geçilir. Burada yapıya etki eden yükler sonucu düğüm noktalarında oluşan kuvvet ve momentlere göre hareketli mekanizmayı oluşturan elemanların kesitleri ve mafsalın detayları bulunur.

5. Adım hareket (açılıp kapanma) analizi: Yine Autodesk Inventor programı kullanılarak tüm yapı (membran kaplama hariç) 3 boyutlu modellenerek, yapıya etki eden yükler ve hareket sonucu oluşan dinamik kuvvetlerin dâhil edildiği gerçek çalışma koşulları altında, yapının çalışması simüle edilir. Simülasyon sırasında elde edilen veriler tasarım değerleri içinde olduğunda ve belirlenen yapı formu oluşturulmuş ise bütünlük tasarım tamamlanır yoksa 1. adıma dönülerek tüm işlemler tekrarlanır.

5. TASARIM ÖRNEĞİ (DESIGN EXAMPLE)

Yukarıda sunulan bütünlük tasarım yöntemin etkinliği ve uygulanabilirliği; mimari açıdan farklı işlevsellikler kazandırılabilen, ihtiyaçlara göre şekillendirilebilen germe membran yüzeyi ile örtülmüş, makas mafsal mekanizmalı bir hareketli yapı örneği üzerinde gösterilmiştir.

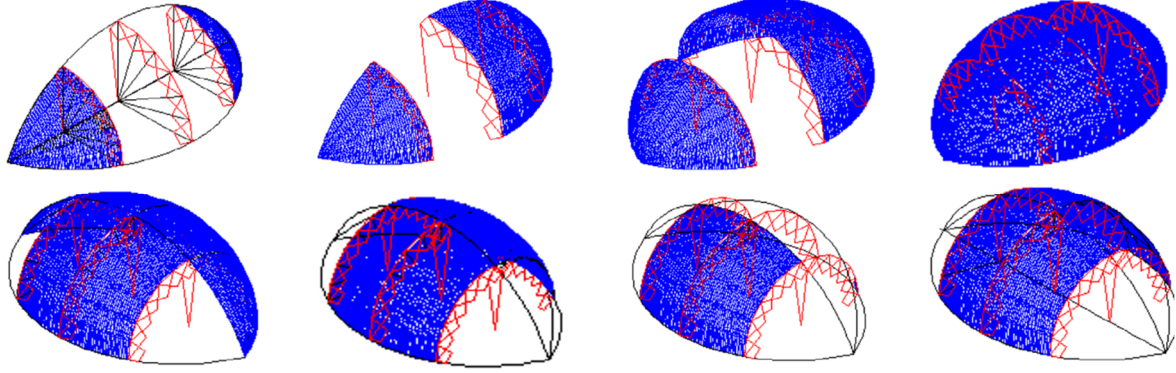
5.1 Mimari Tasarım (Architectural Design)

Günümüzde fuar, festival vb. etkinlikler sıklıkla düzenlenmektedir. Yapılacak etkinlik türüne ve iklim koşullarına göre, farklı biçim ve fonksiyonlar verilebilecek hareketli portatif bir yapı oluşturulması hedeflenmiştir. Bu hareketli yapının ön tasarımı

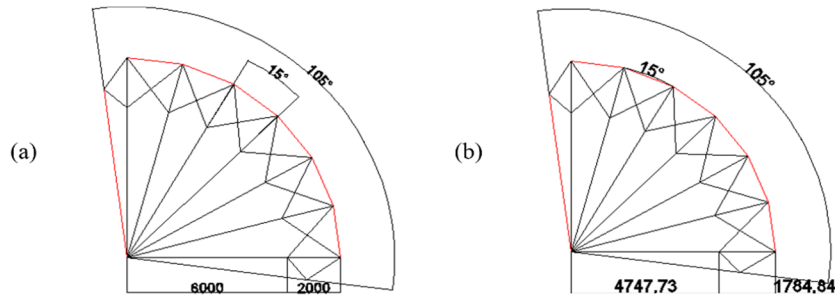
yapılırken zaman, ışık, sıcaklık ve mekânsal ihtiyaçlara göre de şekil değiştirmesi öngörülmüştür. Diğer bir ifade ile bu yapının mevsimin özelliklerine göre kullanıcıya konforlu ve koruyucu bir mekân sağlaması beklenilmiştir. Bunun için farklı birçok model oluşturulabilir. Bu çalışmada Şekil 2'de görüldüğü gibi elipsoit bir yapı formu öngörülerek modelleme yapılmıştır. Yapı, biçim değiştirirken çok boyutlu görsellikler sunmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak üzere, mevcut hareketli yapıların dönüşüm yeteneği incelenerek, makas şeklinde, esnek ve dönüştürülebilir bir yapı önerilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü gibi ihtiyaca göre açılıp kapanarak 8 farklı işlevselle mekân oluşturabilen hareketli bir yapı, tasarlanmıştır.

İstenilen yapı Şekil 3'de görüldüğü gibi 6 metre aralıklarla yerleştirilen küçük ve büyük makas mekanizmalarının hareketi ile elde edilmektedir. Bu çalışmada farklı açılıp kapanma modelleri de uygulanabilir, ancak burada işlevsel duruma göre Şekil 3'teki çalışma modeli tercih edilmiştir. İki tane büyük, dört tane küçük aynı makas mekanizmasından oluşan yapı, Şekil 3'de gösterildiği gibi makasların birbirinden bağımsız açılıp kapanması ile bu sekiz farklı mekân elde edilmiştir. Bu tarz dönüşümler kullanım alanları için önemli esneklikler sağlamaktadır.

