

Hafif Strüktür Malzemelerinin Çağdaş Mimaride Yapıya Katkıları

Damla GÖKALP ATAN^{1*}, Adem SOLAK²¹Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Burdur²Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Burdur

Geliş Tarihi (Received): 02.01.2023, Kabul Tarihi (Accepted): 24.03.2023

✉ Sorumlu Yazar (Corresponding author*): damlagokalp.mim@gmail.com

☎ +90 248 2132757 📠 +90 248 2132704

ÖZ

Eski çağlardan başlayıp, günümüz çağdaş yapılarına kadar gelen mimari, insanoğlunun hayatının hep bir köşesinde bulunmuştur. Dolayısıyla ihtiyaçlar doğrultusunda, bir örtü düzeneği sayesinde oluşturulan çadırlardan, günümüz gökdelenlerine kadar birçok evre ile yapılar hep gelişmiştir. Sanayi Devrimi'nin de etkisiyle 20. yy içerisinde teknolojinin daha da hızlanması direkt olarak yapı sektörünü de değiştirip, geliştirmiştir. Mimariye katılan yeni malzemelerin uygulanması, yapıda farklı kavramları ortaya çıkarmış ve daha tercih edilir nitelikte olmuştur. Eskiden taşıyıcı özelliğinde olan malzemeler, yapının formuyla strüktürünü ayırıp, mimar ve mühendislerin tasarım dili haline gelmiş ve daha ulaşılabilir çözümler sunmaya başlamıştır. Özellikle 20. yy içinde üretilen ve mevcut yapı stoğunda hala geliştirilmeye devam eden hafif malzemeler, strüktür sistemlerin geldiği son aşama olup, yapıdaki birçok soruna cevap vermektedir. Çelik, katkılı beton, cam sistemler, ahşap sistemler, pnömatik sistemler, membran ve tekstil sistemlerden oluşan hafif strüktür malzemeleri, yapı fonksiyonuna; sürdürülebilirlik, enerji etkinliği, geri dönüştürülebilir malzeme kullanımı, afet durumundaki davranışı, akıllı mimariye katkıları, geçirgen alanlar ve erişilebilir mekân organizasyonları tasarımı gibi birçok avantajı da beraberinde getirmektedir. Bu çalışmada, hafif strüktür malzemelerin yapıların strüktür ve formuna dahil olurken tasarıma etkileri, yapıya ve çevresine katkısı, sürdürülebilir ve geri dönüştürülebilir yapı tasarımına etkisi, deprem ve yangın anında yapıya etkileri, afet sonrası geçici yapılaşmaya katkıları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çağdaş mimari, hafif strüktür malzemeleri, hafif yapı, yenilikçi malzemeler ve avantajları

Contribution of Lightweight Building Materials to Contemporary Construction

ABSTRACT

Starting from ancient times to today's contemporary structures, architecture has always been in human life. Therefore, in line with the needs, from tents formed by a cover mechanism to today's skyscrapers, structures have always developed with many phases. With the influence of the Industrial Revolution, the acceleration of technology in the 20th century directly changed and developed the building sector. The application of new materials added to the architecture has revealed different concepts in the building and has become more preferable. Materials that used to be carriers separated the form and structure of the building, became the design language of architects and engineers. Also, started to offer more accessible solutions. Lightweight materials, which were produced in the 20th century and are still being developed in the existing building stock, are the last stage of structural systems and has been an answer to many problems in buildings. Light structural materials, consisting of steel, reinforced concrete, glass systems, wooden systems, pneumatic systems, membrane and textile systems, have a building function; It brings many advantages such as sustainability, energy efficiency, use of recyclable materials, behavior in case of disaster, contributions to smart architecture, permeable spaces and accessible space organization design. In this study, while being included

Hafif Strüktür Malzemelerinin Çağdaş Mimaride Yapıya Katkıları

in the structure and form of the structures, the effects of lightweight structural materials on the design, their contribution to the structure and its environment, its effect on sustainable and recyclable building design, its effects on the structure during earthquake and fire, and their contribution to post-disaster temporary housing were examined.

Keywords: Contemporary architecture, lightweight structural materials, lightweight construction, innovative materials and their advantages

GİRİŞ

Mimarlık kavramı, insanoğlunun var olduğu günden bu yana, belirli amaçlar doğrultusunda fonksiyonların formu izlediği bir tasarım süreci olarak gelişmiştir. Göçebe yaşamdan, yerleşik düzene geçerek kendi ihtiyaçlarından doğan barınma standartlarını geliştirmiş ve bu geliştirmeler günümüze kadar devam etmiştir. Çadır sistemlerden gökdelenlere kadar uzanan malzeme yolculuğu, yapıların strüktüründen formuna kadar birçok alandaki işlevini değiştirmiştir. Özellikle Endüstri Devrimi sonrası hızla gelişmeye başlayan teknoloji ile birlikte yenilikçi malzemeler üretilmeye başlanmış ve ardından mimaride de uygulanmaya başlanmıştır. Endüstri Devrimiyle yaşanan bu mimari dönüşüm, tasarımcıları yeni olanı arama arayışına itmiştir. Mimarlar ve mühendislerin daha yüksek ve daha sağlam yapılar inşa edebilmek gibi yarışların içinde olması, mevcut teknolojilerden yararlanıp, daha iyisini ortaya koymak için her geçen gün yapı sektörünü de daha ileriye taşımıştır. Daha çok proje safhasında ortaya çıkan sorunlara bir çözüm niteliğinde kullanılan yenilikçi malzemelerin, yapılara entegre olurken daha sağlıklı ve arzulanan forma yakın bir tasarım ortaya koyduğu görülmüştür. Özellikle 20. yy'da tüketimdeki hızın ve dünya nüfusunun artması, çevre ve enerji kirliliğinin bitki ve hayvan yaşamını tehdit etmesi, yapıları daha sürdürülebilir tasarım yaklaşımlarına itmiştir. Bu bağlamda üretilen hafif strüktür malzemeler, her ne kadar teknik istekler doğrultusunda üretilse de, yapı form ve strüktür tasarımına katkıları ile damga vurmuştur. Yapıya sağladığı avantajlar kapsamında ise sürdürülebilirlik, enerji tasarrufu, statik kolaylığı, nakliye ve üretimdeki sağladığı kolaylıklar, hafif strüktür malzemelerin ortaya çıkardığı geçirgen geçişken mekânları, yapıyla bütünleşmiştir. Özellikle 21. yy çerçevesinde çağdaş malzemelerin sağladığı avantajlar sayesinde ekolojik ve çevreye saygılı yapıların ortaya konması, mimar ve mühendislerin tasarımlarını yaparken daha çok çağdaş malzemeleri tercih ettiğini görmekteyiz. Say (1998) çalışmasında "Çağdaş Yapılarda Strüktür Biçim İlişkisi" yüksek lisans tezine göre çağdaş strüktür sistemlerin geleneksel yapı sistemlerinden malzeme, yük, taşıma ilkeleri, statik ilkeleri gibi birçok alanda avantajlarını karşılaştırmalı açıklamıştır. Tuğrul ve Sev (2015), "Geleceğin Sürdürülebilir Yapı Teknolojilerine Bir Bakış: Hafif Strüktürler" başlıklı makale-

sine göre hafif strüktürler, daha az malzemeyle hafiflikleri nedeniyle temele inen yükü azaltmalarıyla yapının birçok yönden tasarruf sağlamaları gibi pek çok açıdan sürdürülebilir mimarlık felsefesine uygun yapılar olduğunu vurgulamıştır. Ekinci ve Eşsiz (2005), Koceli Deprem Sempozyumu'ndaki yayınladığı bildirisine göre yapının ölü yükünün az olması ve faydalı yüke oranının küçük olması, depreme dayanıklı yapılar inşa etmek için önemli bir avantaj sunduğunu açıklamıştır. Dolayısıyla literatürde bir çok yönden alınan hafif strüktür malzemelerin strüktür ve formuna dahil olurken tasarıma etkileri, yapıya ve çevresine katkısı, sürdürülebilir ve geri dönüştürülebilir yapı tasarımına etkisi, deprem ve yangın anında yapıya etkileri, afet sonrası geçici yapılaşmaya katkılarının bir başlık altında irdelenmesi ve gelecekteki yapılaşmaya ilham vermesi önem arz etmektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada çağdaş hafif strüktür malzemelerinin, yapıya katılırken yapıya sürdürülebilirlik alanında tasarıma etkileri, yapıya ve çevresine katkısı, sürdürülebilir ve geri dönüştürülebilir yapı tasarımına etkisi, deprem ve yangın anında yapıya etkileri, afet sonrası geçici yapılaşmaya katkıları irdelenecektir. Çalışmanın incelenmesinde geniş literatür araştırması yapılmış, malzemelerin belirlenmesi ve açıklanması, yapıda kullanıldığı noktalar ve kullanımı bakımından doğal afetlere karşı verdiği tepki, malzemelerin tercih edilme nedenleri, strüktür tasarımındaki etkileri dünya genelinde önemli örnekler üzerinden analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Gökalp (2022), "Çağdaş Hafif Strüktür Malzemelerinin Yapı Formunda Kullanımı ve Tasarıma Etkisi" tezi üzerinden araştırma bulguları genişletilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılı çevremizi oluşturan strüktürler her zaman maksimum yükleme ve gerilme şartlarına göre tasarlanırlar. Yani, strüktürü oluşturan malzemenin büyük kısmı sadece bu olağan dışı pik yüklere karşı koyabilmek için yapıda yer alır. Tam da bu soruna yanıt olabilmesi amacıyla, hafif strüktürler geliştirmek üzerine çalışılmaktadır. Geliştirilen strüktürlerin amacı, bilinen strük-

Hafif Strüktür Malzemelerinin Çağdaş Mimaride Yapıya Katkıları

türel tasarımın sınırlarını aşarak ciddi bir malzeme tasarrufu sağlamak ve dinamik yüklere karşı daha iyi etkiler elde etmektir. Üretim, geniş açıklık geçme, hafiflik, nakliye, montaj kolaylıkları, kısa yapım süresi gibi ihtiyaçlar doğrultusunda geliştirilen yeni malzemeler yapı ölü yükünün, diğer sistemlere göre daha az olması sebebiyle deprem yükü, rüzgâr yükü, yapının kendi yükü gibi yüklerin karşısında sistemi daha avantajlı kılmaktadır. Özellikle farklı disiplinlerde kullanılan bir malzemenin ürün yöntemi, hafif yapı sektöründeki bir malzeme aktarıldığında estetik açıdan bakıldığı zaman, daha istenilene yakın ürünler ortaya çıkarmaktadır. Yüksek dayanımı sayesinde daha çok çelik malzemesi üzerinde yoğunlaşan sistemler; çelik, ultra yüksek performanslı beton, çift eğrilikli cam sistemler, ahşap sistemler, membran sistemler, pnömomatik sistemler ve tekstil sistemler yapılarada kullanılan hafif strüktür malzemelerdir.

