

Öz


Hiperbolik paraboloid çift eğrilikli bir yüzey türüdür. Bu yüzey türünün bir strüktür olarak kullanımı betonarmenin yaygınlaşmasıyla birlikte mümkün olmuştur. Bu strüktür yapı endüstrisinde çeşitli yüzeylerin birbiriyle entegrasyonuyla birçok kez ortaya konmuştur. Her noktasında çekme ve basınç gerilmelerini karşılaması onu diğer kabuk yapılara oranla daha ince ve estetik kılmıştır. Öte yandan kalıp işçiliği, donatı yerleştirilmesi, beton dökümü, yalıtım ve kaplama katmanlarının teşkilinin zorluğu nedeniyle bu strüktürlerin uygulanması belirli bölgelerle sınırlı kalmıştır. Bunun yanında ilerleyen yapı teknolojisi ve yeni malzemelerin icat edilmesi çeşitli çağdaş uygulamaların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Çalışmada ülkemizde nadir rastlanan hipar kabukların mühendislik ve mimarlık ortak disiplininde betonarmeye yönelik teorik bir çerçeveye çizip onun plastik boyutu olan ince kabuk strüktürlerden bahsedilmiştir. 20. yüzyılın önemli kabuk tasarımcıları ve dönemine damga vuran yapılarına değinildikten sonra kabuk strüktürler arasında strüktürel etkinlik ve estetik bağlamında en iddialı formlardan olan hiperbolik paraboloid (*hipar*) kabuklar tarihi gelişim ve yapım yöntemleri bağlamında incelenmiştir. Öncüler, gelişme/ zirve ve çağdaş uygulamalar başlıkları altında sınıflandırılan betonarme hipar kabuk uygulamaları, yapım sorunları, yapım tekniği ve kolaylığı, geçilen açıklık, strüktür malzemesi ve kalınlığı gibi ayırt edici özellikler içeren bir tabloda özetlenmiştir. Elde edilen bulguların özellikle mimarlık ve mühendislik öğrencileri için alandaki Türkçe kaynak eksikliğine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Abstract


Hyperbolic paraboloid is a type of double curvature surface. The use of this surface type as a structural system became possible with the widespread use of reinforced concrete. This structural form has been used many times in the building industry with the integration of various surfaces with each other. Neutralizing tensile and compressive stresses at every point made it thinner and more aesthetic than other shell structures. On the other hand, the implementations of these structures has been limited to certain regions due to the difficulty of construction such as formwork, reinforcement placement, concrete casting, forming insulation and coating layers. However, with the advancing construction technology and the invention of new materials, it has led to the emergence of various contemporary techniques.

*In this study, a theoretical information for reinforced concrete is given and mentioned thin shell structures. Then the important concrete shell designers of the 20th century and their structures that marked their period, the hyperbolic paraboloid (*hipar*), which is one of the most ambitious forms among shell structures has been examined in the context of historical development and construction techniques. Reinforced concrete *hipar* shell applications, which are classified*


Betonarmede Strüktürel Bir Zirve: Hipar Kabuklar'

 Muhammed Emin Akyürek

İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü

 Nabi Volkan Gür

Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü

 Mehmet Selim Ökten

Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü

Başvuru tarihi/Received: 14.08.2020, Kabul tarihi/Final Acceptance: 18.12.2020

1. Giriş

Hiperbolik paraboloid (*hipar*), birbirine zıt yönlü parabolardan oluşan çift eğrilikli bir yüzey türüdür. Yüzeyin yatay arakesiti hiperbolden, düşey arakesitleri ise parabolardan meydana gelmektedir. Somutlaştırmak gerekirse hipar, iki dağ arasındaki geçidi, bir cips formu veya bir atın semerini oluşturan formdur. Hipar, birbirine zıt eğriliklerinin yüzeyde sağladığı dengeli kayma gerilmeleri sayesinde oldukça etkin ve zarif bir strüktür tipi olarak yapı endüstrisinde yer edinmiştir.

Hipar geometride eğri ve doğru, mimaride yüzey ve hacim, mühendislikte döşeme ve çatı gibi kavramlarla karşılık bulmaktadır. Günümüzde nüfus artışı, ihtisaslaşmayı ve disiplinlerin bölünmesini sağlamıştır. Buradan hareketle mimar strüktür kavramından, mühendis form kavramından gittikçe uzaklaşmaktadır. Böyle bir ortamda mimar, biçimi algılasa dahi strüktürel çözümlemelerde eksik kalmaktadır. Mühendis ise eğitim müfredatının daha çok klasik strüktürler üzerine kurulu olması nedeniyle pratik bilgisini bu alanda tecrübeye dökmektedir. Bu nedenle yapım aşamasında mimariden gelen form, yaygın bilinen ve basit olana doğru indirgenebilmektedir. Bu da mimar ve mühendisi eğitim sürecinden başlamak üzere hipar gibi az bilinen formların tasarımına karşı mesafeli hale getirmektedir.

Dünyada pek çok üretim yöntemiyle yüzlerce örneğine rastlanan hipar yapıların Türkiye’de karşılık bulmaması; ülkemizde bu konudaki Türkçe kaynak ve uygulama yetersizliği, mimarlık ve mühendislik öğrencilerinin bu strüktürlere aşina olmaması veya konuya uzak durmaları araştırmanın önemli bir sebebini oluşturmaktadır.

Çalışmada betonarmenin teorik boyutu ve onun plastik boyutu olan ince kabuk strüktürler arasında bir ilişki kurulmuş, ince kabukların zirvesi olarak görülen hipar kabuklar; alan taramasından elde edilen tarihsel gelişim, yapım yöntemleri ve örnekler üzerinden açıklanmıştır.

“Bulgu ve değerlendirmeler” bölümünde yapım yöntemleri, geçilen açıklık, strüktür malzemesi ve kalınlığı gibi başlıklar açısından yapılan karşılaştırmalar ve değerlendirmeler, tasarımcıya seçeneklerini görmesi ve tercih nedenini belirlemesi adına bir tabloda özetlenmiştir. Hipar yapı tasarımında yük aktarımı-mesnet ilişkisi ve strüktürel etkinliği artıran etmenleri içeren örnekler de aynı bölüm içinde yer almaktadır.

2. Betonarmenin Gelişimi

Betonarme, yüksek basınç mukavemetiyle bilinen betonun çekme ve eğilme kuvvetlerine karşı dayanabilmesi için bünyesine belirli bir miktarda çelik donatı eklenmesiyle oluşturulan kompozit bir malzemedir.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

under the titles of pioneers, development / peak and contemporary applications, are summarized in a table containing distinctive features such as construction problems, construction technique and ease, span, structure material and shell thickness. It is thought that the study will contribute to the lack of Turkish resources in this field, especially for the students of architecture and engineering.

Anahtar Kelimeler: Betonarme, ince kabuk strüktürler, hiperbolik paraboloid, hiper kabuklar.

Keywords: Reinforced Concrete, thin shell structures, hyperbolic paraboloids, hyper shells.

Literatürde “çelikle güçlendirilmiş beton” olarak da geçmektedir. Malzemenin bileşenlerinden olan çeliğin sanayi devrimiyle gelişmesi nedeniyle, betonarmenin serüveni betonla başlamaktadır. Günümüzde kullanılan beton; çimento, kum ve çakıl ve/veya kırma taşın uygun miktarda suyla karıştırılmasıyla oluşturulan bir malzemedir. Beton, çimento harcının niteliğinden söz ettirir. Harç ise tarih boyunca yapı taşlarının derzlerinde, sıvalarında ve döküm ile yapı üretiminde kullanılan yegâne yapı bileşenidir.

Betona benzer karışımların ilk kez Roma döneminde kullanıldığı bilinmektedir. Volkanik tüf, kül, moloz taş kırıkları ile sönmüş kireç ve suyun karıştırılmasıyla meydana gelen bu beton cinsi, Roma’da denize kurulu iskeleler, hamamlar, viyadükler, su kemerleri ve tapınaklar gibi özel binalarda kullanılmıştır (Vitruvius, 2017, çev. Dürüşken). Roma’da kullanılan bu beton, M.S. 2. yüzyılda inşa edilen Pantheon tapınağının 43m çapındaki kubbesinin yapımına olanak sağlayarak inşaat teknolojisi adına yeni bir çığır açmıştır (URL-1). Ancak bu teknoloji Roma sınırlarında kalmış, bir başka medeniyette belirmemiştir.

18. yüzyılın önemli mühendislerinden olan John Smeaton 1756-59 yılları arasında İngiltere’de Eddystone kayaları üzerindeki deniz feneri rekonstrüksiyonuyla Roma döneminden bu yana beton teknolojisi üzerine ilk aşamayı kaydetmiştir. Smeaton, deniz üzerindeki bu yapıyı inşa etmek için Büyük Britanya kıtasında birçok kireci bir araya getirerek suya karşı direnecek türden bir harç elde etmeye çalışmıştır. Denemelerin sonucunda yaklaşık %10 kil içeren marnlı kireç taşıyla yüksek kalitede beton elde etmeyi başarmıştır ve suya dayanıklı bu kireç, su kireci olarak kayda geçmiştir (Gürdal, t.y.). Oluşturulan bu harç deniz fenerinin temel inşaatı ve yapı taşlarının örgü derzlerinde kullanılmıştır. Daha sonra Smeaton bu çalışmaları ve deneylerini bir kitap yayımlayarak açıklamıştır. Smeaton’un çalışmalarından etkilenen Joseph Aspdin, 1824 yılında, kireçtaşı ve kili belli oranda karıştırıp 1100-1300 °C’de pişirerek erken dönem Portland çimentosunu (do-

ğal çimento) elde etmiş ve patentini almıştır. Aspdin’in çimentosu, bugün kullanılan çimentoların öncüsü ve o güne kadarki en üstün nitelikli olarak uzun yıllar kabul görmüştür. 1852 yılında oğlu Joseph aile firmasını devralarak çimento üretimini ileri safhalara taşımıştır. Isaac Johnson, kurduğu çimento fabrikasında, 1845 yılında çimentonun pişirme sıcaklığını yükselterek yaptığı basit düzenlemeyle Aspdin’in eriştiği teknolojiyi geride bırakmış ve modern Portland çimentosunun babası sayılmıştır (Giedion, 1959; Ökten 1995, 120-143; Steiger, 1995).

Betonarmenin gelişimine yönelik bazı kayıtlar şunlardır:

- İngiliz mühendis Dr. Fox 1829 yılında demir putrelleri beton ile sararak yeni bir döşeme tipi geliştirmiş ve 1844 yılında bu metodun patenti alınmıştır (Giedion, 1959).
- Fransız avukat Jean-Louis Lambot 1848 yılında demir hasır ve harç karışımıyla 2 adet tekne inşa etmiştir (Steiger, 1995). Lambot’un betonarme teknesi 1855 yılında düzenlenen Paris Fuarı’nda sergilenerek dünyaya tanıtılmıştır (Mörsch, 1909).
- Fransız müteahhit François Coignet’in 1850’lerde kendi için yaptığı ve günümüze kadar ulaşan konak, tümüyle betondan oluşmaktadır. Bununla birlikte döşeme ve çatının inşasında dövme demirden küçük putreller kullanmıştır (URL-2).
- Versay Sarayı’nın bahçivanı ve bir mühendis olan Joseph Monnier, 1849 yılında, hasır ve harç terkibiyle boru, saksı gibi elemanlar; daha sonraları demir çubuk ve beton ile döşeme, köprü, kemer gibi yapı elemanı geliştirmiş ve 1867 yılında ilk patentini almıştır Monnier’in çalışmaları, betonarme yapıma yönelik ilk örneklerden kabul edilmektedir (Mörsch, 1909; Steiger, 1995; Aka ve diğerleri, 2001).
- Fransız mimar Henri Labrouste, Sainte-Genevieve Kütüphanesi’nde tonozların kaburgalarında kablolar kullanıp betonla (harç) kaplamıştır (Giedion, 1959).