Şekil 4'de küçük ve büyük makasların boyutları verilmiştir. Büyük kemer 8000mm yarıçap, küçük kemer 6532,57mm yarıçap uzunluğundadır. Makasların açık formdaki iki uç noktası arasındaki açı 105° iken kapalı yüzey alanı arasındaki açı 90° dir. Makasın içindeki her dilim 15° derece olarak tasarlanmıştır. Her bir makas-mafsal mekanizması tek serbestlik derecesine sahiptir. Bu çalışmada, 6 m açıklıklı dört aks modellenmiştir. Sistemin tümü 6000*4=24000mm uzunluğundadır. Her bir mekanizma paralel olarak açılmaktadır. Yaklaşık olarak, yapının yarısı açıldığında 405m², tamamı açıldığında ise 810m², alanı kapatmaktadır.



Şekil 3. Sekiz farklı açılıp kapama imkânı veren elipsoid form (Ellipsoid form which has eight different opening and closing opportunities)



Şekil 4. Makas ölçüleri (a) büyük makas (b) küçük makas (Scissors dimensions (a) large scissors (b) small scissor)

5.2 Mekanizma Tasarımı (Mechanism Design)

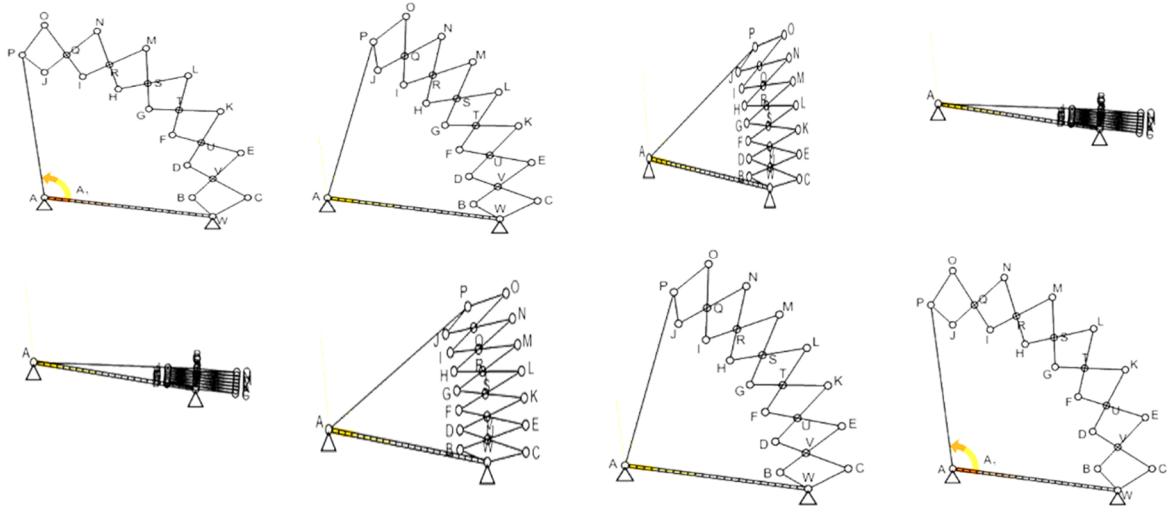
Şekil 5'de gösterilmiş olan makas-mafsals mekanizmasının ön tasarımı Autodesk Force Effect Motion programı ile yapılmıştır. Makas-mafsals mekanizmaları (küçük ve büyük olan), A merkezlerindeki motorlara bağlı A-AP çubuğunun saat yönünün tersine 105° derece dönmesi ile açılmaktadır. Autodesk Force Effect Motion programında A noktalarındaki motora güç ve açısal hız tanımlanarak mekanizmanın hareketi sağlanır. Program istenilen her hangi nokta için yer değiştirme, hız ve ivme değerlerini grafik ve tablo olarak verebilmektedir. Mekanizmanın izlediği yörünge ve elemanların hareketleri dinamik olarak izlenmiş olup, küçük ve büyük mekanizmaların P noktasına ait yer değiştirme, hız ve ivme incelenmiştir.