Geçmişte yapıların yükseldikçe kolon kesitlerinin büyümesi, su basıncının yetersizliği, gerekse asansörün olmaması sebebiyle yüksek katlara ulaşımında zorluk yaşanması gibi engeller, tasarlanan yapı yüksekliğini kısıtlı kılmaktaydı. 1852'de Elisha Otis'in kullanıcılarını üst katlara güvenli ve kullanışlı bir şekilde taşıyan asansörü tanıtmasıyla ve aynı dönem içerisinde binaların en alt kattaki duvarların kullanışsızlık derecesinde kalınlaşmasından dolayı, mimaride çelik çerçeve sistemine geçilmesini ve yapıların kolaylıkla yükselebilmeye olanak sağlamıştır (Kılınc ve Sev, 2020). 1864'de yerel bir mimar olan Peter Ellis tarafından tasarlanan, Dünya'nın ilk demir çerçeveli cam giydirmeye cepheli ofis yapısı, mimarları endüstrileşmiş yapım yöntemlerine itmiş ve gelecekteki tasarımların da önünü açmıştır (Mestan, 2019). 1900'lerin ortalarında, II. Dünya Savaşı sonrası kent nüfuslarının hızla artması ve ortaya çıkan hızlı yapılaşma, yapı sektörünü endüstrileşmiş yapım yöntemlerini kullanıp, daha da geliştirmeye yönlendirmiştir. Yüksek yapıya ulaşma ve kolonsuz geniş açıklık geçme yarışı, yapının hafifliği ile daha kolaylaştığı için, hafif ve dayanıklı sentetik malzemelerin yapıya katılmasını sağlamıştır. 1900'lerin ortalarında uzay teknolojilerinin gelişimine paralel olarak ortaya çıkan şişme strüktürler bu zamana kadar tasarlanmış farklı bir disiplin olarak karşımıza çıkmaktadır. Mekânlar sınırlarını zorlayan, portatif, hareket edebilen, esnek ve geçişken tasarıma odaklı alanlara dönüşmüştür. Şişme sistemlerin kullanımı ile birlikte geçicilik, geçişkenlik ve taşınabilirlik kavramları, geleneksel çadır tipolojisine sahip portatif yerel mimarlık örnekleriyle ilişkili olarak mimari dilde yer almayı başarmıştır. Dolayısıyla üretilen her yeni malzeme yapı formuna bir şekilde adapte ettirilerek yapıya ve çevresine faydalı olması üzerinde çalışılmıştır. Malzemenin yapıyla bütünleşirken, morfolojisini, iklimsel yapısını, yenilikçi

ruhu, atomik yapısı gibi özellikleri mimaride ve iç mimaride yeni tasarımlara olanak sağlamıştır (Gezer, 2012).

Çelik

Çelik malzeme içeriği olarak, %2'den daha az karbon, manganez, silikon, fosfor, kükürt ve oksijen bulunan demir ve karbon alaşımıdır (URL-1, 2022). Çeliğin tarihsel süreci, Demir çağıının 4000 yıl öncesine kadar geriye gitmektedir. Daha önce en çok kullanılan metal olan bronz, yerini daha sert ve daha dayanıklı demire bırakmıştır. Genelde yapıların üst örtüsü için geliştirilen eğri dökme demir strüktürler, 19. yy'da Henry Bessemer'in karbon içeriğini indirgemek için erimiş demire oksijen vermekten daha etkili bir yol bularak yapısal çeliğin önünü açarak işlemi hızlı ve ucuz bir hale getirmiştir. Şimdiye kadar doğal taş malzemeler kullanılarak inşa edilen tonoz sistemlerine göre, taşıyıcı strüktüründe kiriş üzerine gelen yük dağılımında önemli derecede bir fark sağladığı görülmüştür. Çeliğin çekme dayanımı basınç dayanımına eşittir. Dolayısıyla bu özelliği sayesinde mimari tasarımlarda esnek tasarımları yapılabilir kılmaktadır. Kompozit beton ile karşılaştırıldığı zaman yaklaşık olarak yedi kat elastikliği yüksektir ve sünektir. Statik problemlere, dinamik etkilere ve titreşimlere uyumlu tepki vermektedir. Sehim sorunları olan taşıyıcı elemanların üretiminde daha ekonomik kesitler elde edilmektedir. Hava koşullarına bağlı olmamasından montaj kolaylığı sağlaması ve az iskeleli inşaatı olanak vermesi, yapının inşa süresini de kısaltmaktadır (Yıldırım, 2003). Portatif yapısı sebebiyle kolay söküp, takılabilen çelik, geri dönüşüm ile yeniden de kullanılabilir. Manyetik yapısı sayesinde, atık yönetimi kapsamında çeliklerin atıklardan ayrışması da kolaydır. Dolayısıyla geri dönüşüm malzeme potansiyeli ile daha sürdürülebilir bir yapıya da olanak tanımaktadır. Çeliğin tamamıyla geri dönüştürülebilirliği, üretimine yatırılan kaynakların kaybolmamasını ve sınırsızca tekrar kullanılmasını sağlar (URL-1, 2022). Günümüzde dayanımı ve geniş açık geçebilme özellikleri sayesinde geliştirilen son sistemlerden olan uzay kafes strüktürlerin ana malzemesi de çeliktir. Uzay kafes strüktürler; taşıyıcı elemanları, düğüm noktalarında, strüktür yüzeyindeki açılı birleşimlerde ve her yönde hareket eden yüklere karşı dayanıklı olan üç boyutlu taşıyıcı sistemlerdir (Tekgüvercin, 2002). Bu tür sistemlerde hiperstatiklik derecesi yüksek olduğu için, sisteme etkiyen yükler, elemanlar tarafından her yönde paylaşılır. Sistemin hafif ve modüler yapısal özelliğe sahip olması kolaylıkla montajının ve demontajının yapılabilmesine olanak tanımaktadır. Sistemler alt ve üst hatların arasındaki mesafe sayesinde siste-

Hafif Strüktür Malzemelerinin Çağdaş Mimaride Yapıya Katkıları

min arasında kalan boşlukların havalandırma ve tesisat borularının geçirilmesine olanak sağlamaktadır. Sistem elemanların düğüm noktalarında birleşme metotları çok çeşitli olmakla birlikte en uygun birleştirme metodu, dolu küreler üzerinde önceden açılmış olan deliklere boru elemanlarının uç kısımlarındaki civatalar yardımıyla bağlanmasıdır (Tekgüvercin, 2002).

Çift Eğrilikli Cam Sistemler

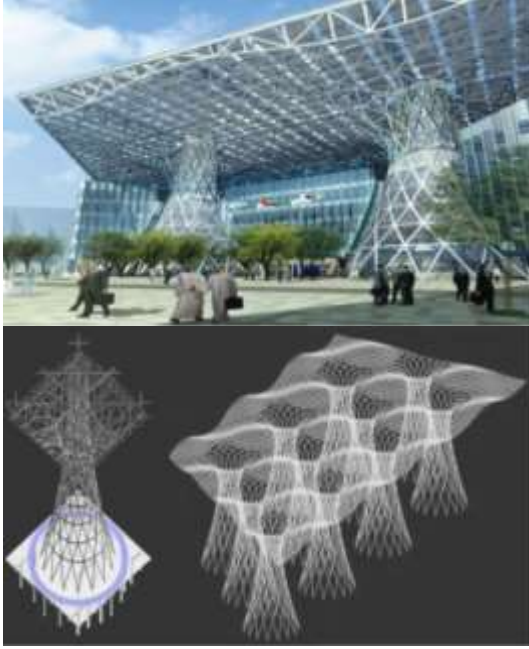
Cam, ana maddesi silikonoksit olan, kristalleşmeden maddenin katı haline kadar soğutularak elde edilen inorganik ergime ürünüdür (Sev ve ark., 2003). Mimarlığın geçmişten günümüze gelen yeterli ışık ve saydamlık kaygısı, geçirgen mekanların yaratılması, her daim ulaşılması gereken bir hedef olmuştur. Camın yapılara dahil edilmeye başlanmasından bu yana malzemenin teknik özellikleri geliştirilerek yapıda %80-85 oranında yapının soğutmasındaki enerji tüketimini azaltarak daha verimli çalıştığı görülmüştür (Sönmez ve Kiasif, 2018). Bu doğrultuda geliştirilen camın optik özellikleri, ısısal özellikleri, teknik özellikleri ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle günümüzde çok çeşitli bir malzeme olarak yer almaktadır. Zaman içerisinde geliştirilen cam, içerisine farklı maddelerin eklenmesiyle çeşitlenmiştir. Günümüzdeki çağdaş yapıların enerji etkinliği kapsamında cam malzemesi önemli bir yer tutmakta ve verimli sonuçlar vermektedir. Camlar, basit cam, flotal cam, ısıyla güçlendirilmiş cam, temperli cam, lamine cam, yalıtımlı cam, fotosensitif cam, fotokromik cam, kristalize cam paneller olarak sınıflandırılmaktadır (Sev ve ark., 2003).