1 Bu makale “Akyürek, M. E. (2020). Hiperbolik Paraboloidlerin Yapı Endüstrisindeki Yeri. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul.” isimli tezden türetilmiştir.

- Bugünkü anlamda betonarme bir yapıya en çok yaklaşanlardan biri Fransız mühendis Francois Hennebique olmuştur. Hennebique çalışmalarına 1879 yıllarında döşeme ile başlamış ve 1892 yılında kendisi için tasarladığı bir konak yapısında betonarme taşıyıcı elemanları tanıtip patentini almıştır. Hennebique'nin betonarme sistemi birkaç yıl içerisinde olgunlaştırılarak kısa sürede Britanya ve ABD'de temel yapı sistemlerinden biri olarak yerini almıştır (Giedion, 1959; Steiger, 1995).

Betonun icadından 19.yüzyılın sonlarına kadar Amerika, Almanya, Fransa ve İngiltere gibi ülkelerde birtakım ampirik çalışmalar yapılsa da yüzyılın başlarından itibaren yapı mühendisliği adına bütün çabanın devasa demir yapıların inşasında sarf edilmesi nedeniyle beton ve çelik arasındaki ilişki adına bilimsel çalışmaların ortaya çıkması 1890'lı yıllara kadar mümkün olmamıştır. Betonarmenin yaygın bir şekilde kullanımı 20. yüzyılın başlarına isabet etmektedir. Auguste Perret ve Tony Garnier'in betonarme iskeletli birçok binası, günümüzde en yaygın şekilde kullanılan betonarme mimarinin öncülüğünü teşkil etmiştir (Giedion, 1959; Ökten 1995, 120-143).

1900 yılında Fransa'da betonarme yapıları sistematik deneylerle incelemek üzere bir komisyon kurulmuş ve 5 yıl kadar bir süre ile faaliyetlerine devam etmiştir. 1905 yılında komisyonun incelemelerine dayanan bir şartname hazırlanıp 1906 yılında yürürlüğe sokulmuştur. Uzun yıllar yürürlükte kalan bu şartname sonraki gelişmelere uyarlanarak geliştirilmiştir. 1904 yılında, Almanya'da da benzer amaçlarla bir şartname hazırlanmış ve zaman içinde gelişim kaydetmiştir (Aka ve diğerleri, 2001).

Buraya kadar bahsedilenler bir malzemenin gelişim safhalarıdır. Öte yandan malzeme-form-strüktür ilişkisi üzerine gelişmeler, henüz 20. yüzyılın başlarında betonarmenin hızla yaygınlaşmaya başladığı bir dönemde sağlanabilmiştir. Bu dönem betonarmenin klasik formlar üzerinde test edilip plastik sanata ve yapı mühendisliği sanatına dönüşümünün ilk aşamalarıdır.

3. Betonarme İnce Kabuk Strüktürler

Geleneksel dünyada statik hesaplar söz konusu değildir. Bu nedenle birçok anıtsal yapı, sezgiler ve deneyimlerle yola çıkılarak inşa edilmiştir. 18. yüzyılın sonlarına doğru Fransız mühendisler, inşaat yapımında kullanılan demir, ahşap ve taş gibi malzemelerin mukavemetlerini ölçerek tablolar haline getirmiştir. Mukavemet konusundaki ilk kitap ise 1798 yılında Fransız mühendis Pierre-Simon Girard tarafından yayınlanmıştır (Ökten 1995, 120-143). Kuvvet, biçim ve geometri arasındaki ilişkiyi kurma adına atılan ilk büyük adım, İsviçreli mühendis Karl Culmann (1821-1881) tarafından gerçekleştirilmiştir. Culmann çalışmalarında Newton'un 3. Yasasını referans alarak yapılara etkiyen kuvvetlerin yönü ve büyüklüğüne dönük statik grafikler hazırlamıştır. Bu grafikler yapıda kuvvet ve geometri ile ilgili doğrudan bir benzeşme sağlamıştır (Pedreschi 2008, 12-19).

Robert Maillart ilginç tasarımları ile betonarmenin yapı mühendisliği sanatındaki yerine yönelik ilk söylemleri geliştirmiştir. İsviçreli bir mühendis olan Maillart'ın eserleri kârgir yapı formlarına uygun fakat onun sınırlarını aşan betonarme yapılarıdır. Maillart'ın ilk eseri, 1899 yılında tamamlanan Zürih'teki Stauffacher Köprüsü'dür. Köprü, geleneksel yığma yapı biçimini andırması ve taş duvarlara mesnetlenmesine rağmen betonarme bir kemerden oluşmaktadır. Maillart yapısından oldukça tatmin olmuş ve çoğu günümüzde ayakta olan; statik grafiklerin kullanılarak biçimlendirildiği birçok betonarme kemerli köprüye imzasını atmıştır. Onun eserleri uzun yıllar kendinden söz ettirmekle beraber birçok kabuk tasarımcısına da cesaret kaynağı olmuştur (Pedreschi 2008, 12-19).

Kabuk sistemin erken örneklerine gitmek için Orta Çağ gotik mimarisi incelenmelidir. Bu dönemde uygulanan sivri kemerli çapraz tonozlar ve nervürlü kubbeler, modern anlamdaki kabukların bir referans noktası gibidir. Betonarme ince kabuk sistemlerin esin kaynaklarından biri de İspanyol Mimar Antoni Gaudi'dir. Serbest geometri ve organik yapılarıyla bilinen

Gaudi, her ne kadar yığma yapılar ortaya koysa da matematiksel hesaplamalar yerine modeller üzerinde çalışması, düz elemanlarla eğrisel yüzeyler türetmesi ve ilginç formlar ortaya koyması, gelecek kabuk tasarımcılarına önemli bir repertuvar sağlamıştır (Lee ve Garlock 2009, 1562-1573).

Gaudi'nin geometri-biçim ilişkisi üzerine eriştiği önemli noktalardan biri de hiperbolik paraboloid (hipar). Kadim geçmişten günümüze süregelen biçimlere sembol atfetme geleneğini sürdürerek; hipar geometrinin oluşumundaki üç çizgiye; 1 doğuray ve 2 doğrultmana kutsal üçleme (teslis) gibi mistik bir duygu yüklemiştir. Gaudi'nin 1883 yılında devraldığı ve vefatına kadar inşasını sürdürdüğü Sagrada Familia Katedrali'nde bazı tavan yüzeyleri buna örnek gösterilebilir. Bu örnekler, hipar strüktür olmaktan ziyade birer sembol ve desen gibidir (Faber, 1963; Melaragno, 1991).

Betonarme ince kabuk kavramı İspanyol bir mühendis-mimar olan Eduardo Torroja ve İtalyan mühendis Pier Luigi Nervi'yi akıllara getirmektedir. Torroja, yapı teknolojisine önemli katkıları olan; araştırmacı bir mühendis olarak bilinmektedir. Öyle ki 1939-1961 yıllarında bir inşaat mühendisliği okulunda hocalık yapmış ve 1958 yılında "The Philosophy of Structures" isimli kitabını yayınlamıştır. Torroja, yapısal çelik ile beton entegrasyonunun avantajlarını oldukça verimli değerlendirmiştir. Çalışmalarında mimarlık ve mühendislik disiplinlerini buluşturarak, daha çok silindirik formlu yapılar ortaya koymuştur (Corres ve Leon 2012, 581-584). Torroja'nın mühendisliğini yaptığı meşhur yapılarından biri 1935 yılında yapımı tamamlanan Algeciras Pazar Alanı'dır. Yapı sekizgen bir plan üzerinde 47.76m çapında bir kubbenin örtülmesiyle meydana getirilmiştir. Sekiz ayağa mesnetlenen kubbenin kalınlığı 9 ile 50 cm arasında değişirken kubbenin tepe noktasında betonarme üçgenler ile bölümlenen bir ışıklık bulunmaktadır (Şekil 1) (Cassinello, 2016).

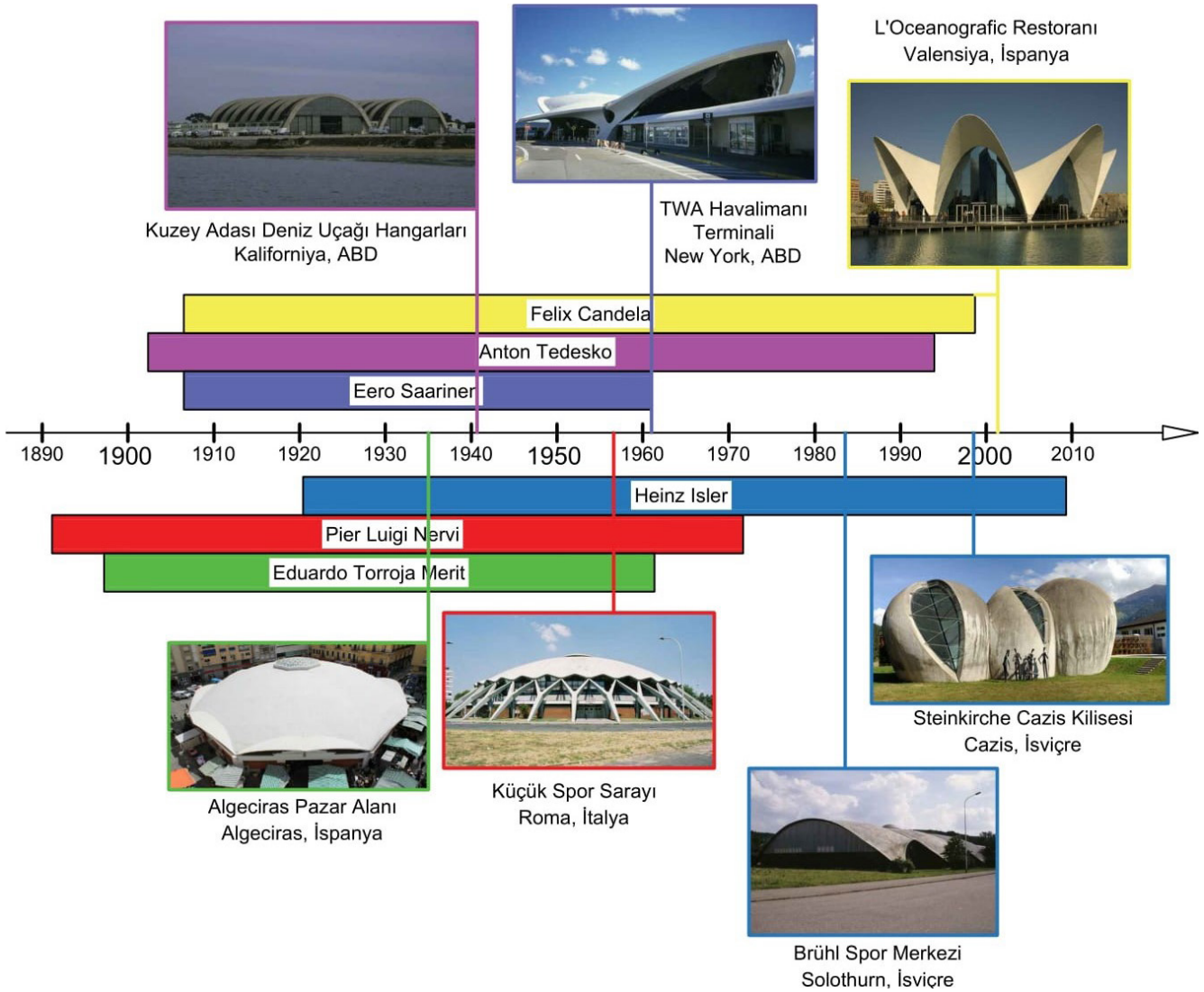
Betonarme kabuk sistem Nervi'nin inşaat faaliyetlerinin merkezinde olmuştur. Onun tasarladığı ve uyguladığı yapılar, genellikle çeşitli geometrik desenler oluşturan

nervürlü ve sinklastik kabuklardır. 1940-60 yılları arası Nervi'nin geliştirdiği ince kabuk sistemin olgunluk aşamasına eriştiği, onun başyapıtlarını ortaya koyduğu zaman aralığıdır. Nervi'nin ulaştığı zirve noktası ise Bartoli ile ortaya koyduğu Palazzetto Dello Sport (Küçük Spor Sarayı) kapalı spor salonudur (Lori ve Poretti, 2019). 1957 yılında yapımı tamamlanan Roma'daki Küçük Spor Sarayı'nın üzerini 100 metre çapındaki basık bir kubbe örtmektedir. Kubbe, 1620 adet prekast levha ve bunların aralarına yerinde döküm beton ile imal edilen nervürlerden meydana getirilmiştir. Kabuk ışımsal olarak konumlanan 36 adet "Y" formlu payanda tarafından desteklenmiştir (Şekil 1) (Nervi, 1966; Koçyiğit, 1997).