5.3 Yüzey Kaplaması Membran Tasarımı (Fabric Membrane Design)

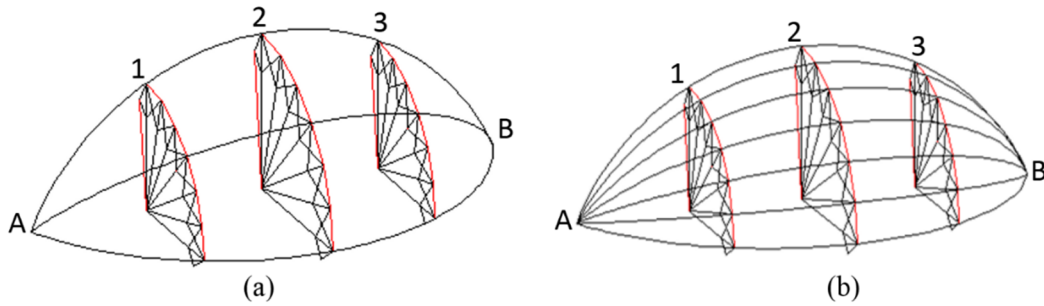
İki aks arasındaki açıklığa membran yapı elemanı gerilerek kapalı mekânlar elde edilmektedir. Bu çalışmada iki ve altı dilimli olmak üzere iki farklı yaklaşım ile membran yüzey kaplaması yapılmıştır. *İki Dilimli* membran yüzey kaplama yaklaşımı Şekil 6(a)'da gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi akslar arası ayrı ayrı (A-1, 1-2, 2-3 ve 3-B) bağımsız olarak membran yüzeyle kaplanmıştır. A noktası ve 1 nolu aksın 0, 45 ve 90 derecedeki düğüm noktaları; 1 ve 2 nolu aksın 0, 45 ve 90 derecedeki düğüm noktaları kemer profiller ile birbirine bağlanmıştır. Benzer

şekilde 3-B ve 2-3 aksları da bağlanmıştır. Bu şekilde her bir aksta iki dilimli membran yüzeyler oluşmuştur. *Altı Dilimli* membran yüzey kaplama yaklaşımı ise Şekil 6(b) gösterilmiştir. İki dilimide olduğu gibi akslar arası ayrı ayrı (A-1, 1-2, 2-3 ve 3-B) bağımsız olarak membran yüzeyle kaplanmıştır. A noktası ve 1 nolu aksın tüm düğüm noktaları; 1 ve 2 nolu aksın karşılıklı tüm düğüm noktaları kemer profiller ile birbirine bağlanmıştır. Benzer şekilde 3-B ve 2-3 aksları da bağlanmıştır. Bu şekilde her bir aksta altı dilimli membran yüzeyler oluşmuştur. Bu çalışma, aynı hareketli yapı mekanizmasının yüzeyi kablo ve kemer profillerle farklı biçimlerde kaplanarak değişik görseleğe sahip çözümler elde edilebileceğini göstermektedir. Şekil 7'de görüldüğü gibi kablolar ve kemer profiller yüzey formunu belirlemektedir. Makas-mafsals mekanizmasının tam açılma aşamasında uygulanan kuvvetlerle membran gerilerek en son halini almaktadır. Kabloların çapı 16mm, en kesit alanı 157 mm² çelik-PVC; kemer profil, Ø 168,3*7,1 ölçülerinde çelik ve kaplama malzemesi (örtü kumaşı) Ferrari Prec T1502 [30] malzemesi seçilmiş olup, bu malzemelerin özellikleri aşağıda verilmiştir.

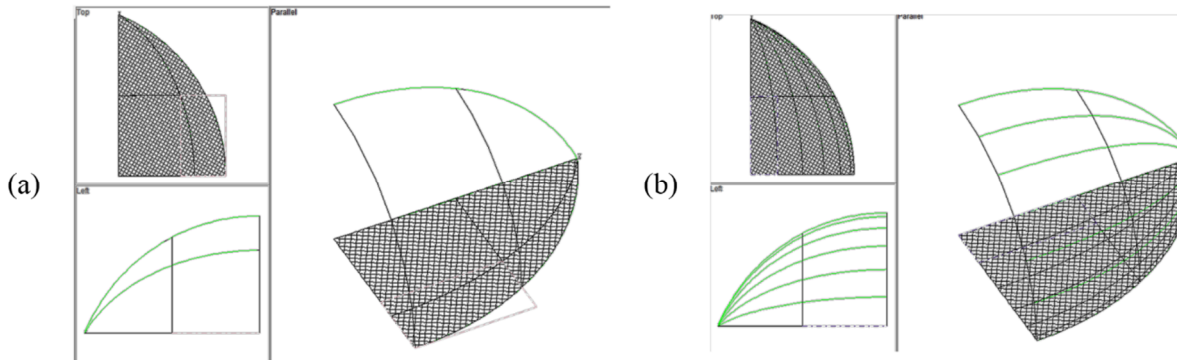
- Çelik ve çelik-PVC Elastisite modülü $E = 210\text{GPa}$, Poisson oranı $\nu = 0,3$ ve yoğunluk $\rho = 7800\text{ kg/m}^3$ tür.
- Ferrari Prec T 1502 $E_{atkı} = E_{çözgü} = 96000\text{ kg/m}$ ve yoğunluk $\rho = 1,33\text{ kg/m}^2$. Şekil 8'de örtü kumaşının detayı ve dokuma doğrultuları verilmiştir.