Yapı endüstrisinin gelişmesiyle 19. yy'da dökme demir ve çeliğin kullanılmaya başlanması, ardından çerçeve sistemlerin oluşturulması, bu masif duvarlara olan bağımlılığı ortadan kaldırmıştır. Bu durum, taşıyıcı çerçevelerin arasındaki boşluğu değerlendirme imkânı vermiştir. Dolayısıyla tasarlanan bina cephelerinde özellikle cam kullanımı, hafif olmaları, estetik görünümleri, ışığı kırma özelliği, imalat ve montajlarının kolay olması, iklimle karşı direnci, kolay temizlenmesi ve diğer malzemelerle karşılaştırıldığında daha az yer kaplaması nedenleriyle kısa zamanda yapıların vazgeçilmez bir yapı kabuğu haline gelmiştir. Cam, geçirgen yapısıyla, mimaride sınır kavramını yeniden biçimlendirmiştir ve bu sayede yüzyıllar boyunca mimari tasarım üzerinde etkili bir malzeme olmuştur. Zamanla düz ve özelliksiz camların yerine geliştirilmeye devam eden renkli camlar, teknolojinin de gelişmesiyle birçok özelliği barındırabilir hale gelmiştir. Isı ve güneş kontrol kaplamaları, temperleme, laminasyon, opaklaştırma, gaz doldurma gibi belirli işlemler ile malzeme, daha güvenli, sürdürülebilir, dayanıklı ve yalıtımlı hale gelmiştir

(URL-2, 2011). Endüstri devrimi ile birlikte camın demir ve çelik ile beraber kullanılmaya başlanması ile yapılarda daha geniş açıklıklar geçilirken, gün ışığından maksimum verim sağlanmış ve tasarımlar bu yönde geliştirilmiştir. Farklı niteliklerde kullanılmaya başlanan camlar, günümüzde genellikle bir taşıyıcı yardımı ile yapı kabuğunda bulunmaktadır. Fakat gelişen teknoloji ile farklı alanlarda kendini taşıyan sistemlerin kolon, kiriş, döşemelerin de cam olarak tasarlanabildiğini görmekteyiz. Camın hafif yapı strüktürlerinde kullanılan diğer bir alanı da cephe sistemleridir. Camın giydirme sistemlerinde, yapının cephelerini örtücü bir eleman olarak uygulanmaya başlanması, 20. yüzyılın sonlarında başlayan enerji krizi dolayısıyla yapılarda enerji etkinliği konusundaki kaygıları da beraberinde getirmiştir. Bu nedenle yapıların havalandırma, aydınlatma gibi tesisat gereksinimlerini karşılarken sarf ettiği enerji miktarını azaltmak ve bu kapsamda camın üstlenebileceği görevler üzerinde yapılan çalışmalar geliştirilmiştir (URL-2, 2011). Camın performansının istenilen özellikler doğrultusunda (radyasyona karşı koruma, dayanımı, gürültüyü absorbe etmesi, ısı dengesi yaratması, doğru ışık kırılımı sağlaması, vb.) üzerine uygulanan kaplamalar veya filmler camın özelliğini değiştirmektedir. Cam teknolojisindeki gelişmeler, cephelerde oluşturulan bir filtre değil, aynı zamanda enerji de üretebilen ve güneş ışınlarına doğru yönlendirebilen bir sistem haline gelmiştir. Işığı yönetme ve özelliklerine göre camlar, yüzey kaplamalı camlar, dikroik kaplamalı camlar, low-e kaplamalı camlar, sır kaplamalı camlar, açısız seçici camlar, geçirgenliği değişebilir camlar, fotokromik (ışığa duyarlı) camlar, termokromik (ısıya duyarlı) camlar, elektrokromik camlar, gazokromik camlar, holografik camlar olmak üzere sınıflandırılmaktadır (URL-2, 2011).

Çağdaş mimaride çift eğrilikli cam sistemler genellikle çelik sistemlerle birlikte tasarlanmaktadır. Buna, hem çelik ve uzay kafes sistemin hem de çift eğrilikli cam sisteminin birlikte kullanıldığı Masdar Genel Merkezi (Şekil 1) örnek verilebilir. Yapımına 2008 yılında başlanan ve 2012 yılında tamamlanan Masdar Genel Merkezi, 7 kattan oluşmaktadır. Dünyanın ilk karma kullanımlı sürdürülebilir yapısı olarak tasarlanan proje, ticaret birimleri, konut alanları, açık bahçeler, ibadet salonu gibi kullanım birimlerine sahiptir (URL-3, 2008). Başlıca özellikleri arasında dünyanın en büyük güneş paneli üst çatı örtüsü üzerinde yer alır ve doğal havalandırma sağlayan, iç mekânlara doğal gün ışığı geçirmesi olan çatı kanopisi için yapısal destek sağlayan 11 yükselen koni benzeri yapı yer almaktadır.

Hafif Strüktür Malzemelerinin Çağdaş Mimaride Yapıya Katkıları



Şekil 1. Masdar genel merkezi (URL-4, 2022)

Camla çevrili rüzgar konileri yapı için önemli bir görev üstlenmektedir. En üstte, eğrisel çatı rüzgar yüküne yapısal destek sağlarken, aralarındaki boşluklarla sıcak havayı binanın dışına çeker ve çatıdan aşağıdaki ofis katlarında gün ışığından da maksimum verim alınmasını sağlar. Aynı şekilde, çatının binayı gölgeleyecek şekilde tasarlanması, serin bir ortam yaratarak, klima ihtiyacını azaltmaktadır. Çatının Abu Dhabi çölündeki yoğun güneş enerjisini toplayacak ve güce dönüştürecek 290.000 metrekaresel bir fotovoltaik diziyile kaplanması hedeflenmiştir. Dolayısıyla LEED Platinum belgesine sahip yapı, aynı büyüklükteki karma kullanımlı binalardan %70 daha az su ve benzer iklimdeki bir yapıya göre daha düşük enerjiyi tüketecek şekilde tasarlanmıştır (Ercan, 2018). Dikdörtgen bir plana sahip yapı, iskelet ağaç benzeri bir strüktür tarafından taşınmaktadır. Yapının üst bölümünde örtü görevi gören çatının dalgalı formu, yüksek dayanım sağlaması ve tasarıma esneklik sağlayabilmesi için çelik olarak düşünülmüş, bu durum aynı zamanda strüktürel performansını da kolaylaştırmıştır.

Katkılı Beton

Beton, genel olarak çimento, su, agrega ile katkı maddelerinin karışımından oluşan ve yapılarda en yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Betonun tarihçesine baktığımız zaman farklı amaçlarla da olsa yaklaşık olarak 5.000 yıldan beri kullanılmaktadır. Günümüzde beton hem taşıyıcı eleman, hem de bir dekoratif

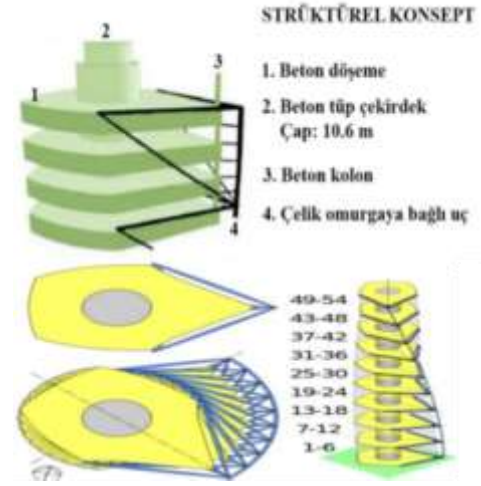
öge olarak ortaya çıkar. Dayanıklılığı, yangına karşı direnci, su geçirmezliği, ekonomik üretimi, enerji verimliliği, yerinde imalat kolaylığı bakımından da beton başlıca tercih nedenlerindedir. Fakat günümüzde çok yüksek yapılarda maliyetinin yüksek oluşu, homojen bir yapısının olmamasından dolayı statik proje hesaplarında hata payına olanak vermesi, uzun inşaat süresi ve her hava koşulunda dökümü uygun olmaması, sürdürülebilir ve yenilenebilir bir malzeme olmaması, düşük çekme dayanımı, betonarmenin ağırlığına göre dayanımının düşük olması nedeniyle ağır yapı elemanı olarak değerlendirilmesi nedeniyle yüksek yapılarda kullanımı azalmıştır. Özellikle dikey mimari anlayışı ile ilerleyen 1900'ler ve sonrası için yüksek yapı veya gökdelen tarzı yapılarda kolon ve duvar kalınlıklarının artması, yapı strüktürünü maliyetli, ağır ve dezavantajlı hale getirmiştir. Günümüzde yapıya etkiyen gereksiz yüklerin azaltılması ve daha hafif yapı arayışları, ağır bir malzeme olarak bilinen betonu, laboratuvar ortamında gerekli katkı maddeleri kullanılarak daha hafif bloklar halinde tasarıma dahil edilmesini sağlamıştır. "Aynı zamanda beton yapımında kullanılan kum, çakıl veya çimentonun bir kısmı beton yapısında %75 oranında hava boşlukları meydana getirilerek veya geleneksel agregalar yerine hafif veya çok hafif agregalar kullanılarak, betonun birim hacim ağırlığı azaltılabilmekte, birim hacim ağırlığı 800 kg/m³'ten fazla, 2200 kg/m³'den düşük olan betonlar hafif beton olarak adlandırılmaktadır." (Tuğrul ve Sev, 2015). Hafif beton, betonda hava kabarcıkların oluşturulması ya da hafif agregaların dahil edilerek ağırlığı azaltılıp, yoğunluğu düşürülmesi ardından basınçlı kapta fırınlanması ile elde edilmekte olup, betona göre daha yalıtımlı bir malzemedir. Aynı zamanda "İçine çelik yerine organik fiberler katılarak 6-8 kat daha dayanımlı, aerodinamik, hafif, pürüzsüz, düşük gözenekli, zorlu hava koşullarına dayanıklı "ultra yüksek dayanımlı beton-ductal" gibi farklı şekillerde karşımıza çıkmaktadır (Altun, 2007). Hafif agregaların kullanılması yapının ölü yükü azaltır ve betonun içinde kullanılması gereken demir donatı ihtiyacını da azaltmaktadır. Hafif beton kavramının geliştirilmesi ve malzemeye farklı maddeler eklenerek, tasarımların odak noktası haline getirilmesi, mimarlar tarafından deneysel bir alan yaratmıştır. Özellikle Macar Mimar Aran Losonczy tarafından beton içerisine cam liflerinin yerleştirilmesiyle geliştirilen yarısaydam beton (Şekil 2), transparanlığı ve hafifliği ile beton tasarımına damga vurmuştur. Basınç dayanımı betonun basınç dayanımına yakın olduğu için taşıyıcı olarak kullanılabilmeye olanak tanımaktadır. 20 m'ye kadar olan duvarlarda ışığı aynı oranda geçirebilmektedir (Kurzweil, 1999).



Şekil 2. Yarı saydam beton uygulaması (URL-5, 2017)

Yüksek katkılı betonun farklı şekillerde karşımıza çıkması, dayanıklı ve uzun ömürlü olması, yerel olarak elde edilebilmesi, ısı depolama özelliğinin olması, zehirli gaz salımının az olması, ısı adası oluşturmaması, çok yönlü ve estetik olması gibi nedenlerle sürdürülebilir tasarımda tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir. Bu bağlamda İsveç'in Malmö kentinde, yapımı 2005 yılında tamamlanan Turning Torso (Şekil 3) katkı beton ile yapılan, 190 metre yüksekliğiyle, İskandinav ülkelerindeki en yüksek gökdelen, Avrupa Birliği'ndeki en yüksek konut binası ve Avrupa'daki en yüksek ikinci konut yapısıdır (URL-6, 2015). Yapı bir dış çelik çerçeve tarafından desteklenen dikey çekirdeğin etrafında dönen düzensiz bir beşgen şeklinden oluşmaktadır. Üst üste bindirilmiş 9 adet küpten oluşan ve her bir küp kendi içerisinde 5 kata sahip olan yapı, katların bir-biri üzerinde 5 derece döndürülmesiyle dönel bir form kazanmıştır. Yapı en alt kattan en üst kata kadar kendi eksenini etrafında 90° dönmektedir (Ercan, 2018). Turning Torso'nun taşıyıcı sistem strüktürü omurga kemiklerinden ilham alarak, başlıca elemanı ana omurgayı oluşturan, planın merkezinde bulunan, dairesel bir forma sahip yüksek katkılı betonarme perde duvarlı bir çekirdektir.