Dönem itibarıyla Nervi ve Torroja ile birlikte anılabilecek bir diğer isim Anton Tedesco'dur. İnce kabuk strüktürlerin Amerika'daki önemli temsilcilerinden olan Tedesco, kaburgalı (betonarme kemer) beşik tonozlar geliştirmiştir. Kaburgalar kalıp sökümünü kolaylaştırmakla beraber sistemin stabilitesini artırmıştır. Tonoz biçimli kaburgalı kabuklardan Kuzey Adası Deniz Uçağı Hangarları, 90,83 m ile döneminin en geniş açıklıklı kapalı strüktürlerindedir (Şekil 1) (Silman 2011, 241-243).

Eero Saarinen kendinden önce gelen kabuk tasarımcılarının aksine mühendis değil mimardır. Bu nedenle olmalıdır ki, eserlerinde yapım verimliliğinden ziyade heykel etkisi üzerinde yoğunlaşmış ve kısa ömründe birçok sembol yapı tasarlamıştır. Bu yapılardan biri de 1962 yılında, vefatının ardından yapımı tamamlanan TWA Havalimanı Terminali'dir. Görünüşü bir kuşu andıran, serbest formlu bir betonarme kabuktan meydana gelen bu yapı, dönemin şartlarında binlerce paftalık çizimlerle ifade edilip inşa edilebilmiştir (Şekil 1) (Shaeffer, 2008).

Heinz Isler betonarme kabuk inşasına yönelik yeni form verme yöntemleri geliştirmiştir. Birer yastık şeklindeki pnömatik kalıplar ile bombeli (sinklastik türden) yapılar, bir membranı asmak suretiyle matematiksel olarak tanımlanamayan, yani serbest geometri formların yapımını mümkün kılmıştır. Isler bu yönüyle en çağdaş kabuk



tasarımcılarından olup sayısız form tasarlamış ve inşa etmiştir (Isler 1994, 142-147; Chilton 2011, 124-126). Bahsedilen tekniklerle inşa edilen iki farklı yapı Şekil 1'de örneklenmiştir.

Genelde betonarme kabuk, özelde hiperbolik paraboloid kabuklarla özdeşleştirilen bir diğer kabuk tasarımcısı Felix Candela'dır. Strüktürel anlamda en etkin ve tanımlanabilen eğrilikli formlardan olan hiperbolik paraboloidleri çeşitli boyut ve kombinasyonlarla deneyen Candela, bu alanın duayeni olmuştur. Tasarladığı L'Oceanografic Restoranı ile bu alandaki tecrübesinde doruğa ulaşmış, bina çağdaş tekniklerle inşa edilerek kendisinin ölümünden sonra 2002 yılında tamamlanmıştır (Şekil 1).

4. Hiperbolik Paraboloid (Hıpar) Betonarme Kabuklar

4.1 Hıpar Yüzeyler ve Betonarme Hıpar Kabukların Gelişimi

Hiperbolik paraboloid veya hıpar (*hypar*), anlaşılacağı üzere hiperbol ve parabolardan oluşan bir başka geometrik ifadedir. Açıklamayı biraz detaylandırmak gerekirse; düşey asal kesitlerinden biri içbükey, buna dik kesen diğeri dışbükey parabolardan, yatay arakesitleri ise hiperbolden oluşan yüzeye hiperbolik paraboloid denir. Hıpar, komşu kenarlarının birbirine zıt yönlü olması itibarıyla çift eğrilikli yüzey grubunun antiklastik, yani zıt eğrilikli kısmında yer almaktadır. Geometride, Gauss

Şekil 1: Bazı önemli ince kabuk tasarımcıları ve dönemine damga vuran yapıları.²

² Şekil içerisindeki bilgiler URL-4'ten derlenmiştir.

eğriliği negatif (-) veya açınıcı yapılmayan yüzey türü olarak da geçmektedir. Hipar, bir atın eyerini/ semerini andırmaktadır. Bu nedenle bu yüzeylere eyer/ semer formu da denilmektedir (Şekil 2).

Bu yüzey türü betonarme ince kabuk strüktür teknolojisinin hızla geliştiği bir dönemde Felix Candela ile birlikte yapı sektöründe taçlanmıştır. Çift eğriliği nedeniyle sağlamış olduğu strüktürel etkinlik, yapım için gereken malzeme miktarının az olması ve estetik beğeni toplaması gerekçeleriyle 20. yüzyılın çokça uygulanan biçim örneklerinden olmuştur. Yüzeyin her noktasında basınç ve çekme gerilmelerini karşılaması, geniş açıklıklı yapıların bu yöntemle uygulanabilirliğini de mümkün kılmıştır. Bunun yanında eğri kenarlı ve düz kenarlı hiperbolik paraboloidlerin çeşitli boyut ve biçimlerde birbirine eklenebilmesi, farklı noktalarından mesnetlenebilmesi ve konsol çalıştırılabilmesi mimari tasarımda yenilik ve çeşitlilikler de sağlamıştır.

Hiperbolik paraboloid biçimli kabukların ilk örneğini kimin meydana getirdiğini söylemek güç olsa da, keşfin birbirinden bağımsız çalışan birkaç kişi veya grup tarafından ortaya konduğu söylenebilir. Bernard Laffaille, bunun öncülüğünü yapan isimler arasında öne çıkmaktadır. Laffaille 1932 yılında uçaklar için test ürünü bir örtü tasarlamıştır. 1934 yılında yayımladığı bir makalesinde bu örtünün; 5cm kalınlığında, 12,5 m açıklığında 4 örtünün birleşiminden oluşan bir hangar olduğundan bahsetmektedir. Buna rağmen 1/2 ölçeğinde meydana

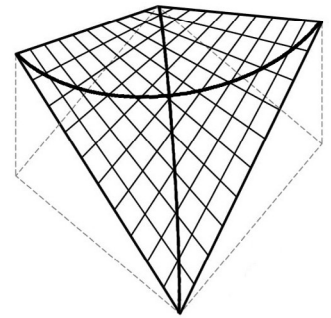
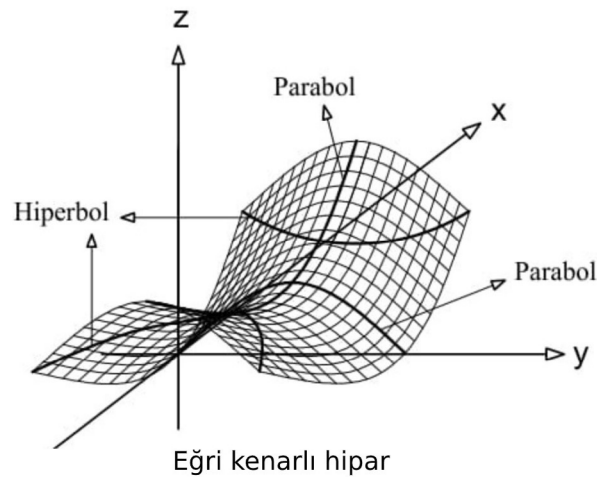
getirilen bu test ürününün konoit veya hipar oluşuna dair kesin bir bilgi bulunmamaktadır (Espion 2016, 159-165).

Laffaille'nin test ürününün bir hipar olup olmadığına yönelik kesin olmayan bilgi, hipar kabukların fikir babası ve mucidinin, Laffaille'nin çağdaşı olan bir başka inşaat mühendisi Fernand Aimond'un olacağına yönelik kanaatleri artırmaktadır. Bunun önemli bir dayanağı Laffaille'nin hangar projesiyle aynı yıla tarihlenen, Aimond'un hipar biçimli atölye projesidir (Tablo 1- Satır 1). Ayrıca, Laffaille'den ziyade Aimond, hem bir hipar kabuk teorisyeni, hem de tasarımcısıdır (Espion 2016, 159-165).

Aimond'un ortaya koyduğu en erken yapı örneği Cuers-Pierrefeu'da bir zeplin üssüne tasarlanan, hidrojen şişeleri için bir depo binasıdır. Yapımı 1933-1936 yıllarında gerçekleşen bu yapı, eyer formu (eğri kenarlı) 30 ayrı hipar kabuktan meydana gelmektedir. Hipar kabuklar 3 cm kalınlığında ve 12x7 m ebatlarında olup her biri tek ve merkezi bir kolon üzerine mesnetlenmektedir (Tablo 1- Satır 2).

Giorgio Baroni, Aimond ile oldukça yakın tarihlerde tasarımlar gerçekleştirmiştir. Ancak onun öne çıkan bir özelliği, hipar strüktürle ilgili resmi liyakati elinde bulundurmasıdır. Nitekim Baroni, 1936 yılında yapılan, Milan'daki sinema salonuyla hipar strüktürün patentini almıştır. Onun erken yapılarından biri de Milan'da Alfa-Romeo firması için tasarladığı fabrika binasıdır (Tablo 1- Satır 4). İnşası 1937 yılında gerçekleştirilen bu yapı, dikdörtgen plan

Şekil: 2
Hiperbolik paraboloid (hipar) (Çizen: M. E. Akyürek).



üzerinde dörtlü kombinasyondan meydana gelen bir dizi hipar kabuğun birleşiminden oluşmaktadır. Bunun yanında, tek mesnetli düz kenarlı bir hipar kabuk (*şemsiye*), ilk kez Baroni tarafından tasarlanmıştır. Konrad Hruban, bu form üzerine teorik çalışmalar ve çeşitli denemeler yapmıştır (*Koçyiğit, 1997; Curra ve Russo, 2018*).

Betonarme hipar kabukları zirve noktasına taşıyan isimlerin başında 20. yüzyılın ortalarına damgasını vuran İspanyol mimar-mühendis Felix Candela (1910-1997) gelmektedir. Hipar biçimli çok sayıda yapıyı büyük bir zarafet, ekonomi ve iş verimliliği bütünlüğüyle tasarlayıp inşa etmiştir. Candela ile birlikte klasik metotlarda inşa edilen betonarme hipar kabuk serüveni sonlanmış gibidir. Her ne kadar üretimine engel bir durum olmasa da, yeni teknolojiler betonarme hipar kabukların üretimini sınırlamaktadır. Bunun yanında, günümüzde ince kabukları çağdaş metotlarla inşa etme yöntemleri de aranmaktadır.