Şekil 5. Makas-mafsalsız mekanizmanın açılıp kapanma hareketi (Scissor-hinge mechanism opening and closing motion)



Şekil 6. Membran yüzey kaplama yaklaşımları (a) iki dilimli şekil (b) altı dilimli şekil (Membrane fabric surface covering approaches (a) the two slice (b) the six slice shape)



Şekil 7. Membran yüzey kaplamayı ağlara bölme (a) iki dilimli şekil (b) altı dilimli şekil (Membrane fabric surface cover meshing approaches (a) the two slice (b) the six slice shape)



Şekil 8. Ferrari Prec T 1 Dokuma özellikleri (Ferrari Prec T 1 Weaving properties) [30]

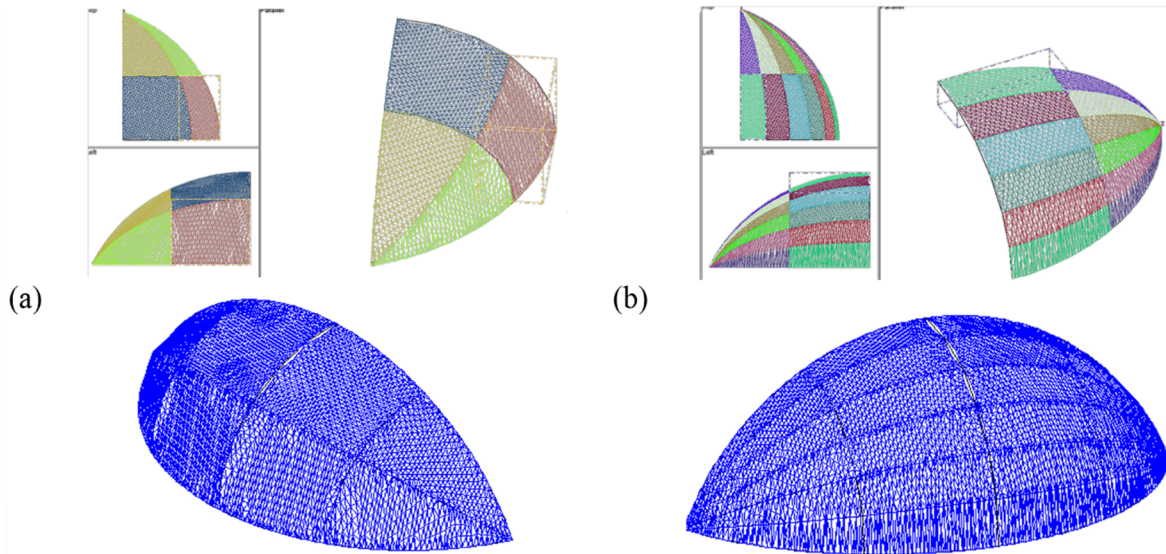
Membran germe yapının son biçiminin (form finding) bulunması için Bölüm 3,3'te belirtilen kuvvet yoğunluk (force density) metodu kullanılmıştır. Biçim

bulmak için Şekil 9'da görüldüğü gibi, membran dikdörtgen ağ elemanlarla, kablo ve kemer profiller ise çubuk ağ elemanlarla modellenmiştir. Kablo ile membran ve kemer profil ile membran arasında kaymanın olmadığı farz edilmiştir. Makas-mafsalsız mekanizmasının açılması için A ve W noktalarından uygulanan kuvvet, membran elemanın biçimini oluşturan germe kuvvetlerine karşılık gelmektedir. Verilen gerilmeler, kablunun ve kumaşın gerilmeleri, son şeklin bulunmasında önemli olmuştur. Kumaşa çözü ve atkı yönünde gerçekleşen gerilme 0,2N/mm olarak seçilmiştir. Kablo ve kemer profillere uygulanan öngerilme yükleri de 2N/mm olarak

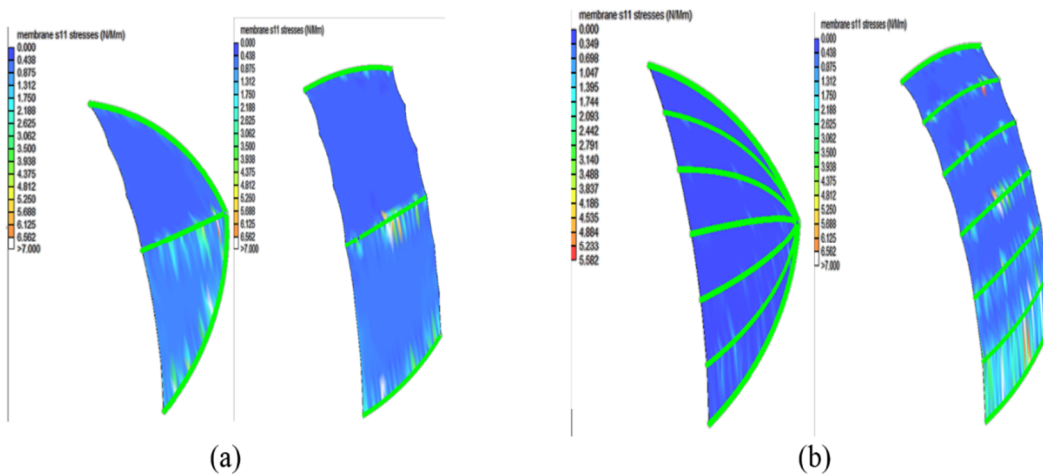
seçilmiştir. Biçim bulma işleminden sonra elde edilen membranın biçimi iki ve altı dilimli tasarımlar için Şekil 10'de görülmektedir. Membranın maruz kaldığı dış (rüzgâr, kar gibi) yükler altındaki kararlı şekillerin ve gerilmelerin bulunması için doğrusal olmayan analizin yapılmıştır. Hareketli yapının, karlı havalarda kullanılmadığı ve mekanizmanın kapatıldığı düşünülerek kar yükü dikkate alınmamıştır.