Yapıyı taşıyan büyük boyutlu çekirdekten başka, destekleyici eleman olarak dışta çelik bir kafes tasarlanmıştır. Beton çevre kolonunu takiben, dış iskeletin tek direği, esas olarak yatay ve eğimli borularla her modül arasında kuleye sabitlenmektedir. Her katın köşesine yerleştirilen bu kafese ait çelik kolonlara, yatay ve çapraz çelik elemanlar bağlanarak dış iskeleti oluşturmaktadır (URL-8, 2012). Bu şekilde burulma hareketi olup, ana görevi etkili olan rüzgâr yükü başta olmak üzere yatay yüklere karşı yapının dayanımını artırmaktadır. Omurga benzetimi sayesinde kolonlar çevresel dikey yükleri alırken, etrafındaki dış iskelet rüzgâr direnci sağlıyor ve binanın titreşimlerini azaltıyor (URL-9, 2004).



Şekil 3. Turning Torso (URL-7, 2007)

Membran Sistemler

İnsanların barınma mekânlarından biri olan çadır, tarihi çok eskilere dayanan basit bir taşıyıcı strüktür olmasına rağmen günümüzde özellikle büyük açıklıklı stadyumlar, spor salonları, pazar yerleri gibi mekânlar çadır strüktüründen ilham alınarak tasarlanmaktadır. Çadır strüktüründen ilham alarak gelişen asma germe sistemler, çadırın basınç ve eğilmeye çalışan strüktüründen farklılaşmış ve sadece çekme yüküne göre tasarlanan germe yapı sistemi olarak ortaya çıkmıştır. Germe yapıların üst örtü malzemesinin göz ardı edilebilecek ağırlığı sayesinde geleneksel yapılara kıyasla daha hafiftir ve eğilme rijitliği yoktur. Asma germe sistemlerin (Şekil 4) düşey taşıyıcılarında genel olarak mafsallı kolon ve onların stabilitesini sağlayan halatlar ile tasarlanmaktadır. Esnek membran örtüleri veya halatlarla desteklenen sistemde, sadece çekmeye dayalı

Hafif Strüktür Malzemelerinin Çağdaş Mimaride Yapıya Katkıları

yapı elemanları kullanılmaktadır. Halat boşlukları arasına yerleştirilebilen plegsiglas malzemesi ile yapıda yüzey alanı az olan kaplamalar yaratılmaktadır. Dolayısıyla asma germe sistemlerin ayakta kalabilmesi ve hafif strüktürün yaratılması için kullanılan özel bir kumaş olan membran malzemesi, liflerden oluşan iplik dokumasıyla özel olarak elde edilmektedir (URL-10, 2020). Membran yapılarında kullanılan lifler; naylon, polyester, cam, PTFE ya da aramid olabilir (URL-11, 2009). Membran örtünün dışarıdaki etkilere açık yapısı nedeniyle su ve hava geçirmezliği sağlamak için kimyasal kaplama işlemleri uygulanabilmektedir. Dokuma ve kaplama arasındaki kimyasal yapışma ile iki malzeme bir bütün gibi davranmaktadır. Membran sistemlerin asıl malzemesi olan dokuma olarak yapılmakta, PVC, PTFE ve silikon tercih edilmektedir (URL-11, 2009). Ana kaplamaya ek bir kaplama yapılarak, örtüye farklı özellikler kazandırılmaktadır. Örtünün kendi kendini temizlemesi, ultraviyole dayanımın artırılması gibi özelliklerle dış etkilere karşı ek performanslar kazandırılmaktadır (Dansık ve Şahin, 2016).



Şekil 4. Asma germe sistem Münih Olimpiyat Stadyumu (URL-12, 2017, URL-13, 2017)

Otto'nun 1972 yılında Günther Behnisch ile birlikte tasarladığı, Münih Olimpiyat Stadyumu asma germe membran sistem ile oluşturulmuştur (Dansık ve Şahin, 2016; URL-14, 2016). Münih Olimpiyat Stadyumu yapıda organizma ve davranış düzeyinde biyomimikri yaklaşımı görülmekte olup, çatı örtüsü örümceklerin çalılar üzerinde oluşturduğu ağlara benzeyen stadyum

yapısı toplam 75.000 metrekare alana ve 69.300 kişi kapasitesine sahiptir (URL-15, 2017). Yapıda, minimum taşıyıcı ile geniş bir açıklık geçilmek istendiği için taşıyıcı sistemi asma germe strüktür olarak düşünülmüştür. Yapının çatı strüktürü 8 adet kablo ağı biriminden oluşmaktadır. Çift eğrilikli öngerilmeli çelik kablo ağının rüzgâr yükünü emme potansiyeli yüksektir. En yükseği 36 metreye çıkan 8 adet kolonun desteklediği çelik asma germe sistem, yarı geçirgen bir beyaz membran ile kaplanmaktadır. Çatı örtüsünde saydam plegsiglas paneller ile güneş ışığı altında parlamakta, gökyüzünü ve çevreleyen peyzajın rengini yansıtmaktadır (URL-15, 2017). Halat destekli oluşturulan sistemler günümüzde hala kullanılmakta ve esnek mekân tasarımına olanak tanımaktadır (Dansık ve Şahin, 2016). Münih Olimpiyat Stadyumu'nun örümcek ağı benzetiminin tasarımı matematik hesaplarına dayalı bilgisayar desteği ile sağlanmıştır. Bu özelliği yönünden ilk bilgisayar destekli strüktürel asma germe sistem olarak da tanımlanmaktadır (URL-16, 2016).

Pnömatik Sistemler

Pnömatik sistemler bir veya daha fazla katmanlı membran tabakasından meydana gelen ve iç mekân ile dış mekân arasındaki basınç farkı yaratılarak taşıtılan sistemlerdir (Şekil 5).



Şekil 5. Pnömatik sistem Eden Projesi (URL-18, 2015)

Mimaride malzeme teknolojisinin hızla geliştiği 20. yy'da kullanılmaya başlayan pnömatik sistemler, genelde büyük açıklık geçilmek istenen, portatif mekânlar için tasarlanmıştır. Hafif olması, kolay söküm takım işleminin olması, maliyetinin az olması, esnek bir yapı olması, inşaa süresinin kısa olması ve inşaa edilirken ihtiyaç malzemelerinin az olması, iş gücünü azaltması, kolay taşınabilmesi ve en önemlisi afet durumundaki

Hafif Strüktür Malzemelerinin Çağdaş Mimaride Yapıya Katkıları

insanlara yeterli kaçış süresinin sağlanabilmesi gibi etmenler pnömatik sistemlerin tercih edilme nedenlerinin arttırmaktadır. Genelde geçici yapılarda karşımıza çıkan bu sistemler askeri birimler, spor birimleri ve depo birimleri gibi mekânlarda kalıcı olarak da inşa edilebilmektedir. Sistemin oluşturulma ve taşıtılma prensibinde iç basıncın, dış basınca göre daha fazla olması gerekmektedir. Dolayısıyla şişme sistemler olduğundan genelde yapı formları kavilidir. Şişirilen membranlar kar ve rüzgâr gibi yükleri de direkt zemine aktarabilirler. Membran malzemesinden oluşan pnömatik sistemlerde farklı etkiler nedeniyle delik oluşması durumunda uzun sürede sönmeye, mekânda bulunan insanlar için yeterli tahliye süresi vermektedir. İstenilen basınç düzeyine göre pnömatik sistemlerdeki membran tabakalar tek veya çift tabakalı olarak yapılabilmektedir. Tek tabakalı şişme sistemlerde alçak basınç sağlanırken, çift tabakalı olan sistemlerde yüksek basınç uygulanmaktadır. Tek tabakalı olan şişme sistemler fanlar yardımıyla tümüyle şişirilmektedir. Çift tabakalı olan şişme sistemler de ise hava basıncı iki membran zar arasında oluşturularak şişmesi sağlanır (URL-17, 2019). Eden Projesi pnömatik sisteme önemli bir örnektir. İngiltere’de Cornwall’de 2001 yılında yapılmış dünyanın en büyük serası olma özelliği taşıyan tekstil yapısıdır (İnner, 2019). Yapının form tasarımında su kabarcığından ve sabun köpüğünden ilham alınarak, pnömatik bir strüktür ile taşıtılmıştır. Polen tanecikleri, karbon molekülleri gibi doğanın altıgenler ve beşgenlerden oluşan geometrik şekillerinin işlevselliğine odaklanarak, dış cephe tasarımında aynı geometrik şekiller maksimize edilerek geniş yüzey alanı çözüme ulaşmıştır. Yüzeydeki altıgen formun boyutlarında cam panel üretiminin hem maliyetli, hem yapıya bindirilecek yük dolayısıyla daha uygun, hafif ve güçlü bir polimer olan ETFE kullanılmıştır. ETFE yastıkların ağırlığı 2 ile 3,5 kg/m² arasında değişmektedir (Alioğlu, 2018). Cam panellerin maksimum boyutundan 7 kat büyük olabilmemesinin yanında çift cam sisteminin yüzde bir ağırlığında olması sebebiyle strüktürel hafiflik bakımından ağırlığı azaldığı için daha az çeliğe ihtiyaç duyulmuştur. Daha az çelik kullanımı, alana daha fazla güneş ışığı girmesini sağlayarak, yapıdaki ısı tasarrufuna da katkıda bulunmuştur. ETFE’nin geliştirilmiş yalıtım özellikleri yapıyı ısıtmak için gerekli olan enerjiyi önemli derecede azaltmaktadır. Geri dönüştürülebilir bu malzeme, aynı zamanda içeriğin kışın daha sıcak, yazın ise daha serin kalmasına yardımcı olmaktadır. Yastıkların şişkinliği yoğun kar veya fırtına anında değiştirilebiliyor olması, yapıdaki esnek ve değişebilir formu ortaya çıkarmaktadır. Her bir ETFE hava yastığında folyoların sayısı, kalınlığı, şekli ve her yastığın taşımak zorunda olduğu yüke göre şişkinlik oranı değişmektedir. Yapıdaki seçilen malzemeler, yapım metodları ve enerji kullanımında sürdürülebilir kalkınma

ilkeleri gözetilmiştir. Sera yapısı içerisinde bitkileri sıcak tutmak için çelik yapı üstünde bulunan altıgen yastıklar, ETFE’nin iki katmanı arasında havayı tutarak iyi bir yalıtım malzemesi olma özelliği taşırlar.