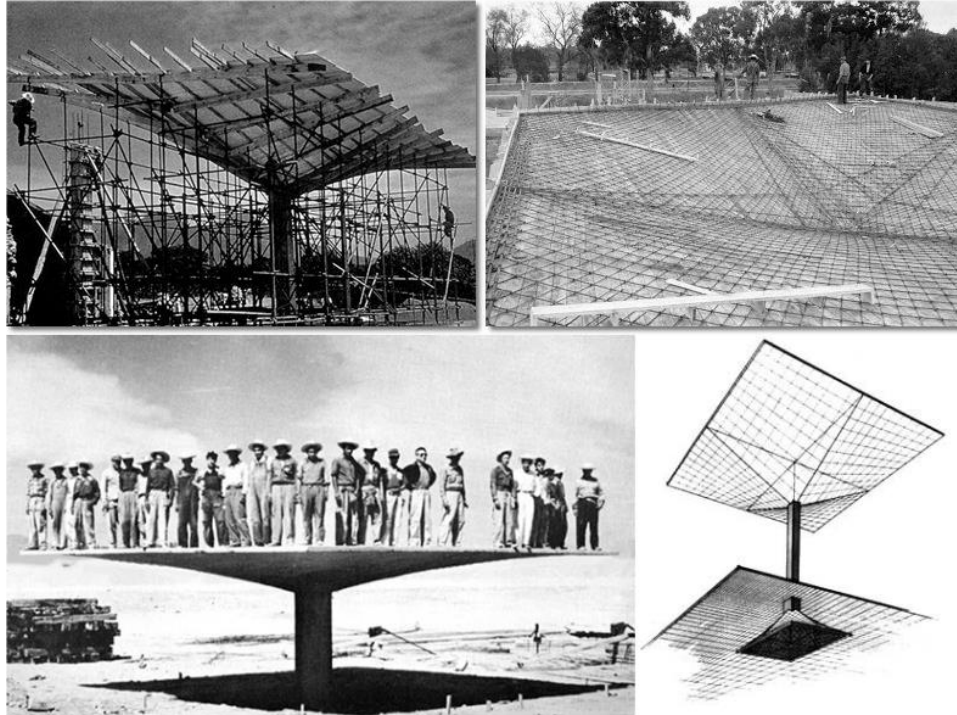
4.2 Betonarme Hipar Kabukların Yapım Yöntemleri

Candela'nın kabuklarının inşasında takip ettiği aşamalar şu şekildedir:

- Kalıbın taşınmasını sağlayan iskelelerin üretilmesi
- Hipar biçimini veren kalıbın hazırlanması
- Donatıların yerleştirilmesi
- Betonun dökülmesi (*Şekil 3*)

Bu uygulamalarda kalıp üretimi ekonominin anahtarı olarak görülmektedir. Bunun en önemli sebebi bu yapıların çoğunlukla birbirinin aynı olan modüllerin kombinasyonları şeklinde inşa edilmesidir. Aynı elemanların tekrarlı olarak üretimi, beton prizini aldıktan sonra kalıbın sökülüp tekrar kullanılmasıyla kolaylaşmıştır. Bu nedenle kalıplar her şantiye için özel üretilen krikolar ile hareketli hale getirilmiştir (*Candela ve diğerleri, 1966*).

Bir örnek teşkil etmesi açısından, Blooming Development Satış Mağazası inşaatında uygulanan kalıplar 1,5 m aralıklı dikmelerin üzerinde 5x15 cm ebatlarındaki kirişlerle oluşturulmuştur. Kalıbın yüzeyi 19 mm kalınlığında kontrplakla kaplanmıştır. Bu kontrplak eğimli yüzeyin üzerini kapatacak şekilde kolayca bükülebilmiş ve vidalarla tespit edilmiştir (*Candela ve diğerleri, 1966*).



Şekil: 3
Felix Candela'nın 1953 yılında tasarladığı deneysel bir yapı (Prkic, 2017).

Bu teknikle yapılan uygulamalardaki önemli bir husus, kalıp işçiliğinin zorluğudur. Kirişlerin geçmeli olması ve ince işçilik gerektirmesi bir kalıp üretiminden çok mobilya üretiminin işçilik hassasiyetini gerektirmektedir. Öte yandan konoit, hiperboloit ve hipar gibi regle (*çizel*) yüzeyli kalıp yapımı, kalıp tahtalarının düzlemsel bir döşeme yapılırken kullanılan tahtalardan pek de farklı olmaması nedeniyle sinklastik yüzey türlerine göre oldukça kolaydır (*Candela 1964, 45-49*).

Kalıp üzerine donatılar yerleştirildikten sonra beton dökülmektedir. Gerçekleştirilen uygulamaların çoğunda donatılar tek dizi hasırdan ibarettir. Bu tür bir kabuğun betonu (*ferro-çimento*³) normalden farklı olmamakla birlikte yüzeyin eğiminden dolayı işlemlerin hızlı ve sürekli olmasını gerektirmektedir. Betonun dökümünden sonra perdah işlemi yapılmakta ve sonrasında plastik rötre çatlaklarını önlemek için zar koruyucu serpilmektedir (*Candela ve diğerleri, 1966*). Kaplama malzemesi olarak çoğunlukla karşılaşılan malzemeler; 2-3 cm kadar rijit bir su yalıtımının üzerine asbest, asfalt ve metal boyalardır.

Betonarme kabuk sistemin stabilitesini güçlendirmek ve daha geniş açıklıkları geçmek için kablo ağı-betonarme hibrit kabuklar da üretilmiştir. Bu sistem, hazır levhaların kablo ağına asılması ve daha sonra birleşim noktalarına yerinde beton dökümüyle sağlanır. Bu sistem Philips Pavyonu (*1958*) ve Saddledome Stadyumu'nun (*1983*) inşasında uygulanmıştır. Ayrıca, bu yöntem esas alınarak Brno Teknoloji Üniversitesi'nde bir prototip geliştirilmiştir. Çalışmada, daha önce inşa edilen kablo ağı strüktürlere atıf yapacak boyutlarda ve nitelikte bir yapı tasarlanmıştır. Yapılan tasarım, 72 m açıklık geçen iki noktadan mesnetli eğri kenarlı bir hipar strüktürden oluşmaktadır. Yapıda, yaklaşık 3 m aralıklı bir ızgara aralığının C70/80 beton kalitesindeki beşgen kenar kirişleri ve 8 cm kalınlığında, LC30/33 (*Hafif beton*) kalitesinde prekast askı levhaları bulunmaktadır. Kablo ağı gözlerine birer birer yerleştirilecek olan levhalar kenarlarında nervürlü düşünülmüştür. Kablo ağı

stabilitesini artırmak ve levhaları birbirine kenetlemek için derz boşluklarına ilave ardgerme kabloları yerleştirilmesi ve buranın yerinde döküm beton ile tek bir yüzey haline getirilmesi önerilmektedir (*Strasky ve diğerleri 2017, 5-18*).

Brno Teknoloji Üniversitesi ekibi, bu tasarım doğrultusunda 1/10 ölçekli bir prototip üretmiştir. Prototip, içi C70/85 kalitesinde beton ile doldurulmuş 15,2 m çapındaki boru profil çevre kirişi (*2 ayrı kemer*) ve ona bağlanan her biri 9,3 mm kalınlığındaki kablo ağından meydana gelmektedir. Çelik basınç çemberi 15,2 m çapında ve içi C70/85 kalitesinde beton içermektedir. Kablo ağına asılacak olan levhalar, LC30/33 beton kalitesinde ve 29x29x1 cm ebatlarında olup kenar kısımlarında 1 cm yüksekliğinde nervür oluşturulmuştur. Kemerler birleşim noktasında ikizkenar yamuk şeklinde çelik bir kaideye oturtulmuştur. Bu kaideler iki adet çelik gergi ile birbirine bağlanmıştır (*Şekil 4*).

Bu modelden hareketle yapım yöntem ve aşamaları şu şekilde sıralanabilir:

1. Basınç elemanlarının (*kemer, kaide, temel*) kurulması
2. Kemer hizasından geçici direklerin kurulması
3. Önce taşıma sonra stabilize kablolarının gerilmesi
4. Kabloların birleşim noktalarında düğümlemesi
5. Kabloların gerginliğinin ayarlanması ve geçici direklerin sökülmesi
6. Eş boyutlu prekast levhaların yerleştirilmesi
7. Özel üretim gerektiren kenar levhalarının konulması
8. Derz ve düğüm noktalarına beton dökülmesi
9. Ardgerme işleminin yapılması
10. Gerekirse yüzey katmanlarının eklenmesi

Kablo-beton-membran entegrasyonu kabuk strüktür üretiminin bir diğer yöntemidir. Bu yöntemle membran bir kalıp vazifesi görürken kabuğun çekme dayanımını takviye eder. Kablolar istenilen formu ve gerilimi

3 Bir kabuk tasarımcısı olan Nervi tarafından geliştirilen ferro-çimento (*ferro-cement*), genellikle sık düzenlenmiş tel örgülü bir betonarme döşeme çeşitidir. Böyle bir döşeme, hafif ve sulu kıvamlı bir çimento şerbetinden oluşması ve nispeten ince çaplı sık donatılar içermesi sayesinde esnek, dayanıklı ve zarif olabilmektedir (*Nervi 1964, 205-212*).



Şekil: 4
1/10 ölçeğindeki prototip ve deneyin oluşum aşamaları (Strasky ve diğerleri 2017, 5-18).

sağlar. Örtünün yüzeyine ve kenar bağlantılarına beton dökülmesi ile strüktürün davranışı, betonarme kabukta olduğu gibi çekme ve basınç gerilmelerini karşılayacak hale getirilebilir.

Bu teknikle ortaya konmuş bir yapı örneği tespit edilememekle birlikte deneysel çalışmalar mevcuttur. Yapılan çalışmalar, çeşitli güçlüklerle inşa edilen betonarme kabuk başyapıtlarının, aynılarını ve fazlasını, düşük maliyet ve enerji ile yapma çabasından doğmuştur (Block 2016, 68-75). Bununla ilgili deneysel bir çalışma şu şekilde gerçekleşmiştir:

Biçimi veren ahşap bir kalıp hazırlanıp kenar kirişleri çelik halatlarla birbirine bağlanmıştır. Deformasyonu sınırlayacak olan bu halatlar üzerine bir membran gerildikten sonra beton dökümü gerçekleştirilmiştir. Daha sonra halatlara ardgerme işlemi yapılmıştır. Beton prizini aldıktan sonra membran ve kalıp malzemeleri sökülüş, böylece strüktür hazır hale gelmiştir (Şekil 5).

Bir kabuk doğası gereği belirli düzeyde bir esnekliğe sahip olmalıdır. Bu davranış, klasik betonarme yapılarda çelik donatılar yardımıyla sağlanmaktadır. Öte yandan günümüzde lifli polimer ile beton veya betonarmeyi güçlendirme çalışmaları sürmektedir. Konuyla ilgili 2015 yılında

Aachen Üniversitesi'nde lifli polimer kumaş ile güçlendirilmiş beton (TRC) teknoloji ile pergole imal edilmiştir. Pergole, her biri 7x7 m boyutlarında birer mesnetli dört hipar kabuk kombinasyonundan oluşmaktadır (Scholzen ve diğerleri 2015, 106-114).

TRC kabuk ve kolonlar fabrikada üretilip yerinde montajı yapılmıştır. Kabuğun üretimi için ahşap elemanlardan geçici bir iskele kurulup üzerine karbon elyafı kumaştan bir kalıp oluşturulmuştur. Beton püskürtme (shotcrete) işlemi için yüzeyin her noktasına ulaşım sağlayan hareketli bir platform kurulmuştur. Yapılan uygulamada önce beton püskürtme, ardından güçlendirme kumaşları yerleştirme işlemi altı kere tekrarlanarak katmanlar oluşturulmuştur. Her beton katmanı yaklaşık 5 mm ve kullanılan her kumaşın kalınlığı 4,6 mm olup yüzeyin toplam kalınlığı 6 cm kadardır. Kumaş yüzeyinin beton ile temasını arttırmak için kumaş, her aşamada kenarlardaki iskeleye dolanarak gerilmiştir. Katmanların düzenlenişinin altıncı tekrarından sonra kabuğun orta noktasına 1,2x1,2 m boyutlarında iki sıra çelik hasır ve kolonla kabuğun bağlantısını sağlayan diğer metal ankraj elemanları konulmuştur. Beton dökümüyle birlikte tüm metal elemanlar kabuk içerisine gömülmüştür (Şekil 6) (Scholzen ve diğerleri 2015, 106-114).

Şekil: 5
Kabüğün yapım aşamaları (Veenendaal ve Block 2014, 39-50).



Şekil: 6
TRC kabüğün üretim aşamaları ve son hali (Scholzen ve diğerleri 2015, 106-114).