Doğrusal olmayan analizlerde, membranın maruz kaldığı dış yük olarak rüzgâr yükü alınmıştır. Bu analiz altı noktalı üçgen ağ elemanları kullanılarak sonlu elemanlar metodu ile yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi için biçim bulmakta kullanılan dikdörtgen elemanlar üçgen elemanlara bölünmüştür. Burada iki farklı yönden gelme olasılığı dikkate

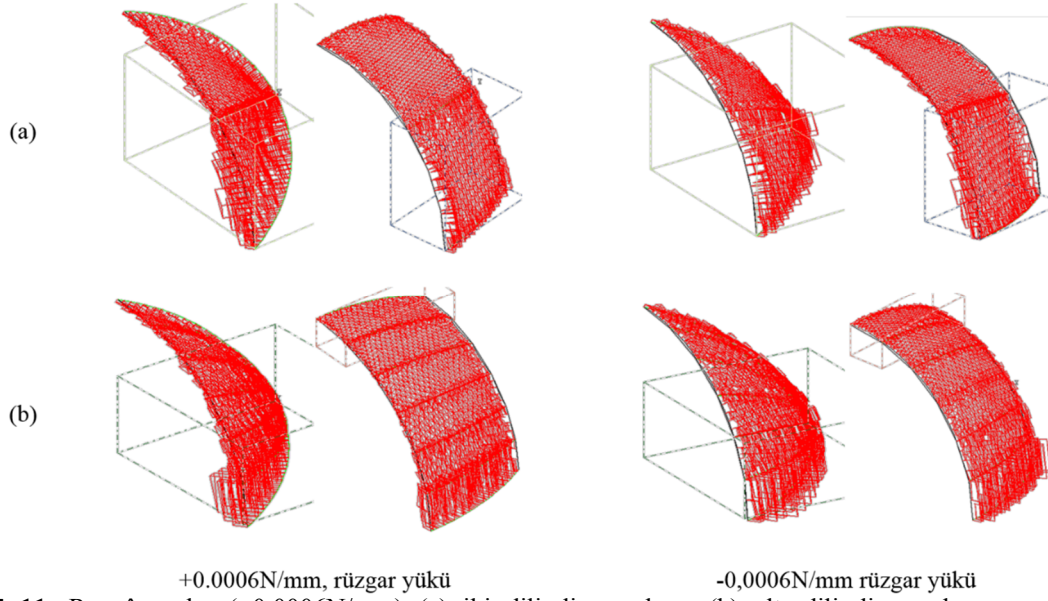
alınarak Şekil 11'de görüldüğü gibi $\pm 0,0006\text{N/mm}$ lik eşdeğer rüzgâr yükü eklenip, doğrusal olmayan analiz yapıp, gerilmeler değerlendirilmiştir. Şekil 12'de, iki ve altı dilimli membran örtü tasarımında sisteme $\pm 0,0006\text{N/mm}$ eklenen rüzgâr yükü neticesinde membrandaki gerilme değerleri görülmektedir. Kullanılan membran malzemenin akma değeri $19,62\text{N/mm}$ dir. Membran gerilme değerleri iki dilimli membran için 0 ile $47,61\text{N/mm}$, altı dilimli membran için 0 ile $15,08\text{N/mm}$ arasında değişmektedir. Bu durumda altı dilimli tasarım limitler içerisinde çalışırken iki dilimli tasarım rüzgâr yükü altında membran örtüde yırtılma ve/veya plastik deformasyonlar oluşmaktadır. Eğer iki dilimli tasarım kullanılacaksa farklı bir örtü malzemesinin veya aynı malzemenin birkaç kat kullanılması düşünülmelidir.



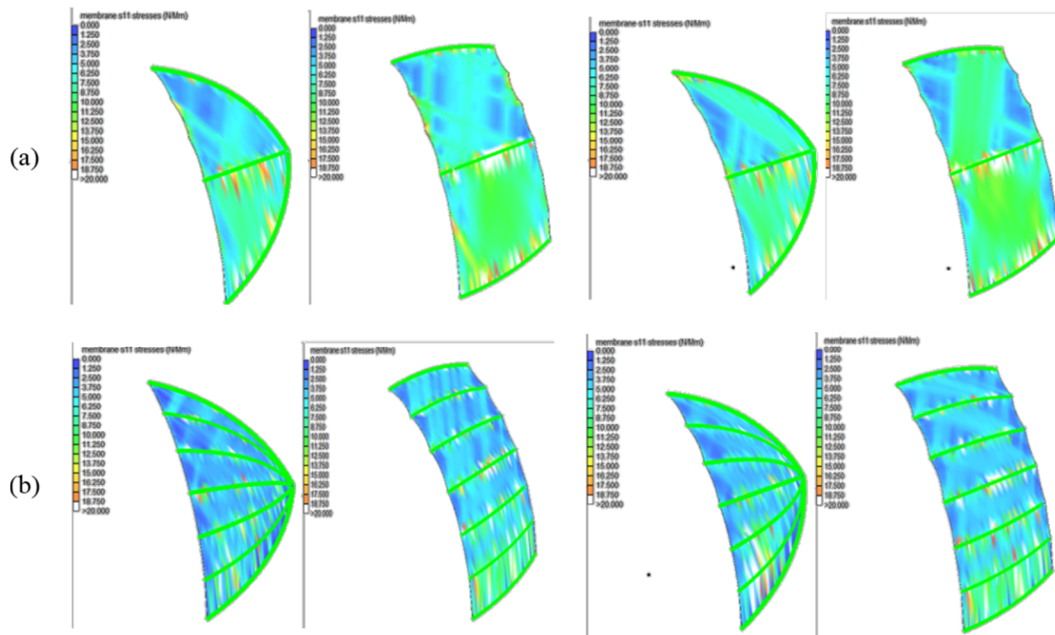
Şekil 9. Biçim bulma (üçgen elemanlarla) (a) iki dilimli şekil (b) altı dilimli şekil (Form-finding (with triangle elements) (a) the two slice (b) the six slice shape)