Tekstil Sistemler

Mimari strüktürde tekstil, 20. yy’da asma germe sistemlerle beraber kullanılmaya başlanmıştır. Membran sistemlerle ilişkilendirilen tekstil sistemler, dokuma özelliklerinin değişimine göre geçirgenlik, esneklik ve dayanım gibi özellikleri de değişmektedir (Gezer, 2008). Tekstil ve mimarinin birlikteliği ile çağdaş çekme gerilmeli strüktürler tasarlanabilmektedir. Geometrik şekilde yapılabilmesiyle kendi sistemi içerisinde taşıtılabilen tekstil sistemler çeşitli katlama teknikleriyle de mimariye farklı bir yön vermektedir. Sadece yapısal ve statiksel avantajlarının yanı sıra estetik kavramı göz önüne alındığında da tekstil sistemler sadece kendi başına ön plana çıkmaktadır. Malzemenin fonksiyonelliğin ötesinde, görselliği ön planda tutularak yapılan uygulamalarında, tekstil malzeme yapı üzerini örtmek amacıyla çatı strüktüründe ya da cephe strüktüründe hareket, boyut ve görsellik kazandırılması yönüyle kullanılmaktadır. Tekstil malzemesini strüktürel bazlı ele aldığımız zaman Nox/Lars Spuybroek’in Hollanda’da Eindhoven yakınlarında oluşturduğu rekreasyon alanı olan, Son-O-House Ses Galerisi (Şekil 6), kendi sistemi içerisinde taşıtılan bir tekstil sistemdir. Yapının akustik fonksiyonu ile birleşmesi istenen mekân, tekstil malzemesiyle çözümlenmektedir (URL-19, 2018).



Şekil 6. Son-O-House ses galerisi (URL-20, 2018)

Ahşap Sistemler

Ahşap sistemler, daha çok ızgara strüktür biçiminde taşınarak, sürdürülebilirlik, minimum malzeme gereksinimi, hafiflik, hızlı ve uygun maliyetli inşaya olanak tanınması, geniş açıklıklı mekanların oluşturulması gibi olumlu özellikleriyle çağdaş yapılara çözümler sunmaktadır (Naicu ve ark., 2014). Aynı zamanda hafif olmasına karşın eğilme momentlerine dayanıklı olan ahşap, kolay bükülebilen de bir malzemedir (Charest ve ark., 2019). 21. yy'da modelleme ve dijital tekniklerin gelişmesiyle ahşap ızgara sistemlerin hızla tasarlanması ve üretilmesi sağlanmıştır. İlk modern ahşap ızgara strüktürü çalışmaları yürütmesinden dolayı Frei Otto modern ahşap ızgara strüktürlerin temsilcisi sayılmaktadır (Haddad Mork ve ark., 2016; Songel, 2020). Statik çalışma yönünden çelik uzay kafesleri farklı olan ahşap ızgaralar, uzay kafesteki mafsallı düğüm noktalarında basınç ve çekme dayanımı, ahşap ızgara sistemdeki sadece montaj yerlerinde gevşek bir mafsal gibi davranarak sağlar. Diğer kabuk tasarımlar her taraftan gelen yükleri karşılayabilirken, ızgara ahşap kabuk şeklinde tasarlanan yapılar, sadece kirişlerin eksenleri doğrultusundaki yükleri karşılayabilmektedir. Bu nedenle ızgara ahşap kabuklarda kayma blokları yerleştirmek, rüzgâr yüküne karşı kirişlere ek bağlantılar atılması, düğüm noktalarına çapraz kablo bağlantısı eklemek ya da kirişler üzerine rijitliği arttırıcı kaplama plakaları yerleştirmek gibi önlemler alınmaktadır (Koç ve Gür, 2021). Geniş açıklıklar geçerken artan kiriş kalınlığının diğer taşıyıcı sistemlere göre az olması, estetik görünüm sunmaları, betonarme sisteme göre hafif olmaları, kullanılan malzeme miktarına göre ekonomik olmaları (Fritzsche, 2013), yerel ahşap malzemenin kullanılabilmesi, ara boşlukları sayesinde yeterli aydınlatmanın sağlanabilmesi ya da tesisatlar için yeterli boşluk sağlanabilmesi (Paoli, 2007), portatif olması, hızlı söküm takımı işlemi olması, diğer malzemelere göre daha ekolojik olması gibi etmenler mimarların tasarımlarında ahşap ızgara strüktürlerini tercih etme nedenlerindedir. Rijit ahşap ızgara kabuk sistemler, ön üretilmiş olup, önceden fabrikalar istenilen boyuta getirilmiş ve delinmiş şekilde sahaya getirilmektedir. Ardından hızlı bir şekilde sahada parçaların birleştirilmesiyle yapı ortaya çıkmaktadır. Sistemin inşa edilme süresi, iklim şartları, arazinin koşulları ve büyüklüğüne bağlıdır. Rijit ahşap ızgara kabuklar halinde tasarlanan sistemler ise genellikle üç yönlü olarak üçgen modülü şeklinde tasarlanmakta ve montaj esnasında deformasyonu önleyen prefabrike elemanlardan meydana gelmektedir (Naicu ve ark., 2014). Bu alanda Otto'nun Essen Pavilion tek tabakalı ahşap ızgara kabukların ilk örneklerinden olup, sistem avantajları sayesinde mimarların bu alandaki çalışmalarının hızını da arttırmış, 1975 yılındaki

Multihalle Mannheim yapısı tasarımıysa ilk çift tabakalı ahşap ızgara kabuk sistemi olmuştur (Koç ve Gür, 2021). Sürdürülebilirlik ve geri dönüşümlü yapılar kapsamında önemli bir örnek olan Expo 2000 Hannover Japan Pavilyonu'nda, ahşap kirişler yerine, geri dönüşümlü kağıtların tutkal yardımıyla katmanlar halinde yapıştırılmasıyla suya dayanıklı boru biçimdeki kütük kirişler haline getirilerek ahşap ızgara kabuk sistemini bir adım öteye taşımıştır. Elde edilen bu hafif strüktürün üzerinin membranla örtülmesi sayesinde yapı dışında kabuk benzeri bir form yaratılmıştır. 1997 yılında Japonya'nın Akita kentindeki Toyo Ito tarafından tasarlanan Odate Jukai Dome (Şekil 7), çelik ve ahşabın birlikte uygulandığı strüktürüyle, dönemin sınırlarını zorlayan bir spor yapısıdır.



Şekil 7. Odate Jukai Dome Parkı (URL-21, 2018)

Kubbe konstrüksiyonu, ahşap ızgara sistemiyle sağlanmış ve 52 m yüksekliğinde, 178 m uzunluğunda, 157 m genişliğinde kolonsuz geniş bir alan yaratılmıştır (URL-21, 2018). Strüktür üzeri devasa bir örtü malzemesiyle kaplanmıştır, bu sayede yapıda geçirgenlik ve şeffaflık algısı yaratılmıştır. Zemin kotundan yüksek olan kubbe, çelik kolonlarla taşınmakta, çelik arası boşluklar cam malzemesi ile kapatılmaktadır. Yapıda ahşabın yerel malzeme olarak kullanılması (bölgede yetiştirilen sedir ağacından elde edilmesi) yapım süresini kısaltmış, ulaşım ve yapım kolaylığı sağlamış, enerjide tasarruf yapılmıştır. 25.000 adet lamine ahşabın üretilip,

Hafif Strüktür Malzemelerinin Çağdaş Mimaride Yapıya Katkıları

birleştirilmesi açısından ciddi bir inşaa veriminin sağlanması, yine yerel malzemenin kullanılmasıyla elde edilmiştir (URL-21, 2018). Kubbenin tırtıklı yapısı, bölgenin rüzgâr yüküne göre tasarlanmıştır. Bölgenin iklim şartlarının etkisini yapı üzerinde en aza indirgeyen çatı formu, havalandırma ve mekân içerisindeki iklim kontrolünün de kalitesini arttırmaktadır. Örtünün ışık geçirgen yapısıyla, mekân içerisinde gün ışığından maksimum verim alınarak, enerji tasarrufu sağlanırken, yapının emisyonunu azaltmaktadır.

Hafif Strüktürün Avantajları ve Tercih Edilme Nedenleri

Mimaride hafif strüktürler, teknolojinin yardımıyla bizlere ve çevresine daha faydalı olması ve yapıdaki sorunları en aza indirmek için üretilen hafifliği ile ön plana çıkarak, geniş tasarım yelpazesi sunan malzemelerdir. Dikey yapılaşmaya olanak tanınması, yapıda gereken hafifliğin sağlanması, yapıda dayanımın artırılması, geniş açıklık geçilmesi, sürdürülebilirlik, tasarımsal esneklik, hafif strüktür malzemelerinin üretim amacıdır. Dolayısıyla günümüzde hem yapıya, hem de çevresine sağladığı katkılar sebebiyle projenin tasarım aşamasında hafif strüktür malzemeler daha çok tercih edilmektedir. Mimarideki bu yeni eğilimler, farklı form arayışlarını ve tasarımsal yaklaşımları da beraberinde getirmektedir. Formlar fonksiyonu takip eden organik, ekolojik, dinamik, esnek, taşınabilir, portatif, ekolojik metamorfozları esas alan yaklaşımları oluşturmuşlardır (Kubo ve Salazar, 2004; Leackh ve ark., 2004; Piller, 2005; Ritter, 2007; Kronenburg, 2007). Bu yaklaşımlar hafif strüktür malzemelerle oluşturulmuş yapılara belirli avantajlar sağlamaktadır. Hafif strüktür malzemelerinin yapıya sağladığı avantajları şu şekilde sıralayabiliriz; sürdürülebilirlik avantajları, yapısal/statik avantajları, enerji etkinliği kapsamında avantajları, deprem yükü karşısında avantajları, yangın karşısında avantajları, afet sonrası avantajları.