Kabuklar birer birer üretildikten sonra hareketli bir vinç yardımıyla daha önceden konumlandırılan prefabrike kolonlar üzerine monte edilmiştir. Kumaş kalıp değışti-

rilmeden 4 kabuk için de kullanılmış olup tüm imalat kesintisiz bir çalışma sonucu 1 günde tamamlanmıştır. Kabuklar birbirine kenar hizalarında birer metre aralıklı olarak



çelik elemanlar yardımıyla bağlanmıştı (Scholzen ve diğerleri 2015, 106-114).

4.3. Betonarme hipar kabuklara getirilen yeni bir vizyon: L'Oceanographic Parkı ve Restoranı⁴

L'Oceanographic veya The Oceanographic Park in Valencia, İspanya'nın Valensiya hükümeti tarafından bilim, eğitim ve eğlence merkezi olarak kurulmuştur (Şekil 7). Yaklaşık 80000 m² alana yayılı olan park, peyzaj alanları, yapay bir gölet ve akvaryum, restoran gibi binalardan oluşmaktadır (Domingo ve diğerleri 2004, 1143-1152; URL-3).

Park içerisinde bulunan ziyaretçi giriş binası ve restoran, 1997'de ölümünden kısa bir süre önce Felix Candela tarafından tasarlanmıştır (Şekil 8). L'Oceanographic restoran binası, Los Manantiales'de olduğu gibi 8 açısız simetrik parçadan meydana gelmektedir. Giriş binası ise benzer şekilde olmakla beraber 4 açısız simetrik parçadan oluşmaktadır. Karşılıklı iki parça bir hiparı oluşturmakta ve bunların serbest kenarı, yer düzlemiyle 60° açı yapmaktadır. Birbirine simetrik şekilde konumlanan iki mesnet noktası arası mesafe 35,50 m; yan yana olan mesnetler arası mesafe ise 13,58 m'dir. Kenar kirişleri bulunmayan kabuğun cidar kalınlığı 6 cm'e kadar düşürülebilmiştir (Domingo ve diğerleri 2004, 1143-1152; Tomas ve Marti-Montrull 2010, 67-77).

6 cm kalınlığındaki kabuk, çelik fiber takviyeli betondan (SFRC) oluşmaktadır. Kabuğun yapımında kullanılan betonun karakteristik basınç dayanımı ($f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$), çimento miktarı 300 kg/m³, maksimum

agrega boyutu 10 mm olarak belirlenmiştir. Bu betona ek olarak 50 kg/m³ çelik fiber ilave edilmiştir. Bu ilavenin faydaları şunlardır:

- Malzemenin daha uniform bir şekilde dağılmasıyla birlikte çatlamlar azalır
- Model üzerindeki çalışmalarda doğruya daha yakın hesaplamalar sağlanır
- Kırılma ve çatlamlara yönelik yeterli düzeyde direnç kazanılır
- Yüzey üzerinde daha yüksek bir süneklik düzeyi elde edilir (Domingo ve diğerleri 2004, 1143-1152).

Restoranın inşaatı dairesel tabanda sekiz ayrı payanda üzerine kurulu bir hipar kabuğu içermektedir. Kabuk strüktürünün yapımında üç yönde 1,5 m aralıklı boru biçimli modüler bir iskele kurulmuştur. Bu iskelenin boyu, yan görünüşleri oluşturulacak kabuğun biçimini verecek şekilde düzenlenmiştir. Kalıpları oluşturmak için iskeleye sabitlenen; kabuk parçalarının eksenine paralel birer dizi ahşap kiriş yerleştirilmiştir. Bu kirişlerin yerleştirilmesi 1,5 ay sürmüştür. Kirişlerin üzerine, çam ağacından elde edilen 2 m uzunluğunda, 8,5 cm genişliğindeki kalıp tahtaları çakılmıştır. Kalıp tahtaları eş zamanlı olarak kabuk parçasının her iki tarafından başlanarak tepede birleştirilmiştir. Birleşim noktaları ön üretimli ve silindirik formu geçici kaburga kirişleri ile kapatılmıştır. Tüm tahtalar çakıldıktan sonra kenar kısımları tıraşlanmıştır. İki tam kabuk parçasının tümüyle kapatılması 15 gün sürmüştür. Daha sonra performans iyileştirilerek tüm

Şekil: 7 ve 8
L'Oceanographic Parkı, 2002 (Martin, 2011);
L'Oceanographic restoranı ve ziyaretçi giriş binası (Prkic, 2017).

⁴ Akyürek, M. (2020). Hiperbolik Parabolitlerin Yapı Endüstrisindeki Yeri. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Şekil: 9

L'Oceanographic Restoranı yapım aşamaları (Martin, 2011; Prkic, 2017).



kalıp işlemleri 1,5 ayda sonlandırılmıştır (Şekil 9) (Domingo ve diğerleri 2004, 1143-1152).

Yine 1,5 ay gibi bir zamanda, birbirine kaynaklı 8 mm çapında ve 15 cm aralıklı çelik hasır yerleştirilmiştir. Beton dökümü püskürtme (shotcrete) şeklinde yapılmıştır (Şekil 10). Bu işlemde öncelikle uniform bir beton yüzey elde etmek için kaplamaların birleşim yerleri, daha sonra kaburga kısımları ve en son kabuğun yüzeyi tamamlanmıştır (Domingo ve diğerleri 2004, 1143-1152).

Kalıplar sökülürken muhtemel deformasyonları sürekli olarak kontrol edebilmek için kapsamlı bir işlem izlenmiştir. Kalıplar tümüyle söküldüğünde noktasal deformasyonlar görülsede, bunlar ihmal edilecek cinsten olmuştur (Domingo ve diğerleri 2004, 1143-1152). Yapı, inşaatı tamamlandığında ince kabukların çağdaş malzeme ve tekniklerle ortaya konmuş yeni bir örneği olarak karşımıza çıkmıştır. Bu yönüyle L'Oceanographic Restoranı, 1960'lardan

sonra etkinliği gittikçe azalan ince kabuk strüktürlere yeni bir vizyon getirmiştir.

5. Bulgu ve Değerlendirmeler

Geleneksel anıt mimarisinin temel öğeleri, genellikle sinklastik (eş yönlü) türden eğriliklere sahiptir. Bunun nedeni yığma strüktürlerin yalnızca basınca çalışmasıdır. Buna karşın hipar ve konoit gibi antiklastik (zıt yönlü) yüzeyler, tabiatı gereği dinamik bir halde olmalıdır. Öyle ki bu dinamik form, işleve karşı egemen hale gelerek tasarım argümanını ve dilini ortaya koymaktadır. Formun domine edici etkisi, çok sayıda küçük boyutlu hipar kombinasyonu ile hafifletilebilir. Bunun mekân olarak kullanılmayan verimsiz ve karanlık noktaları azaltma ile algılanabilirlik açısından faydaları da bulunmaktadır.

Hipar, Candela ve Catalano gibi önemli tasarımcıların da ifade ettiği gibi kolay inşa edilebilen; strüktürel ve estetik yönden etkili bir biçimdir (Akyürek 2020). Hipar kabukları tonoz ve kubbe gibi klasik örtülere göre avantajlı kılan iki temel özellik bulunmaktadır. Bunlar; zıt eğriliklerinden dolayı basınç ve çekme dayanımını birlikte karşılaması ve düzlemsel elemanlarla üretilebilmesidir. Hipar betonarme kabukların diğer biçimlere göre daha ince cidarlı olması bu sayede mümkün olmaktadır.

Genel bir kabul olarak kabuk kalınlığı en

Şekil: 10

Her lobun yarısına 6 şerit şeklinde beton püskürtme aşaması (Domingo ve diğerleri 2004, 1143-1152).



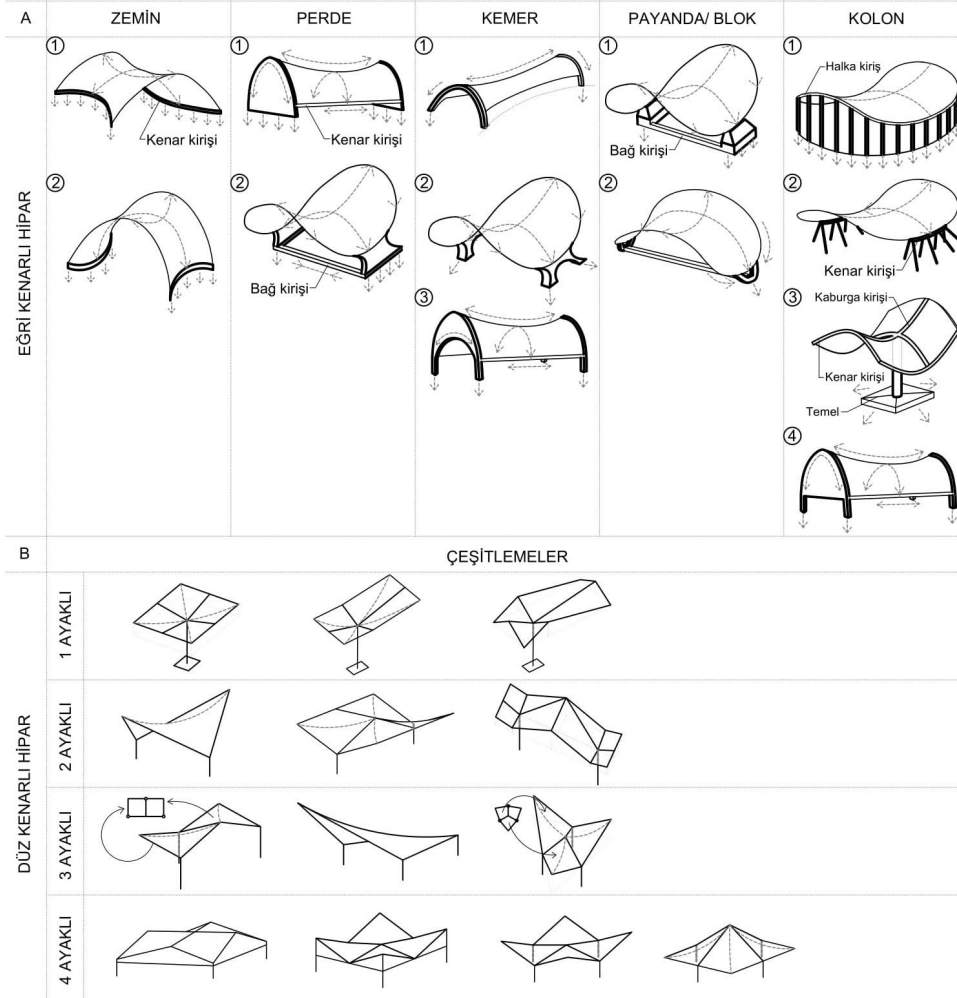
az 4 cm olmalıdır. Kabuğun prefabrike üretilmesi halinde bu koşul da ortadan kalkmaktadır. Bir örnek olarak Candela'nın 1951 yılında uyguladığı Kozmik Işınlara Laboratuvarı'nda kabuğun kalınlığı en üst noktada 1,6 cm'e kadar düşürülebilmiştir (Tablo 1- Satır 6). Öte yandan bu değerler mevcut yönetmelikte tek donatılı döşeme kalınlığı esas alındığında 7 cm alt sınırında tutulmalıdır.

Hipar kabuk biçiminin sağladığı bir olanak da strüktürün kolona ve kirişe gerek olmadan doğrudan temele bağlanarak ayakta durabilmesidir. Mesnet, konum olarak dış bükey paraboller doğrultusunda basınç gerilmelerine maruz kalan kenarların alt kısımlarında bulunmakta, biçim olarak ise tasarıma bağlı, estetik nedenlerle değişiklik göstermektedir. Kabuğun kayma gerilmeleri iç bükey parabol doğrultusunda hiper-

bol oluşumuna bağlı simetriden dolayı birbirine eşittir. Dolayısıyla bu doğrultuda sistem askıda kalabilmektedir (Şekil 11A). Düz kenarlı hipar kabuklarda köşe oluşumundan dolayı mesnet noktasında kolon kullanmak öncelikli tercih sebebidir. Bunlar kenarlarının düz olmasından dolayı ikili, üçlü, dördü gibi kombinasyonlarla şekillenip mesnet noktalarında çeşitlemeler sunmaktadır (Şekil 11B).