Şekil 10. Biçim bulma - gerilme dağılımı (a) iki dilimli şekil ve (b) altı dilimli şekil (Form-finding - stress distribution (a) the two slice (b) the six slice shape)



Şekil 11. Rüzgâr yükü ($\pm 0,0006\text{N/mm}$) (a) iki dilimli membran (b) altı dilimli membran (Wind Load ($\pm 0,0006\text{N/mm}$) (a) the two slice (b) the six slice shape)



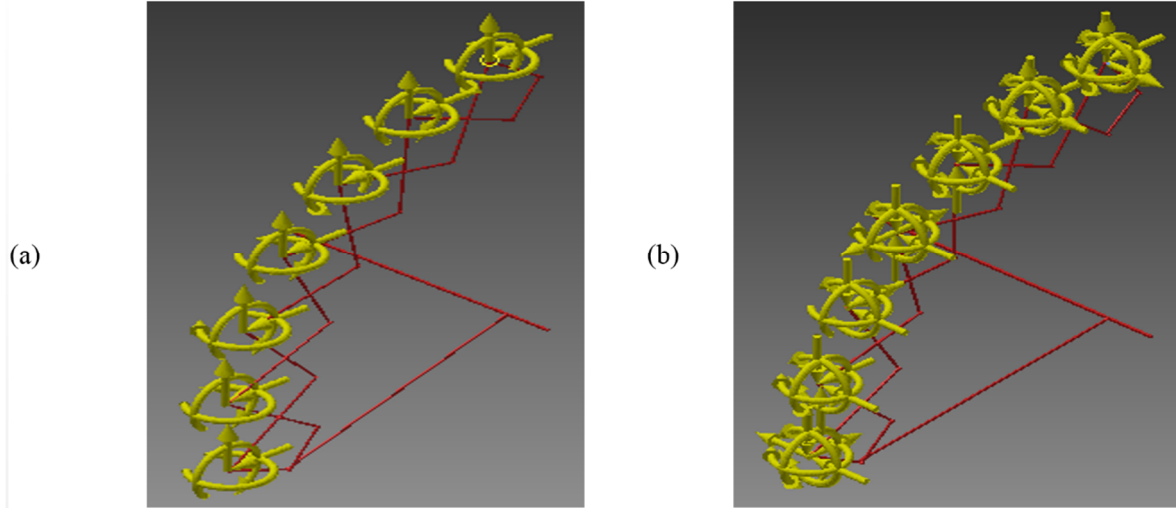
Şekil 12. Rüzgâr yükü ($\pm 0,0006\text{N/mm}$) gerilme dağılımı (a) iki dilimli membran (b) altı dilimli membran (Wind Load ($\pm 0,0006\text{N/mm}$) stress distribution (a) two slice (b) six slice shape)

5.4 Hareketli Mekanizmanın Yapısal Tasarımı (Structural Design of Deployable Structure)

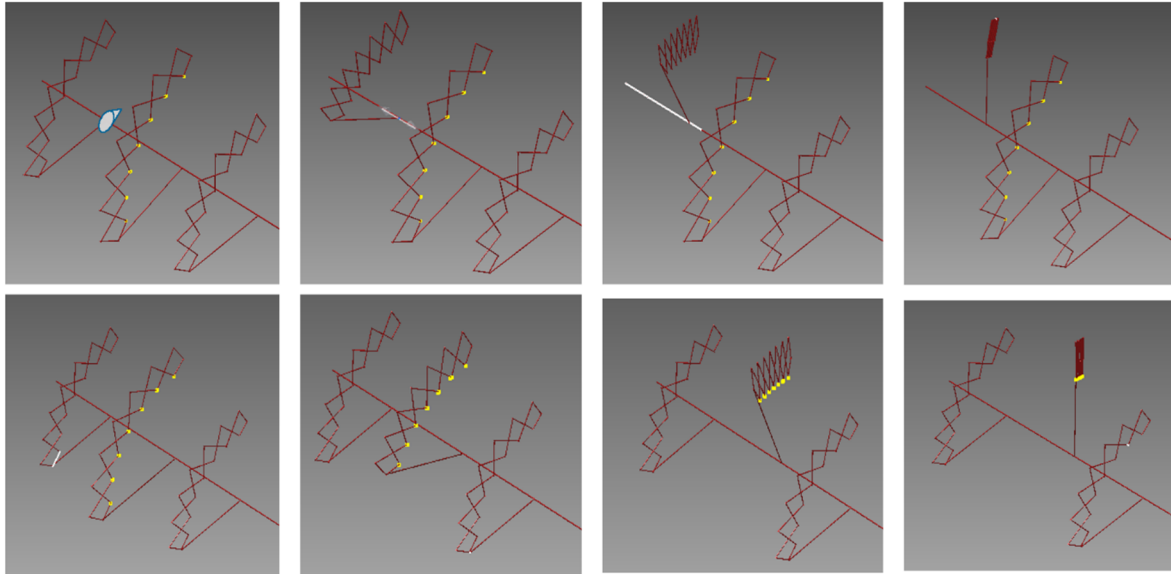
Membrandan gelen yükler ve hareket için uygulanan kuvvetler göz önünde bulundurularak makas-mafsallı mekanizmasının her bir elemanın tasarımı (kesit detayları bulunması) gerçekleştirilmiştir.