Sürdürülebilirlik Avantajları

Sanayi devriminin beraberinde getirdiği kentlerdeki hızlı nüfus artışı, kontrolsüz kaynak ve enerji tüketimine neden olmuştur. Dolayısıyla doğal çevrede ve atmosferde oluşan tahribatlar, enerji ve kaynak tüketiminde büyük bir paya sahip olan inşaat sektöründe, sürdürülebilirlik ölçütlerini düşünerek yapıların tasarlanması gerektiğini göstermiştir (Tuğrul ve Sev, 2015). Bu bağlamda yenilenebilir, dinamik, değişken geometriye sahip yenilikçi malzemeler, yapı sektöründe enerji

korunumu açısından anahtar rol oynamaya başlamıştır. Hızlı söküm takım yapılabilmesi, inşaa süresinde kolaylık sağlanması, esnek tasarıma olanak vermesi, portatif ve kolay nakledilebilen, strüktürel hafifliği sayesinde yapıda temel yükünü azaltan, tesisat kolaylığına imkân veren hafif strüktür malzemeler, sürdürülebilir yapı teknolojilerinin önemli bir basamağı haline gelmiştir. Daha çok otomasyon alt bazlı olan sistemler, teknolojinin de yardımıyla akıllı yapı kavramıyla gündeme gelmeye başlamıştır. Binaların gün ışığı, havalandırma ve aydınlatma olarak kullandığı enerjiyi mümkün olduğunca kendi bünyesinde doğal, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak üretmesi, depolayabilmesi hedeflenmiştir. Çelik strüktürün camla birlikteliği ile üretilen cephe kabuklarının tasarımları sayesinde yapı üzerinde rüzgâr yükünün azalmasına katkıda bulunması ve ısıtma-soğutma, havalandırma sistemlerine gereksinimleri azaltarak, yapıların yılda %70'e yakın enerji tüketimini ve karbondioksit emilimini azaltması ve doğal havalandırmayı sağlayabilmesi çelik yapıların enerji etkinliği kapsamında büyük fayda sağlamaktadır (Savcı ve Dikmen, 2015). Camın geri dönüştürülmesiyle doğal kaynakların korunmasıyla enerji tüketiminde %25, hava kirliliğinde %20, maden atığında %80, su tüketiminde %50 azalma kaydedilmiştir (Savcı ve Dikmen, 2015). Yenilikçi malzemelerle tasarlanan akıllı bina cephelerinde doğal aydınlatma ve doğal havalandırmanın sağlanmasıyla bina kullanıcılarının konforu artmaktadır (Sönmez ve Kiasif, 2018). Özellikle hafif strüktür malzemelerinden cam, katkılı beton ve membran sistemlerinde ısı tasarrufu sağlanması, ısının yapıda depolanması, dönüştürülmesi ve yeniden kullanılabilmesi öne çıkarken, çelik ve tekstil sistemlerin yapıda kullanıldıktan sonra geri dönüştürülebilmesi ve farklı yapılarda yeniden kullanılabilmesi çevreye sürdürülebilir avantajlar sağlarken, yapıda da ekonomik avantajlar yaratmaktadır.

Statik Avantajları

Çağdaş dönemde hafif strüktür malzemelerin doğuşu, daha yüksek bina yapma yarışının getirdiği statik sorunlarıyla başlamıştır. Çelik, katkılı beton, uzay kafes sistem ve ahşap strüktürlerin betonarme çerçeve sistemine göre daha hafif oluşu, aynı yapıyı betonarme ile yapıldığı zamana göre daha hafif yapı yükü oluşturmamasından dolayı yapıda biriken ölü yükü de azalmaktadır. Kolon sayısı daha az olduğu geniş açıklıkları geçmede öncü olan bu malzemeler, yapıda tasarımsal açıdan esneklik sağlamıştır. Bununla beraber afet durumlarında sistemin hafifliği ve yeterli tahliye süresinin sağlanması konusunda daha iyi sonuçlar alınmaktadır. Yapıya statiksel avantajların sadece çelik, yüksek katkılı beton, uzay kafes ve ahşap strüktürler kapsamında

Hafif Strüktür Malzemelerinin Çağdaş Mimaride Yapıya Katkıları

değil, cam strüktürler kapsamında da farklı statiksel çözümler geliştirilmiştir. Mimar Brenet Richard, Midlands Cam müzesinin (Şekil 8) ek binasında kaplama ve strüktürel elemanların cam malzeme olarak seçerek, malzemenin sadece bir kaplama elemanı olarak değil, taşıyıcı eleman özelliğinde yapıda var olabilmektedir.



Şekil 8. Midlands müzesi ek yapı (URL-22, 2015)

Deprem Yükü Karşısındaki Avantajları

Yer altında bir anda ortaya çıkan enerjiyle sismik aktivelerin fay hatlarında çatlamlar ve kırılmalar yaratması sonucunda oluşan sismik dalgalanmaların oluşturduğu sarsıntılara deprem denmektedir. Deprem yarattığı sarsıntılar depremin yer kabuğundaki derinliğine, türüne ve büyüklüğüne bağlıdır. Depremin büyüklüğü moment büyüklük ölçeği veya Richter ölçeği ile belirlenmektedir. Dolayısıyla bu ölçeğe göre 3'ün altındaki büyüklükte olan depremler genelde hissedilmezken, 7 ve üstü büyüklükteki depremler yıkıcı olabilmektedir (URL-23, 2019). Yapılarda, zeminin deprem titreşimleri altındaki bir yöne olan hareketiyle, yapının kütlelerinin de atalet kuvvetleri ile buna karşı diren-

mesi sonucu dinamik nitelikteki deprem kuvvetleri oluşur. Temel zemini gevşek ve zayıf olduğu takdirde deprem esnasında yapının ağırlığı altında farklı oturmalarına maruz kalır. Deprem etkisi, deprem dalgalarının geçtiği zeminin özelliklerine ve üzerinde bulunan yapının statik özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterecektir. Dolayısıyla deprem esnasında yapı ve yapıyı oluşturan elemanların deprem yüklerine karşı belirli bir dayanıma sahip olmaları gerekmektedir (Yıldırım, 2003). Dayanımın en güvenilir ölçüsü "taşıma gücü" kavramıdır. Dayanımla beraber gelen yapının süneklik ve rijitlik kavramları, yapının depremde ayakta durabilme, deprem enerjisini sönmüleyebilme kabiliyeti açısından önemli parametrelerdir. Sünekliği yapı bazında incelersek; yapının yük taşıma kapasitesinde bir azalma olmadan büyük deformasyon yapabilme özelliği olarak tanımlanabilir. Dolayısıyla bir deprem anında yapının sünekliği büyük önem arz etmektedir. Yapıdaki süneklik, deprem esnasında ortaya çıkan enerjinin sönmülenip, tüketilmesi ve yapının ayakta kalabilmesini sağlamaktadır. Yapı bazında rijitlik kavramı ise; yapının deformasyonlara karşı oluşturduğu dirençtir. Yer değiştirme veya burkulma hareketlerine karşı verdiği karşı etki olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda depreme dayanıklı bir yapı ancak yeterli süneklik ile yeterli rijitliğin sağlandığı zaman ortaya çıkmaktadır. Deprem yükleri kütle ile doğru orantılı olduğundan, yapıdaki yük arttıkça depremin kuvvet etkisi o derece fazla olacaktır. Dolayısıyla iki yapının dinamik nitelikleri aynı olsa dahi, ağırlığı biri diğerinden ne kadar fazla ise, ağır olan yapı, deprem yükünü daha fazla hissedecek ve daha fazla zarara neden olacaktır. Bu nedenle yapılan araştırmalar sonucunda hafif yapı kavramı hızla yaygınlaşmıştır ve günümüzde özellikle yüksek yapılar çoğunlukla hafif strüktürlerle taşınmaktadır. Yüksek yapıların taşıyıcı sisteminde kullanılan çelik, alüminyum ve ahşap malzemeleri, diğer bütün yapı malzemelerine göre daha hafif olmasından dolayı yüksek yapı strüktüründe daha fazla tercih edilmektedir.

Yangın Karşısındaki Avantajları

Zaman zaman yapılarda gerekli önlemlerin alınmaması, dış faktörler, dikkatsizlik, binadaki bakımların tam yapılmaması gibi birçok nedenler yangını tetiklemektedir. Bu nedenle çağdaş yapılarda yangın ihtimalini azaltmak, yangın esnasında yapı elemanlarındaki bozulmaları en aza indirmek, yapıya yeterli tahliye süresi kazandırmak için yapı malzemeleri ve kaplamaların dikkatli seçilmesi gerekir. Yapılardaki yangına dayanımın tanımı, "yangın yükü" ile ifade edilmektedir (URL-24, 2015). Özellikle yapının döşemeler, kirişler, çatılar, duvarlar, dikmeler ve benzerleri gibi taşıyıcı

Hafif Strüktür Malzemelerinin Çağdaş Mimaride Yapıya Katkıları

elemanlarında yangın esnasında çökme yaşamaması gerekmektedir. Aynı zamanda dolgu malzemelerinin, kaplamaların, koruyucu yalıtım malzemelerin ve dekoratif elemanlarının da yangına dayanıklı olması istenir (Uysal, 2004). Günümüzde taşıyıcı sistemlerde yangın dayanımını az olan çeliğin, gerekli işlemlerin uygulanmasıyla yangın dayanımı artırılarak, dayanımı betonarme yapılara eşdeğer düzeye getirilmektedir. Çünkü basit çelik yapılarda bile çok kolay alçı, sıva gibi farklı yalıtımlarla, yapının yangın dayanımını arttırmak mümkündür. Çelik yapıların yangına karşı yalıtımı sağlanırken, özel alaşımli çeliklerin kullanılması, alüminyum silikat, çimento gibi yalıtım malzemelerini çeliğin üzerine püskürtülerek kapatılması gibi yöntemler kullanılmaktadır (Yıldırım, 2003). Yüksek katkılı betonlarda ise yüksek sıcaklığın etkileri normal betonla karşılaştırıldığında, hafif betonların birim ağırlıkları normal betonlardan %23'e varan oranlarda daha düşük olduğundan, ağırlık kaybının 400° – 800°C'lerde fazla iken, 1000°C'de düşük kalmış, 800°C ve 1000°C'lerde, katkılı ve katkısız hafif betonlar, bağıl olarak normal betonlardan daha iyi basınç dayanımı göstermişlerdir (Sancak ve Şimşek, 2006). Yüksek katkılı betonların boşluklu yapısı ve kullanılan hafif agregalar, malzemenin ısı geçirgenliğini de düşürmektedir. Bu nedenle, yapılaşmada birçok ülkede yüksek dayanımlı hafif beton üretimiyle kullanımı tercih edilmektedir (Floyd, 1986). Yüksek katkılı betonlarda pas payının artırılması ile donatının sıcaktan etkilenmesi engellemektedir. Membran ve tekstil sistemlerde malzemenin yangın direncini ölçmek için bazı yangın testleri uygulanmaktadır. Bu sayede membran ve tekstil sistem malzemelerini yangın sınıflarına ayırarak, alev yürütmez olarak tabir edilen malzemeler kullanılır. Yapı elemanlarının yangına karşı dayanıklı malzemelerden üretilmesi, mekânı belli bir süre yangın yüküne karşı gerekli tahliye süresini sağlamaktadır.