Şekil-12'de belirtilen Candela'nın iki yapısı birbiriyle aynı form ve işleve sahip olup farklı tarihte, boyutta ve yapım yöntemiyle inşa edilmiştir (Tablo 1- Satır 9 ve 13). Basınç ve çekme etkisindeki paraboller ayrıştırılarak konstrüksiyon kalınlığı ile birlikte açıklık ve dayanıma etkisi incelenmiştir. Bir parabol dışbükey ise bir kemere benzer ve basınca çalışır, iç bükey olması halinde ise bir zincir eğrisi

Şekil: 11
Eğri ve düz kenarlı hipar kabuklarda yük dağılımı ve mesnet durumları (Çizim: M. E. Akyürek).



gibi çekmeye çalışır. Buradan hareketle şekildeki parabol-1 betonarmenin çekme bölgesini, parabol-2 ve 3 ise basınç bölgesini göstermektedir. Bir kemerin eğriliği arttıkça kemer eksenini takip eden basınç gerilmeleri azalmaktadır. Aynı şekilde bir zincir eğrisinin de derinliği arttıkça eğrinin eksenini takip eden çekme gerilmeleri azalmaktadır. Los Manantiales Restoranı'ndan (1958) tecrübeyle -ki bu yapının basınç bölgesinde aşırı gerilmelerden dolayı zamanla çatlaklar meydana gelmiştir- L'Oceanographic (2002) yapısında basınç eğrilerinin yüksekliğinin artırıldığı, dolayısıyla basınç gerilmelerinin azaltılarak strüktürün dayanım açısından rahatlatıldığı görülmektedir. Parabol-1'in eğriliğinin sabit tutulmasının ışık ve mekân konforuyla ilgili olması muhtemeldir. Betonun bünyesine ilave edilen çelik fiber, kabuğun çekme dayanımını güçlendirmiştir. İki yapı arasındaki 5.5 m'lik açıklık farkı göz önünde bulundurulduğuna kabuktaki 2 cm'lik kalınlık artırımını normal düzeydedir. Esasında tüm çabanın cidarı zarif tutma üzerine geliştiği söylenebilir. Çünkü 35,50 m açıklığa göre 6 cm'lik kalınlık, klasik düzlemsel döşemelere oranla mucizevi düzeydedir.

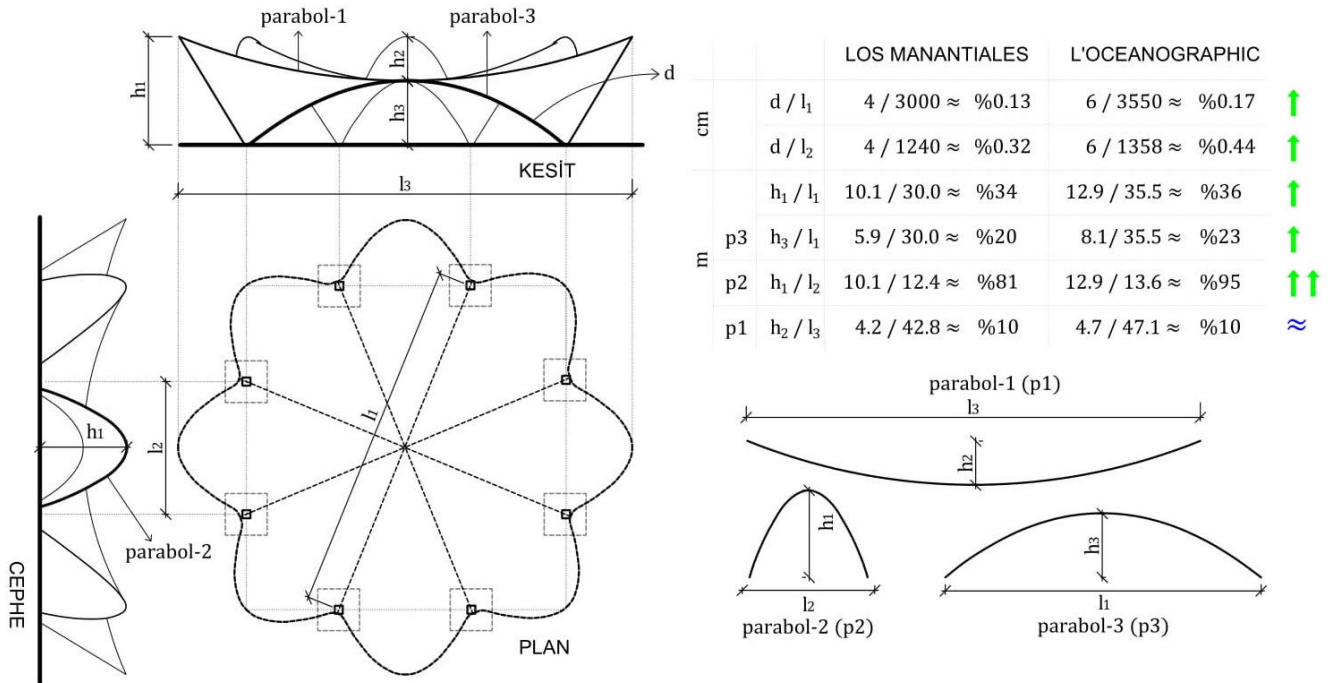
Narin ve ekonomik olmasının yanında betonarme ince kabuk sistemler; genişleme, yağmur, rüzgâr ve deprem gibi nedenlerle zamanla birtakım zararlara uğramaktadır. Karşılaşılan başlıca sorunlar şu şekildedir:

- Yüzeyin eğrisel olmasından dolayı kalıbın yapımı normalden zordur ve kaliteli işçilik gerektirir.
- Yüzeyin eğriliğinin arttığı kısımlar çalışmayı güçleştirdiği için donatı yerleştirmek ve beton dökmek için özel çözümler gerektirir.
- Eğri ve yekpare yüzeyden dolayı yapı kabuğu katmanlarının (yalıtım, kaplama vb.) tasarımı sınırlıdır.
- Yüzeyin büyük, pürüzsüz ve kaplamasız olması halinde akustik sorunlar ortaya çıkarır.
- Kabuğun geniş bir alanın üzerini örtmesi halinde iç mekânda karanlık noktalar ortaya çıkar.
- Kabuk bünyesinde rüzgâr, kar, deprem gibi asimetrik yükler karşısında membran gerilmeleri meydana gelir. Bu sebeple kabukta yorulmalar ve deformasyonlar oluşur.

Bahsedilen sorunlar 20. yüzyılın ortalarında geliştirilen teknoloji ve yapılardan

Şekil: 12

Candela'nın aynı forma sahip iki eseri üzerinden oran-strüktür analizi (Çizim: M. E. Akyürek).



hareketle özetlenmiştir. Öte yandan bir membranın kalıp olarak kullanılması, püskürtme beton kullanımı veya betonu bir kumaş ile güçlendirme gibi; eskiyi daha az ile veya daha kusursuz şekilde üretme çabaları ile günümüzde bu sorunlara çözümler aranmaktadır.

Klasik yöntemle hipar kabuk üretmenin en büyük zorluğu kalıp imalatıdır. Çünkü kalıp elemanları titiz bir işçilikle burulabilmeli ve istenilen biçime göre kurulabilmelidir. Ayrıca, donatı yerleştirilmesi de kalıbın üretimi kadar zahmetlidir. Çünkü biçim, dar alanlarda alışılmışın dışında işçilik gerektirir ve bu da alanda uzmanlığı zorunlu kılmaktadır. Üretimin nispeten kolay olan kısmı shotcrete teknolojisi sayesinde beton dökümüdür. Bu olumlu ve olumsuz değerlendirmeler göz önünde bulundurulduğunda, bir betonarme hipar kabuk imalatının yapım yönetimi hususunda başarılı bir not alması için tasarımcı-müteahhit-işçi koordinasyonunun iyi sağlanması gereklidir. Böyle bir ekip, birkaç tekrarlı üretim ile hız kazanarak hipar strüktürü mimaride bir üslup haline getirebilir.

Üretimdeki verimliliği artırmanın bir yolu da eleman veya sistem düzeyinde pre-fabrikasyondur. Eğer hipar kabuk bir dizi halinde veya çoklu bir kombinasyon ile üretilecekse; kolon, kiriş veya kemer gibi elemanların prekast olması, yapıma hız kazandırır (Tablo 1- Satır 3 ve 4). Kalıp ve iskelelerin sökölüp takılabilir olmasıyla birlikte de malzeme sarfiyatı minimuma indirilebilir.

Betonarme kabuk yapıların ısı, ışık ve akustik konfor şartlarına yönelik seçenekleri oldukça sınırlıdır. Zira yüzeyin eğriliğinden dolayı serilen değil, sürülen tip katmanlar daha uygundur. Doğal ışık hususunda özellikle büyük hacimli kabuklar, karanlık ve işlevlendirilemeyen noktalar oluştururlar. Kabuğun yüzey-etkin bir strüktür olmasından dolayı üzerinde yırtıklar açmak membran durumunu bozar ve dolayısıyla dayanımını zayıflatır. Bunun yanında kabuğun kaburgalı (nervürlü) olması halinde vektör-etkin olur ki bu da yüzeyde boşluklar açmayı mümkün kılar. Doğal ışığı elde etmenin en etkili yollarından biri üniteler arası boşluklar oluşturmaktır (Tablo

1- Satır 5, 10 ve 12). Ancak bu durumda oluşan ışık kaynağı genellikle lineerdir. Nitekim tasarımcıların temel eğilimi cepheleri mümkün olduğu kadar şeffaflaştırmak olmaktadır (Tablo 1- Satır 13).

Bir kablo ağı vektörel bir yük aktarımı sağlar. Bu kablolar betonarme ile desteklenerek aynı zamanda yüzey etkin bir strüktür haline gelir. Böyle bir hibrit sistem; kablo ağı ile desteklenen bir membran üzerine beton dökülmesi, kablo ağına prekast levhaların asılması, kablo ağına prekast kirişlerin asılıp düğüm noktalarının betonlanması şeklinde gerçekleştirilebilir. Bu uygulamalardan her biri yüzeyin bir kabuk haline gelmesini sağlayarak burulmalara karşı ek mukavemet kazandırır ve sistemi uniform hale getirir. Bu yapılarda sistemin rijitliği ve ağırlığından dolayı basınç elemanlarının da betonarme olması tercih edilir. Betonarme çatı yüzeyi, taşıyıcı sistemi takviye etmekle birlikte kullanılan beton geçirimsiz ise kaplama olarak değerlendirilebilir. Nitekim en büyük hacimli hipar yapılar bu şekilde inşa edilmiştir.

Candela'nın Meksiko şehrinde bulunan birçok eseri 1985 yılında gerçekleşen 8,0 büyüklüğündeki depremi atlatmış ve günümüze ulaşmıştır (Tablo 1- Satır 6, 7, 9 ve 10). Bu yapı formu ile inşa edilmiş ve uzun yıllar strüktürel dayanımını muhafaza etmiş birçok yapı bulunmaktadır. Diğer yandan bir tülü veya eteği andıran zarafetteki betonarme hipar kabuklarda sarkma, yüzey üzerinde çatlamlar ve donatıların paslanması gibi sorunlar yaşanmaktadır. Betona, L'Oceanographic örneğindeki gibi çelik fiber veya karbon elyafi gibi çeşitli takviyelerle, kabuğun elastikiyeti artırılmaya ve üzerinde oluşabilecek çatlaklar önlenmeye çalışılmıştır (Tablo 1- Satır 13). Ancak bunlar, betonarme bir yapıya ömür biçme kriterini veren korozyon sorununa çözüm üretmemektedir. Bu soruna yanıt arayan en kayda değer ilerleme lifli polimer kumaşlar ile güçlendirilmiş betonarme (Textile Reinforced Concrete- TRC) teknolojisi ile sağlanmıştır. Bu teknoloji ile yapılan Aachen'deki TRC hipar şemsiye, eskiyi daha az ile üretme ve daha kalıcı kılma yönündeki yeni çalışmalarını hedefleyen bir strüktürdür (Tablo 1- Satır 15).