Yüzey örtüsü membrandan gelen ve ForTen 2000 ile hesaplanan x, y, ve z doğrultularındaki kuvvetler ve momentler mekanizmaya harici yükler olarak

tanımlanmıştır. Şekil 13’de makas mekanizmasını üst düğüm noktalarına (membranın bağlandığı noktalara); membrandan aktarılan kuvvetler görülmektedir. İki dilimli membran tasarımındaki maksimum gerilmeni yüksek olması ve altı dilimli tasarımdaki biçimin ön tasarımdaki modele en yakın olması sebebiyle çalışmanın bundan sonraki bölümünde sadece altı dilimli membran tasarımı ele alınmıştır. Mekanizma malzemesi olarak yapısal çelik seçilmiştir. Autodesk Inventor Programı kullanılarak, üç boyutlu çerçeve analizi yapılarak mekanizma elemanları tasarlanmıştır.



Şekil 13. Membrandan gelen kuvvetler ve momentler altı dilimli için (a) büyük makas (b) küçük makas (The membrane forces and moments for a six slice (a) large (b) small scissors)



Şekil 14. Büyük ve küçük kemerin Autodesk Inventor ile hareketleri (Large and small arches motion with Autodesk Inventor)

5.5 Hareket (açılıp kapanma) Analizi (Motion Analysis)

Autodesk Force Effect Motion ile iki boyutlu ön tasarımı yapılan büyük ve küçük makas-mafsals mekanizmasının Autodesk Inventor ile her bir çubuk ve birleşim elemanları üç boyutlu olarak tek tek tasarlanıp, birleştirilip, hareketleri tanımlanıp, dijital prototipi oluşturulup hareket simülasyonu yapılmıştır. Şekil 14'de görülen farklı mekanların, mekanizmaların farklı hareket tanımlamaları ile elde edilip edilmediği dijital prototip üzerinde yapılan simülasyonlarla incelenmiş ve mekanizmaların uygun biçimde çalıştığı görülmüştür.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Hareketli yapılar gelecekte, geleneksel yapılardan farklı bir şekilde kullanımı gittikçe artacaktır. Bu

yapılar bazen tamamen hareketli, bazen de geleneksel bir yapının bir bölümünde hareketli yapı ile kullanıcıya farklı kullanım imkânları sağlayacaktır. Hareketli yapılar için birçok örnek bulunmaktadır, ancak mimari tasarım, mekanizma tasarımı, yüzey kaplama membran tasarımı, hareketli mekanizmanın yapısal tasarımı ve hareket (açılıp kapanma) analizinin (simülasyon) sunulduğu bütüncül bir tasarım yöntemi ve uygulama alanı bulunmamaktadır. Hızlı inşa edilebilir, taşınabilir, açılıp kapatabilir, esnek kullanım özelliklerine sahip hareketli yapılar için bütüncül bir tasarım yöntemi geliştirilerek mühendislik ve mimari açıdan uygulanabilir çözümler sunabilecek konsept önerilmiştir. Bu konsept ve bütüncül tasarım metodolojisi farklı ihtiyaçlara cevap verebilen ve etkinliğin büyüklüğüne göre büyüme imkanı da sunan esnek örnek bir yapı üzerinde gösterilmiştir. Bu çalışmada mimarın inşaat mühendisinin, mekanikçinin birlikte çalıştığı

disiplinler arası bütüncül bir tasarım metodolojisi geliştirildi. Hareketli yapıları tasarımında, analizinde ve simülasyonlarında 4 farklı program kendi içinde disiplinler arası geçiş ile birbiriyle uyumlu olarak kullanıldı. Enerji dostu yapıların tasarımında, afet yapılarında hızlı kurulum, kullanılabilirlik konularının kullanımı her zaman için güncel olup daha etken kullanılması önemlidir. Doğal bir çevrede, farklı alanlarda kullanılabilir, farklı ihtiyaçlara göre açılıp kapanma ile esnek bir kullanım imkanı sunuldu. Gelecek çalışmalarda, hareketli yapılarda malzemenin verimli kullanımı, maksimum açıklık, minimum malzeme kullanımı; açılıp kapanma işleminin tekrarda malzeme dayanımı, en uygun kullanım hızının tespiti, yapının burulma analizinin yapılması değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR (REFERANCES)