Afet Sonrası Avantajları

Afet bölgelerinde deprem, yangın, sel gibi durumlarda insanlara barınma ihtiyacını hızlı bir şekilde sağlayabilmek için geçici veya kalıcı olarak yapılaşmak ve tekrar edebilecek afet durumlarına karşı dayanıklı yapılar inşa edilmelidir. Afet bölgelerinde, konut gibi geçici barınma ihtiyacını hızlı şekilde sağlayacak prefabrike üretilmiş, ekonomik hafif çelik sistemler uygulanmaktadır. Sistemde, çerçeve strüktür yaygın olarak kullanılmaktadır. Taşıyıcı çerçeve sistem, yapı yüklerine mo-

ment iletecek şekilde rijit bağlanarak birlikte hareket etmesi sağlanırken, duvarlar gibi taşıyıcı olmayan bölücü duvarlar prefabrike hafif beton elemanlar, cam, giydirme cephe, metal paneller olarak tasarlanabilir. Strüktürel etkinliği kapsamında geniş açıklıklı geçici afet toplanma ve afet barınma alanları, konvansiyonel çelik yapım yöntemleri için uygun bir çözümdür. Konut gibi küçük açıklıklı, az katlı veya müstakil şekilde oluşturulan afet yapılarında bu sistemlerin uygulanması daha maliyetli kalacağından, hafif çelik yapım sistemleri daha ekonomik ve etkin sonuçlar sağlamaktadır. Afet sonrası yapılaşmada hafif çelik ile oluşturulan üç kattan daha yüksek olması planlanan yapılaşmada strüktürel zorlanmalar yapıyı yıpratılabileceğinden, kompozit ahşabın ve çeliğin birlikte kullanılmasıyla strüktür güçlendirilmektedir (Ekinci ve ark., 2005). Aynı zamanda çelik ve ahşabın birleşmesiyle hafif ve daha ekonomik yapılaşma sağlanabilir. Özellikle çeliğin hafif olmasına rağmen yüksek dayanıma sahip olması, Türkiye gibi deprem bölgesi olan ülkelerdeki yapılaşma için çok önemlidir. Hafif çelik üretiminin kolay olması ve konvansiyonel çeliğe göre daha ekonomik kalması, hafif çeliğin tercih nedenlerindedir. Aynı şekilde konvansiyonel çelik sistemlerin prefabrikasyon olması ve özenli denetimlerden geçmesi, konvansiyonel çeliğin afet sonrası yapılaşmada teşvik edilmesi gereken malzemelerdendir. Afet sonrası yapılaşmadaki başka bir faktör yapılaşmanın sürdürülebilir olması, geçici yapılar ise kısa sürede inşa edilmesi gerekmektedir. Afet sonrası aşamalarda nakliye, kurulum, kullanım ve kullanım sonrası önemi esas alınarak tasarlanan yapılarda malzeme seçimi çok önemlidir. Doğal çevrenin zarar görmemesi, güvenli bir malzeme olması, geri dönüşüm potansiyelinin yüksek olması ve üretimin tasarıma uygun şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlanmalıdır. Olası bir afette kullanılmaya hazır ön üretilmiş veya bölgede üretimi sağlanabilir mekânlar yaratılması amacıyla kolay söküm takım işlemlerinin sağlanması, afet sonrası geçici yapılaşma için önem arz etmektedir. Afet sonrası barınma ihtiyacının anında sağlanması gereken koşullarda pnömatik sistemlerin istenilen her bölgeye kurulabilme olanağı ve aynı zamanda hızlı kurulum nakliye ve montaj kolaylığı sayesinde afet bölgelerinde bir başka geçici mekân olarak kullanılabilir. Özellikle hafif strüktür malzemelerden çelik ve membran malzemelerin bizlere sunduğu kolaylıklar afet sonrası geçici yapılaşmada etkili olduğu görülmüştür.

Tablo 1'de yapıların mimari ve strüktürel özellikleri toplu olarak karşılaştırılmak üzere verilmiştir.

Hafif Strüktür Malzemelerinin Çağdaş Mimaride Yapıya Katkıları

Tablo 1. Yapıların mimari ve strüktürel özellikleri

MİMARİ ÖZELLİKLER			STRÜKTÜREL ÖZELLİKLER			
YAPI ADI	YAPIM YILI/YERİ	YAPI TÜRÜ	STRÜKTÜR TÜRÜ	KULLANILAN MALZEME	TASARIMSAL YAKLAŞIMI	AVANTAJLAR
Masdar Genel Merkezi	2012/ Abu Dhabi, Birleşik Arap Emirlikleri	Genel Merkez	Uzay Kafes Sistemi	Çelik, Cam	Biyomimikri Tasarım Yaklaşımı	-Dünya'nın en büyük güneş paneli dizisine olan yapı olmuştur. -İlk büyük ölçekli pozitif enerjili yapı olmuştur. -Doğal ışıktan maksimum verim sağlanmıştır. -Doğal havalandırma sağlamıştır. -Geri dönüşümlü malzemeler kullanılmıştır.
Turning Torso	2005/ Malmö, İsveç	Konut	Çerçevesiz Sistem	Çelik, Yüksek Katlı Beton	Biyomimikri Tasarım Yaklaşımı	-Avrupa'nın en yüksek 2.konut binasıdır. -Tasarımı sayesinde rüzgâr yükünü azaltılmıştır.
Münih Olimpiyat Stadı	1972/ Münih, Almanya	Stadyum	Asma Germe	Çelik, Membran, Pleksiglas Panel	Biyomimikri Tasarım Yaklaşımı	-Geniş açıklık en az taşıyıcı ile taşınmıştır. -Esnek ve portatif bir yapıdır.
Son-O-House Ses Galerisi	2004/ Eindhoven, Hollanda	Müzik Pavyonu	Tekstil Sistem (Çekme Germe Strüktür)	Çelik, Kumaş	Organik Tasarım Yaklaşımı	- Cephe strüktüründe hareket, boyut ve görsellik kazandırmaktadır. - Geometrik şekilde yapılabilmesiyle kendi sistemi içerisinde taşınabilen tekstil sistemler çeşitli katlama teknikleriyle de mimariye farklı bir yön vermektedir. - Gerçeklik, esneklik ve dayanım sağlar.
Eden Projesi	2001/ Cornwall, İngiltere	Sera Yapısı	Şişme Sistem	Çelik, ETFE	Biyomimikri Tasarım Yaklaşımı	-Dünya'nın en büyük tekstil yapısıdır. -ETFE kullanılması yapının ağırlığını azaltmış ve çeliğe daha az ihtiyaç duyulmuştur. Bu sayede daha fazla gün ışığı yapıya alınmıştır. -Isı tasarrufu sağlanmıştır. -En küçük yüzey alanıyla en büyük hacim elde edilmiştir. -Portatif ve yüksek derecede esnek bir yapıdır.
Odate Jukai Dome Park	1997/ Akita, Japonya	Spor Merkezi	Ahşap Kafes Sistemi	Ahşap, Çelik, Cam, Membran	Organik Tasarım Yaklaşımı	-Lokal ahşap malzeme kullanıldığı için enerjiden tasarruf edilmiştir. -Yapım sürecinde süre verimliliği sağlanmıştır. -Kolonsuz bir şekilde geniş açıklık geçilmiştir.
Midlands Müzesi	1994	Müze	Cam Sistem	Cam, Çelik	Modern Mimari Ek Tasarım	-Geçirgen yapı odaklı yaklaşım oluşturmuştur. -Cam malzeme ile kolon ve kiriş oluşturulabilir. -Portatifdir.

SONUÇ

Bu çalışmada, çağdaş yapılarda kullanılan hafif strüktür malzemeler incelenerek çağdaş yapılaşmada yapıya olan katkıları ve avantajları incelenmiştir. Teknolojinin yardımıyla gelişen yapı endüstrisi, özellikle proje safhasında yaşanan tasarımsal sınırlamalara çözüm

olacak yenilikçi malzemeler üretmiştir. Daha geniş açıklıklı, daha yüksek ve daha sürdürülebilir yapı tasarımı yarışı içerisinde, hafiflik ve dayanım konusunda yaşanan sorunlar, mimar ve mühendisleri, hafif strüktür malzemeleri tasarımlarında kullanmaya teşvik etmiştir. Çelik, cam, katkılı beton, ahşap, pnömatis