DÖNEM	NO	GÖRSEL	YAPI ADI	YER	YIL	TASARIMCI (LAR)	STRÜKTÜR TARIFI	STRÜKTÜR MALZEMESİ	AÇIKLIK	STRÜKTÜR KALINLIĞI	KABUK KATMANLARI	KONDISYON	AYIRT EDİCİ ÖZELLİK(LER)	KAYNAK	KISA DEĞERLENDİRME	
ÖNCÜLER	1		Endüstriyel bir atölye	*	1932	Fernand Amond	*	Betonarme kabuk	*	*	**	*	*Karşılaşlan ilk hıpar kabuk *Dörtlü kombinasyon	Espion, 2016	*İlk örnek olma niteliğiyle ilham kaynağıdır *En sık kullanılan hıpar kombinasyonudur.	
	2		Hidrojen işlemleri sığınağı	Cuers-Pierrefeu, Fransa	1936	Fernand Amond	*	Betonarme parabolik kenar kirişleri+ Betonarme kabuk	7x12m (dört ayaklı plan)	3cm	**	*	*Karşılaşlan İlk eğri kenarlı hıpar kabuk *30 ayrı ünite üretimi *Tek kolona mesnetli üniteler	Espion, 2016	*Tipik bir eğri kenarlı hıpar örneğidir *Ortadan tek mesnetli olması niteliğiyle tekrarsız bir denemdir.	
	3		Van Zetti Çelik Fabrikası Sinema/ Tiyatro Salonu	Milan, İtalya	1936	Giorgio Baroni	*	Çelik kolon-kirişler Betonarme kabuk	*	*	**	*	*Hıpar patentinin uygulandığı ilk yapı	Curra ve Russo, 2018	*Zarif kolonlar ile tipik bir düz kenarlı hıpar kabuktur.	
	4		Alfa-Romeo Otomobil Fabrikası Deposu	Milan, İtalya	1937	Giorgio Baroni	Prekast kolon ve kirişler yerleştirildikten sonra doğrusal tahtalardan oluşturulan kalıp üzerine beton dökülür. Daha sonra donatılara artgerme uygulanır.	Prekast kolon-kiriş Betonarme kabuk	*	*	**	*	*Patentin uygulandığı çok tekrarlı hıpar üniteler *İlk prekast eleman kullanımı	Giovanardi, 2015a	*Prekast kolon ve kirişler, çoklu hıpar üretimi için verimli bir zaman ve enerji yönetimi sağlamaktadır. *Birimler arası yatay ışıklık ile betonarme kabukların doğal ışık sorununa çözüm sunmaktadır.	
	5		Endüstriyel bir atölye	Novo Mesto, Çek Cumhuriyeti	1944	Konrad Hruban	Prekast kolon ve kirişler yerleştirildikten sonra doğrusal tahtalardan oluşturulan kalıp üzerine beton dökülür.	Prekast kolon-kiriş+ Betonarme kabuk	12m	5-6,5cm	**	*	*İlk şemsiye biçimli kabuk *Standart elemanlarla çoklu üretim	Hruban, 1963	*Prekast kolon ve kirişler, çoklu hıpar üretimi için verimli bir zaman ve enerji yönetimi sağlamaktadır. *Birimler arası yatay ışıklık ile betonarme kabukların doğal ışık sorununa çözüm sunmaktadır.	
GELİŞME / ZİRVE	6		Kozmik İşinlar Laboratuvarı	Meksiko, Meksika	1951	Felix Candela	Betonarme ayaklar yapıldıktan sonra doğrusal tahtalardan oluşturulan kalıp üzerine beton dökülür.	Betonarme kemerli ayak+ Betonarme kabuk	10,75m (kabuk) +8m (kemer)	1,6cm	**	Sağlam	*Candela'nın ilk hıpar kabuk tasarımı *En ince kabuk (1,6cm)	Faber, 1963; Gerçek, 1979	*Kabuk alt sınırına yönelik bir ölçüt belirlemesine karşın donatım paslanma olasılığı oldukça yüksektir.	
	7		Milagrosa Kilisesi	Meksiko, Meksika	1955	Felix Candela	Doğrusal tahtalardan oluşturulan kalıp üzerine beton dökülür.	Betonarme kabuk	11m	-4cm	**	Sağlam/ Kullanılmakta	*Farklı boyutlarda hıpar kabuk kombinasyonu *Asimetrik kolonlar	Faber, 1963; Prkic, 2017	*Gotik mimari çağırışı ve planda okunan haç biçimi ile mimari; şemsiye biçiminin evrimisiyle oluşturulan çok yüzeyli kabuk ile strüktürel gerekliler sağlanmıştır.	
	8		Lomas de Cuernavaca Şapeli	Cuernavaca, Meksika	1958	Felix Candela	Doğrusal tahtalardan oluşturulan kalıp üzerine beton dökülür.	Betonarme kabuk	18-31m	4-52cm (kalinlık farkı iki tarafı dengelemek için)	**	Sağlam/ Kullanılmakta	*Yüzey etkin strüktür (kolon yok)	Draper ve diğerleri, 2008; Prkic, 2017	*Asimetrik yüzey ile iddialı bir formdur.	
	9		Los Manantiales Restoranı	Meksiko, Meksika	1958	Felix Candela	Doğrusal tahtalardan oluşturulan kalıp üzerine beton dökülür.	Betonarme kabuk	*30m (Çap) *12,4m (iki komşu ayak arası)	-4cm (en alt nokta)	BA kabuk+ Siyah katran+ Beyaz çakıl	Hasarlı	*Candela'nın en önemli gördüğü yapısı *Eğri kenarlı 4 hıpar kesijimi	Burger ve Billington, 2006; URL-5	*Panoramik manzara ve biçim kombinasyonu ile mimari; çok noktadan mesnetli geniş açıklıklı kabuk ile strüktürel gerekliler sağlanmıştır.	
	10		Bacardi Rom Fabrikası	Meksiko, Meksika	1960	Felix Candela	Doğrusal tahtalardan oluşturulan kalıp üzerine beton dökülür.	Betonarme kabuk	30m	-4cm (en alt nokta)	**	Sağlam/ Kullanılmakta	*İki eğri kenarlı hıpar kesijiminden oluşan üniteler	Garlock ve Billington, 2009; Giovanardi, 2015b	*Tek mekân olarak eğri kenarlı hıpar kombinasyonu üretilen ünite *Hacmine göre oldukça ince bir cidar kullanılmıştır.	
	11		Modern Miami Marine Stadyumu	Miami, Florida, ABD	1962	Hilario Candela (mimar) +Jack Meyer (mühendis)	Bir iskele platformu oluşturulur. Üzerine arka kiriş ve tali kirişlerle desteklenen kontplak levhalar konur. Donatı yerleştirilir ve beton dökülür.	Betonarme kolonlar ve galvanize çelik donatılı betonarme kabuk	*20,2m (Çap) *10,5m (iki arka açıklık)	7,6-24cm	**	Hasarlı	*20,20m konsol *Tek noktadan mesnetli üç ayak	Adriaenssens ve diğerleri, 2014	*Konsol, heyecan verici olmakla birlikte işlevseldir. Öte yandan açıklığın oldukça fazla olması yıllara bağlı sarkma ve çökme riskini ortaya koymaktadır.	
	12		St. Mary Katedrali	Tokyo, Japonya	1964	Kenzo Tange	*	Betonarme kabuk	-40x55m (plan)	*	BA kabuk+ çelik çerçeve arasına alüminyum galvanizli levha	Sağlam/ Kullanılmakta	*Kaplama *Yüksek	URL-6; URL-7	*Yüksekliğin üç avantajı vardır: 1. Çatı bir duvara döndürüş 2. Işıklık alanı genişler 3. Strüktürün dayanımı artar.	
	ÇAĞDAŞ UYGULAMALAR	13		L'Oceanographic Restoranı	Valensiya, İspanya	2000	Felix Candela	Ahşap levhalardan oluşan kalıp üzerine donatı yerleştirilip beton püskürtülür.	Çelik fiber takviyeli betonarme kabuk	*35,50m (Çap) *13,58m (iki komşu ayak arası)	6cm	**	Sağlam/ Kullanılmakta	*Çelik fiber takviyesi *Püskürtme beton	Domingo ve diğerleri, 2004; Prkic, 2017	*Tülli andran zarif örtü *Betonarme kabuğunun büyük teknik sorununa çözüm aramıştır.
		14		Lincoln Sahne Sanatları Merkezi Restoranı	New York, ABD	2000	Diller Scofidio+ Renfro+ FXFOWLE	Çelik bir çerçeve ile taşınan çelik levha üzerine donatılar yerleştirilir ve beton dökülür.	Çelik ana strüktür+ betonarme kabuk	*	*	Çelik levha+ betonarme+ toprak+çim	Sağlam/ Kullanılmakta	*Yeşil çatı *Çelik strüktür+ betonarme kabuk	URL-8; URL-9	*İç mekân kullanımının verimliliğine karşın çatı alanı elde edilmiştir.
		15		TRC kabuk şemsiye	Aachen, Almanya	2001	Scholzen ve diğerleri	Membran kalıp üzerine çok katmanlı halde beton püskürtülüp dokuma yerleştirilir.	Prekast kolon+lifti polimer kumaş +beton	*3,5m konsol *7x7m plan	6cm	12 tekrarlı yaklaşık 5'er cm beton+lifti polimer kumaş	Sağlam	*Beton güçlendirme elemanı çelik yerine kumaş	Scholzen ve diğerleri, 2015	*Paslanma sorunu ortadan kalkmaktadır *Betonarme kabuk sorunlarını büyük ölçüde çözümlenmekle birlikte iddialı bir açıklıkta gelecek vadedilmektedir.

* Bilinmiyor **Muhtemel kaplamalar: Rijit su yalıtımı/asbest/asfalt/metal boya

Tablo: 1
Betonarme hıpar kabukların tarihi gelişimi.

Bu bölümde bahsedilen betonarme hipar kabuk uygulamaları öncüler, gelişme/ zirve ve çağdaş uygulamalar başlıkları altında, alandaki diğer önemli örnekler ile kronolojik olarak sıralanarak, yapım sorunları, yapım tekniği ve kolaylığı, geçilen açıklık, strüktür malzemesi ve kalınlığı gibi ayırt edici özellikler içeren bir tabloda özetlenmiştir (Tablo 1). Tablo 1’de özetlenen tarihsel gelişim sürecinde betonarme hipar kabukların tasarım, strüktür ve malzeme alanlarındaki değişimi kısa değerlendirme başlığı altında sunulmuştur. Tablo 1’in tasarımcıya betonarme hipar kabuklar ile ilgili seçeneklerini görmesi ve tercih nedenini belirlemesi adına katkı sağlaması hedeflenmektedir.

6. Tartışma ve Sonuç

Hipar, betonarme ince kabuk strüktür teknolojisinin yaygınlaştığı bir dönemde, Aimond, Baroni, ve Hruban öncülüğünde gelişmiş ve Felix Candela ile birlikte klasik yöntem üretimde zirveye ulaşmıştır. Çift eğriliği nedeniyle sağlamış olduğu strüktürel etkinlik, yapım için gereken malzeme miktarının az olması ve estetik beğeni toplaması gerekçeleriyle 20. yüzyılın çokça uygulanan biçim örneklerinden olmuştur. Yüzeyin her noktasında basınç ve çekme gerilmelerinin karşılanması geniş açıklıklı yapıların bu yöntemle uygulanabilirliğini de mümkün kılmıştır. Bunun yanında eğri kenarlı ve düz kenarlı hiperbolik parabolitlerin çeşitli boyut ve biçimlerde birbirine eklenebilmesi, farklı noktalarından mesnetlenebilmesi ve konsol çalıştırılabilmesi ile mimari tasarımda yenilik ve çeşitlilikler de sağlamıştır.