1. Werner, C. D. M., **Transformable and transportable architecture: analysis of buildings components and strategies for project design**. Master Tezi, Katolonya Politeknik Üniversitesi, 2013.
2. Akgün, Y., **A Novel Transformation Model For Deployable Scissor-Hinge Structures** Doktora Tezi, Stuttgart Üniversitesi, 2010.
3. Kronenburg, R., **Flexible: Architecture that Responds to Change**, Art Blume Print, Londra, İngiltere, 2007.
4. İnan N. ve Yıldırım T., "Mimari Tasarım Sürecinde Disiplinler Arası İlişkiler Eş Zamanlı-Dijital Ortam Tasarım Olanakları", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 24, No 4, 583-595, 2009.
5. Yılmaz B., Arditi D. ve Korkmaz S., "Yüksek Performanslı (Yeşil) Binalarda Bütünleşik Tasarım Sistemi", **1. Proje ve Yönetim Kongresi**, ODTÜ, Ankara, 394-407, 29 Eylül-1 Ekim 2010.
6. Çelebi G.Ü. ve Tosun S., "Bütünleşik Mimarlık Sistemleri: Rüzgar Türbinlerinin Yüksek Binalar ile Bütünleşik Tasarımı", **Politeknik Dergisi**, Cilt 14, No 3, 179-186, 2011.
7. **İnternet**: "Whole Building Design", http://www.wbdg.org/wbdg_approach.php, 2012
8. Bachman L. R., **Integrated Buildings: The Systems basis of Architecture**, John Wiley & Sons, New York, A.B.D., 2003.
9. William, Z. ve Clark, R., **Kinetic Architecture**, Van Nostrand Reinhold, New York, A.B.D., 1970.
10. Fox, M.L. ve Hu, C., "Starting from the Micro: a Pedagogical Approach to Designing Interactive Architecture." **In Smart Architecture: Integration of Digital and Building Technologies: Proceedings of the 2005 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture**, Savannah, Georgia: Savannah School of Architecture and Design (SCAD), Georgia, 78-93, Ekim 2005.
11. Maziar, A., **Transformable and Kinetic Architectural Structures: Design, Evaluation Design, Evaluation and Application to Intelligent Architecture**, VDM Verlag, Saarbrücken, Almanya, 2010.
12. Pinero, E. P., "Project for a Mobile Theatre." **Architectural Design**, Cilt 12, No 1, 154-155, 1961.
13. **İnternet**: "Transformable Design", <http://www.hoberman.com>, 2014.
14. Hoberman, C., "Unfolding Architecture: An Object that is Identically a Structure and a Mechanism." **Architectural Design**, Cilt 63, No 1, 56-59, 1993.
15. Escrig, F., "Expendable Space Structures." **Space Structures Journal**, Cilt 1, No 2, 79-91, 1985.
16. Escrig, F. ve Valcarcel, J.P., "Analysis of Expendable Space Bar Structures" **Proceedings of IASS Symposium on Shells, Membranes, and Space Frames**. Osaka, Japan, 269-276, 1986.
17. Gantes, C.J. "A Design Methodology for Deployable Structures" Doktora Tezi, MIT, 1991.
18. Gantes, C.J., **Deployable Structures: Analysis and Design**, WIT Press, Boston, A.B.D., 2001.
19. Melin, N.O., "Application of Bennett Mechanisms to Long-Span Shelter", Doktora Tezi, Oxford Üniversitesi, 2004.
20. Rosenfeld, Y., Ben-Ami, Y. ve Logcher, R. D., "A Prototype "Clicking" Scissorlink Deployable Structure", **International Journal of Space Structures**, Cilt 8, No 1, 85-95, 1993.
21. Lewis, W.J., **Tension Structures: Form and Behavior**, Thomas Telford, Londra, İngiltere, 2003.
22. Barnes, M.R., "Form and stress engineering of tension structures", **Structural Engineering Review**, Cilt 6, No 3-4, 175-202, 1994.
23. Pauletti, R.M.O. ve Pimenta, P.M., "Shape finding of membrane structures by the natural force density method", **Proceedings of the 6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures IASS-IACM 2008: "Spanning Nano to Mega"**, Cornell Üniversitesi, New York, A.B.D., 1-4, 28-31 Mayıs 2008.
24. Yıldız, A.E., **Mobile Structures Of Santiago Calatrava: Other Ways Of Producing Architecture**, Master Tezi, ODTÜ, 2007.
25. Susam G., **A Research on A Reconfigurable Hypar Structure for Architectural Applications**, Master Tezi, ODTÜ, 2013.
26. Ishii K., **Structural Design of Retractable Roof Structures**, WIT Press, Southampton, İngiltere, 2000.
27. **İnternet**: "Falcons, Braves stadium designs advance",

- <http://www.myajc.com/news/sports/falcons-braves-stadium-designs-advance/ngNkF/>, 2014.
28. **İnternet:** "Prairie House: House for a Fashion Pattern Maker and Fiber Artist", <http://www.orambra.com/~prairieHouse.html>, 2010.
29. El-Zanfaly,D., Active Shapes, "Introducing guidelines for designing kinetic architectural structures", **XV Congreso De La Sociedad Iberoamericana De Gráfica Digital**, Santa Fe Arjantin, 2011.
30. D'anza G., **ForTen 2000 User Manual**, 2002.
31. **İnternet:** "Software Tensile Architecture", <http://tecno.upc.edu/cotens/software.htm>, 2016.
32. İzgi, U., **Mimarlıkta Süreç, Kavramlar-İlişkiler**, YEM Yayınları, İstanbul, Türkiye, 1999.