Hafif Strüktür Malzemelerinin Çağdaş Mimaride Yapıya Katkıları

temler, membran ve tekstil sistemler olarak sınıflandırılan hafif strüktür malzemeler, geleneksel malzemelere göre yapılara sağladığı avantajlar sebebiyle, genellikle büyük yapıların tasarımında daha fazla tercih edilmektedir. Yapıya sağladığı dayanımı, hafifliği, tasarımsal esnekliği, geri dönüşümlü malzemeye olanak vermesi, nakliye ve kurulum kolaylığı gibi avantajları sayesinde günümüzde daha işlevsel ve sürdürülebilir yapılar tasarlanmaktadır. Yapıların taşıyıcı sistemine veya formuna entegre olan yenilikçi malzemeler, mimaride yeni bir dil ve tasarımsal yaklaşımı da beraberinde getirmektedir. Aynı zamanda hafif strüktür malzemelerin hızlı çözümler sunması, atıl yapıların güçlendirilmesinde veya afet sonrası hızlı barınma ihtiyacının sağlanmasında da kolaylıkla uygulanabilmektedir. Hala üzerinde çalışılan hafif strüktür malzemeler geliştirilerek, yapı endüstrisinde her gün yeni bir adım daha aılmaktadır. Günümüzde buldukları ortama göre şekil alıp, kendi biçimini değiştiren mekânların oluşumuna imkân sağlayan yapı malzemeleri üzerinde çalışılmaktadır. Dolayısıyla gelecekte, bulunduğu ortamın özelliklerine göre moleküler yapısının değişip, daha esnek ve insana daha uyumlu yenilikçi malzemeler üretilmesi ön görülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 2022 yılı içerisinde tamamlanan “Çağdaş Hafif Strüktür Malzemelerinin Yapı Formunda Kullanımı ve Tasarıma Etkisi” (Gökalp, 2022) başlıklı yüksek lisans tezi verileri ile 17-21 Mart 2022 tarihinde 2. Uluslararası Antalya Bilimsel Araştırmalar ve Yenilikçi Çalışmalar Kongresi’nde “Design Effect of Light Structure Materials Used in Contemporary Additions in Historic Buildings” başlığı altında sözlü bildiri olarak sunulan ve sempozyum özet bildiri kitabında yayınlanmış olan veriler kullanılarak hazırlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Alioğlu, T. (2018). Tekstil esaslı malzemelerin mimaride kabuk tasarımında kullanımı ve sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi. Doktora Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.
- Altun, T. D. A. (2007). Geleceğin mimarlığı: bilimsel-teknojik değişimlerin mimarlığa etkileri. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9(1): 77-91.
- Charest, P., Shepherd, P., Harris, R., Potvin, André, Demers, C., Ménard, S. (2019). Patchwork gridshells: Using modularity to facilitate prefabrication and simplify construction. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 60:176-188.
- Dansık, F., Şahin, M. (2016). Germe sistemlerin yapısal tasarım ilkeleri. 6. Çelik Yapılar Sempozyumu, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Ekinci, S., Eşsiz, Ö., Elemanlar, S. K. (2005). Deprem bölgelerinde hafif çelik yapı sistemleriyle üretilen konutların uygulanabilirliği. Kocaeli 2005 Deprem Sempozyumu, Kocaeli, Türkiye.
- Ercan, S. K. (2018). Biyomimetik strüktürlerin örneklerle irdelemesi. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.
- Floyd, O. A., Nilson S. H. and Salvador, M. (1986). Mechanical properties of high-strength lightweight concrete. *ACI Journal*, 606-613.
- Fritzsche, J. C. (2013). Gridshell efficiency optimization optimizing efficiency form- & grid-configuration through iterative approximation and minimization strain energy. Yüksek Lisans Tezi, Eindhoven Teknik Üniversitesi, Mimarlık Anabilim Dalı, Eindhoven, Hollanda.
- Gezer, H. (2008). Üretim alanında tekstil ve mimari arasındaki etkileşim. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(13): 21-50.
- Gezer, H. (2012). Malzemenin gizil güçlerinin mimariye katkısı. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 97-118.
- Gökalp, D. (2022). Çağdaş hafif strüktür malzemelerinin yapı formunda kullanımı ve tasarıma etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Burdur, Türkiye.
- Haddad Mork, J., Dyvik, S., Manum, B., Ronnquist, A., Labonnote, N. (2016). Introducing the segment lath-a simplified modular timber gridshell built in Trondheim. Norveç.
- Inner, S. (2019). Biyomimikri ve parametrik tasarım ilişkisinin mimari alanında kullanımı ve gelişimi. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, *Uluslararası Hakemli Tasarım ve Mimarlık Dergisi*, 1(1):15-29.
- Kılıncı, G. A., Sev, A. (2020). Ekonomik ve teknolojik faktörlerin yüksek ofis yapılarının ortaya çıkışı ve gelişimi üzerindeki etkisi. *Mimarlık ve Yaşam Dergisi*, 5(1): 161-179.
- Koç, S., Gür, N. V. (2021). Mimaride etkin strüktürler olarak ahşap ızgara kabukla. *Kocaeli Üniversitesi Mimarlık ve Yaşam Dergisi*, 6(2): 349-369.
- Kronenburg, R. (2007). *Flexible architecture that responds to change*. Laurence King Publishing, Londra, İngiltere.
- Kubo, M., Salazar J. (2004). *Verbs. Architecture Boogazine*, Aktar, Barselona, İspanya.
- Kurzweil, R. (1999). *The age of spiritual machines*. Viking Press.
- Leackh, N., Turnbull D., Williams C. (2004). *Digital tectonics*. Wile-Academy, Artmedia Press Ltd, Londra, İngiltere.
- Mestan, A. (2019). Açık ofis iç mekan tasarımının kullanıcıların algısal değerlendirmeleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye.
- Naicu, D., Harris, R., Williams, C. J. K. (2014). Timber grids-hells: design methods and their application to a temporary pavilion. Quebec City, Canada.

Hafif Strüktür Malzemelerinin Çağdaş Mimaride Yapıya Katkıları

- Paoli, C. (2007). Past and future of grid shell structures. Yüksek Lisans Tezi, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü, İnşaat ve Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Cambridge, Amerika Birleşik Devletleri.
- Pilar Echavarría M. (2005). *Portable architecture and unpredictabel surrounding*. Structure Publishing Carles Broto, Barcelona, İspanya.
- Ritter, A. (2007). *Smart materials in architecture*. Birkhauser, Berlin, Almanya.
- Sancak, E., Şimşek, O. (2006). Yüksek sıcaklığın silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı katkılı hafif betona etkileri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(3):443-450.
- Savcı, S., Dikmen, Ç. B. (2015). İnşaat sektöründe geri dönüşüm kaynağı olarak cam malzemelerin yeniden kullanımı. 2. Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu, Ankara, Türkiye.
- Sev, A., Gür, V., Özgen, A. (2003). Cephenin vazgeçilmez saydam malzemesi cam. 2. Ulusal Yapı Malzemeleri Kongresi, Ankara, Türkiye.
- Songel, J. M. (2020). Sustainability lessons from vernacular architecture in Frei Otto's work: tents and gridshells. The International Archives of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIV-M-1-2, 233-240.
- Sönmez, B., Kiasıf, G. Ç. (2018). Çevresel, sosyal ve ekonomik bağlamda akıllı cephe sistemlerinin sürdürülebilir kalkınmaya etkileri. *Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1: 63-98.
- Tekgüvercin, Z. D. (2002). Uzay kafes sistemler; tarihi gelişim, güncel durum. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Tuğrul, F., Sev, A. (2015). Geleceğin sürdürülebilir yapı teknolojilerine bir bakış: hafif strüktürler. 2. Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu, Ankara, Türkiye.
- Uysal, A. (2004). Yüksek sıcaklığın beton üzerindeki etkileri. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.
- Yıldırım, S. G. (2003). Hafif çelik taşıyıcı endüstrileşmiş konutlarda tasarım verileri. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.
- URL-1 (2022). Çeliğin tarihçesi. <https://www.etnace-lik.com.tr/celigin-tarihcesi/> (Erişim Tarihi: 09.05.2022)
- URL-2 (2011). Özellikli camların mimaride kullanımı. https://www.cativecephe.com/yayin/656/ozelliklicamla-rinmimaridekullanimi_19491.html#.Ynpw4fNBzIU (Erişim Tarihi: 13.05.2022)
- URL-3 (2008). Masdar Genel Merkezi. <https://archi-nect.com/soyounglee/project/masdar-headquarters> (Erişim Tarihi: 23.05.2022)
- URL-4 (2022). Masdar Genel Merkezi. http://smithgill.com/work/masdar_headquarters/ (Erişim Tarihi: 08.06.2022)
- URL-5 (2017). Saydam beton tasarımı. <https://insape-dia.com/saydam-beton/> (Erişim Tarihi: 06.06.2022)
- URL-6 (2015). Santiago Calatrava. https://calat-rava.com/projects/bce-place-galleria-heritage-square-%20toronto.html?view_mode=gallery,% (Erişim Tarihi: 23.05.2022)
- URL-7 (2007). Turning Torso. <http://mim-dap.org/2007/08/hsb-turning-torso/> (Erişim Tarihi: 09.06.2022)
- URL-8 (2012). Turning Torso structure. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Turning_Torso_struc-ture.svg (Erişim Tarihi: 23.05.2022)
- URL-9 (2004). Turning Torso. <https://edoc.site/turning-torso-malmo-pdf-free.html> (Erişim Tarihi: 23.05.2022)
- URL-10 (2020). Membran nedir. <http://propermemb-ran.com/membran-nedir/> (Erişim Tarihi: 13.05.2022)
- URL-11 (2009). Tekstil mimarlığı. <http://www.fabri-cart.com.tr/technical-informations/textile-architecture/> (Erişim Tarihi: 13.05.2022)
- URL-12 (2017). Münih Olimpiyat Stadyumu. <https://www.ar-kitektuel.com/munih-olimpiyat-stadyumu/> (Erişim Tarihi: 06.06.2022)
- URL-13 (2017). Münih Olimpiyat Stadyumu. <https://www.ar-kitektuel.com/munih-olimpiyat-stadyumu/> (Erişim Tarihi: 09.06.2022)
- URL-14, (2016). Germe sistemlerin yapısal tasarım ilkeleri. <http://imoistanbul.org/imoarsiv/seminer-notlari-nisan-2016/tekil/fevzi-dansik/5fevzi-dansik.pdf> (Erişim Tarihi: 13.05.2022)
- URL-15 (2017). Münih Olimpiyat Stadyumu. <https://www.ar-kitektuel.com/category/projeler/kamusal/spor/> (Erişim Tarihi: 24.05.2022)
- URL-16 (2016). İnşaat mühendisliğin faydaları ve uygulamaları. <https://theconstructor.org/structures/tensegrity-structures-benefitsapplications/14181/> (Erişim Tarihi: 09.06.2022)
- URL-17 (2019). Membran sistem ve çeşitleri. <https://insape-dia.com/membran-sistemler-ve-cesitleri/> (Erişim Tarihi: 13.05.2022)
- URL-18 (2015). Eden Projesi. <https://gaiadergi.com/dunya-nin-en-buyuk-serasi-eden-projesi/> (Erişim Tarihi: 09.06.2022)
- URL-19 (2018). Son-O-House by NOX/Lars Spuybroek. <https://parametric-architecture.com/son-o-house-by-nox-lars-spuybroek/> (Erişim Tarihi: 13.05.2022)
- URL-20 (2018). Son-O-House. <https://www.evdh.net/sono-house/> (Erişim Tarihi: 06.06.2022)
- URL-21 (2018). Odate Dome. <https://www.arkitek-tuel.com/odate-dome/> (Erişim Tarihi: 14.05.2022)
- URL-22 (2015). Broadfield House Cam Müzesi. <http://www.spirit-architects.london/broadfield-house-glass-museum> (Erişim Tarihi: 07.06.2022)
- URL-23 (2019). Deprem nedir deprem kılavuzu. <http://im-ranli.gov.tr/deprem-nedir-deprem-klavuzu> (Erişim Tarihi: 16.05.2022)
- URL-24 (2015). Çelik yapıların yangına karşı korunması. <http://endurans.com.tr/celik-yapilarin-yangina-karsi-ko-runmasi/> (Erişim Tarihi: 16.05.2022)