Hipar bir “ince kabuk strüktür” olmaktan ziyade geometrik bir formdur. Formun ilk olarak ince kabuk strüktür olarak uygulanması nedeniyle literatürde bu şekilde tanımlanmıştır. Gelişen yapım teknolojisi ile birlikte hiparın kullanım alanı yaygınlaşmıştır. Hiparı tercih nedeni onun strüktürel etkinliği ve heyecan verici formudur. Bu nedenle hiparın kullanımı; ahşap kabuk, ızgara kabuk ve kablo ağı strüktürler gibi diğer taşıyıcı sistemlerin kapsamında da aranmalıdır.

Betonarme kabukların zaman içinde çatlaması, donatılarının paslanması ve üretim

zorluğu gibi nedenler, araştırmacıları yeni teknikler kullanmaya yönlendirmiştir. Membranın kalıp olarak kullanılması, püskürtme beton kullanımı veya betonun lifli bir kumaş ile güçlendirilmesi denenmiştir. Bununla birlikte bu çalışmalar genel bir kabul görmemiştir. Tekdüzeleşmiş betonarme binalarla çevremizin çirkinleştiği algısının yaygınlaştığı günümüz Türkiye’inde bahsi geçen yeni yöntemlerle yapılacak denemelerin, betonarme ve günümüz yapı sanatı imajına değer kazandıracağı düşünülmektedir. Çalışmanın, bu düşüncenin hayata geçirilebilmesi için gerekli görülen bilimsel alandaki yerli literatür açığının giderilmesine katkı sağlayacağına inanılmaktadır ●

Kaynakça

- Adriaenssens, S., Brown, N., Lowinger, R. ve Hernandez, J. (2014). Structural Analysis of Reinforced Concrete Folded Hyperbolic Paraboloid: A Case Study of the Modern Miami Marine Stadium. *International Journal of Architectural Heritage*, 8 (4), 498-516. DOI: 10.1080/15583058.2012.694967
- Aka, İ., Keskinel, F., Çılı, F. ve Çelik, O. C. (2001). *Betonarme: Betonarmeye Giriş, Betonarme Yapı Elemanları, Betonarme Taşıyıcı Sistemler*. İstanbul: Birsen Yayınevi. ISBN: 978-975-511-283-9
- Akyürek, M.E. (2020). *Hiperbolik Paraboloidlerin Yapı Endüstrisindeki Yeri*. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul.
- Billington, D.P. (1983). *The Tower and Bridge: The New Art of Structural Engineering*. Princeton: Princeton University Press. ISBN: 9780691023939
- Block, P. (2016). Parametricism's Structural Congeniality. *Architectural Design*, 86(2), 68-75. DOI: 10.1002/ad.2026
- Bruun, E.P. G. (2014). Robert Maillart: The Evolution of Reinforced Concrete Bridge Forms. *9th International Conference on Short and Medium Span Bridges*. Kanada, Alberta, Calgary, 15-18 Temmuz.
- Burger, N. & Billington, D. P. (2006). Felix Candela, Elegance and Endurance: an Examination of the Xochimilco Shell. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*, 152, 271-278.
- Candela, F. (1964). Understanding the Hyperbolic Paraboloid. In R.E. Fischer (Ed.), *Architectural Engineering: New Structures* (1nd ed., Vol. 1, pp.45-49). New York: McGraw-Hill. ISBN: 978-0070210745
- Candela, F., Madsen, G. ve Biggs, D. (1966). *Hiperbolik Paraboloid Kabuklar* (M. Yorulmaz & H. Karatas, Çev.). İstanbul, İnşaat Mühendisleri Odası Yayınları, 12.
- Cassinello, P. (2016). *Fundacion Eduardo Torroja*. Madrid, Dayton S.A. ISBN: 978-84-941820-2-0
- Chilton, J. C. (2011). Eminent Structural Engineer: Prof. Dr Heinz Isler (1926-2009). *Structural Engineering International*, 21(1), 124-126. DOI: 10.2749/101686611X12910257102875
- Corres, H. & Leon, J. (2012). Eminent Structural Engineer: Eduardo Torroja (1899-1961). *Structural Engineering International*, 22(4), 581-584. DOI: 10.2749/101686612X13363929517938
- Curra E. & Russo, M. (2018). Reinforced Concrete in Italy Through the Works of Two Generations of Engineers: Mario and Giorgio Baroni. *6th International Congress on Construction History (6ICCH 2018): "Building Knowledge, Constructing Histories"*. Belçika, Brüksel, 9-13 Temmuz.
- Draper, P., Garlock, M. E. M. ve Billington, D. P. (2008). Finite-Element Analysis of Felix Candela's Chapel of Lomas de Cuernacava. *Journal of Architectural Engineering*, 14 (2), 47-52. DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0431(2008)14:2(47)
- Domingo, A., Lazaro, C. ve Serna, P. (2004). Construction of Jchypar, a Steel Fiber Reinforced Concrete Thin Shell Structure. *6th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, Varenna, Italy: 20-22 Ekim, 1143-1152.
- Espion, B. (2016). Pioneering Hypar Thin Shell Concrete Roofs in the 1930s. *Beton- Und Stahlbetonbau*, 111(3), 159-165. DOI: 10.1002/best.201600001
- Faber, C. (1963). *Candela: The Shell Builder*. London: The Architectural Press.
- Garlock, M. E. M., & Billington, D. P. (2009). Felix Candela's Legacy. *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*, Valensiya, İspanya: 28 Ekim- 2 Kasım.
- Gerçek, C. (1979). *Yapıda Taşıyıcı Sistemler*. Ankara: Yaprak Kitapevi.
- Giedion, S. (1959). *Space, Time and Architecture*. Cambridge: Harvard University Press.
- Giovannardi, F. (2015a). Felix Candela Construttore di Sogni-2: Intorno a Candela. *Accademia*. Erişim: 10 Aralık 2020, https://www.academia.edu/33668203/F%C3%A9lix_Candela_Vol_2
- Giovannardi, F. (2015b). Felix Candela Construttore di Sogni-3: Immagini. *Accademia*. Erişim: 10 Aralık 2020, https://www.academia.edu/37197186/F%C3%A9lix_Candela_Vol_3_Images
- Gürdal, E. (t.y.). *Yapı Malzemeleri-I*. Yayınlanmamış ders kitabı.
- Hruban, K. (1963). Some Recent Shell Structure. *Architectural Science Review*, 6(2), 44-49.
- Isler, H. (1994). Concrete Shells Derived From Experimental Shapes. *Structural Engineering International*, 4(3), 142-147.
- Koçyiğit, K. (1997). *Betonarme Kabuk Yapılar Tarihi Gelişimi ve Geleceği* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Lee, J. & Garlock, M. E. M. (2009). Eladio Dieste and Felix Candela: a Comparative Analysis. *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*, Valensiya, İspanya: 28 Eylül-2 Ekim, 1562-1573.
- Lori, T. & Poretti, S. (2019). Pier Luigi Nervi: an engineer, an architect and a builder. *Informes de la Construcción*. 71(553): e282.
- Martin, L.M. (2011). *Cubierta de Acceso al Oceanografic*. Erişim: 07 Ocak 2021, <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12167/PFG%20LETICIA%20MARTINEZ.pdf?sequence=1>.
- Miller, M. (2018). AD Classics: Los Manantiales / Felix Candela. *Archdaily*. Erişim: 07 Ocak 2020, <https://www.archdaily.com/496202/ad-classics-los-manantiales-felix-candela/>
- Mörsch, E. (1909). *Concrete-Steel Construction* (Çev. E. P. Goodrich). New York: The Engineering News Publishing Company.
- Nervi P. L. (1964). A Philosophy of Structural Design. In R.E. Fischer (Ed.), *Architectural Engineering: New Structures* (C1, ss.205-212). New York: McGraw-Hill. ISBN: 978-0070210745
- Nervi, P.L. (1966). *Aesthetics and Technology in Building* (R. Einaudi, Çev.). Londra: Oxford University Press. ISBN: 978-0674007017
- Ökten, S. (1995). *Yapı Mühendisliği ve Sanayi Devrimi*. K.Y. Aren, İ. A. Yüksel, Ö. Ergiydiren (Ed.), *Ekrem Hakkı Ayverdi Hâtıra Kitabı içinde* (120-143 ss.), İstanbul: İstanbul Fethi Cemiyeti Yayınları.
- Pedreschi, R. (2008). Form, Force and Structure: A Brief History. *Architectural Design*, 78(2), 12-19. DOI: 10.1002/ad.636
- Prkic, L. (2017). Magnificent Hyperbolic Paraboloid.

- BeBee*. Erişim: 07 Ocak 2021, <https://www.bebee.com/producer/@lada-prkic/magnificent-hyperbolic-paraboloid>
- Shaeffer, R. (2008). The Life and Works of Eero Saarinen. *Structures Congress 2008*, Vancouver, Kanada: 27-26 Nisan. DOI: 10.1061/41016(314)166
- Scholzen, A., Chudoba, R. ve Hegger, J. (2015). Thin-walled Shell Structures Made of Textile-Reinforced Concrete. *Structural Concrete*, 16(1), 106-114. DOI: 10.1002/suco.201300071
- Silman, R. (2011). Eminent Structural Engineer: Anton Tedesko (1903-1994). *Structural Engineering International*, 21 (2), 241-243. DOI: 10.2749/101686611X13022679604145
- Steiger, R.W. (1995). *The History of Concrete*. The Aberdeen Group. Erişim: 07 Ocak 2021, https://web.archive.org/web/20150528183822/http://www.theconcreteproducer.com/Images/The%20History%20of%20Concrete%2C%20Part%202_tcm77-1306954.pdf
- Strasky, J., Juchelkova, P., Kalab, P., Necas, R. (2017). Roofs of Prestressed Concrete Membranes. *Structural Concrete: Journal of the fib*, 18(1), 5-18. DOI: 10.1002/suco.201600037
- Tomas, A. & Marti-Montrull, P. (2010). Optimality of Candela's Concrete Shells: a Study of His Posthumous Design. *International Association for Shell and Spatial Structures (J. IASS)*, 51 (1), 67-77.
- Veenendaal, D. & Block, P. (2014). Design Process for Prototype Concrete Shells Using a Hybrid Cable-net and Fabric Formwork. *Engineering Structures*, 75, 39-50. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.05.036
- Vitruvius (2017). *Mimarlık Üzerine* (Çev. Çiğdem Dürüşken). İstanbul: Alfa Basım Yayın. ISBN: 9786051714431
- URL-1: <<https://brewminate.com/engineering-the-pantheon-architectural-construction-structural-analysis/>>, erişim tarihi 07.01.2021.
- URL-2: <<https://www.britannica.com/technology/construction/Early-steel-frame-high-rises#ref105155>>, erişim tarihi 07.01.2021.
- URL-3: <<https://www.oceanographic.org/en/what-is-oceanographic/>>, erişim tarihi 07.01.2021.
- URL-4: <<https://structurae.net/en/>>, erişim tarihi 07.01.2021.
- URL-5: <<https://structurae.net/en/persons/felix-candela>>, erişim tarihi 07.01.2021.
- URL-6: <<https://en.wikiarquitectura.com/building/saint-marys-cathedral-of-tokyo/>>, erişim tarihi 07.01.2021.
- URL-7: <<http://archeyes.com/st-marys-cathedral-in-tokyo-kenzo-tange/>>, erişim tarihi 07.01.2021.
- URL-8: <<https://www.archdaily.com/94493/hypar-pavilion-diller-scofidio-renfro-with-foxfowle>>, erişim tarihi 07.01.2021.
- URL-9: <<https://www.arup.com/projects/lincoln-center-pavilion>>, erişim tarihi 07.01.2021.