

# Yüzyıllık Betonarme

## Kabuk Strüktürler:

### Lennusadam Hangar Yapısı Örneği

Betonarmenin erken tarihi hala ilginçliğini ve bazı bilinmezliklerini sürdürüyor. Estonya'daki bu erken betonarme kabuk strüktür de bu bilinmezlerden biri. Öncü örnekler arasında sayılması gerekiyor.



1 Lennusadam (Seaplane Harbour) Hangar Yapısı, Tallinn, Estonya (Estonian Maritime Museum'un izniyle).

2 Lennusadam Hangar Yapısı, Havadan görünüm (KOKO architects'in izniyle).

3 Hangar yapısının inşası son aşamasında (Fotoğraf: Christiani & Nielsen. Kaynak: "Twenty Five Years of Civil Engineering, 1904-1929", Katalog. Estonian Maritime Museum'un izniyle).

4 Christiani & Nielsen'in yarışmayı kazanan projesine ait çizimler (Estonian Maritime Museum'un izniyle).

*Mimarın adı yok derler, ancak mühendisin adı hiç yok...*

**Oğuz Cem Çelik** ■ Kuşkusuz kabuk strüktürler büyük açıklıkların geçilmesinde uzun zamandır kullanılan en etkin sistemlerden biri olmuştur. "Yapısal etkinlik" faydalı (ek) yükün yapı özağırlığına oranı olarak tanımlanırsa, kabuklar üçboyutlu davranış sonucu verimlilik bakımından en üst sıralarda yer almaktadır. Gerçekten de tarihi yapılar incelendiğinde (örneğin Ayasofya,

Pantheon, Süleymaniye Camisi, Selimiye Camisi vb.) yığma kargir birimlerle (tuğla, taş ya da karma) büyük açıklıkların geçildiği dinsel mekanlarda kemerlerden ve kabuklardan yararlanıldığı görülmektedir. Zaman içinde deprem vb. nedenlerle kısmen sorun yaşasalar da kabukların kullanıldığı pek çok yapı günümüze dek ulaşmıştır. Diğer türden kabukların kullanılması yanında çoğunlukla dönel simetrik küresel kabukların (ya da kubbelerin) önplana çıktığı görülmektedir.

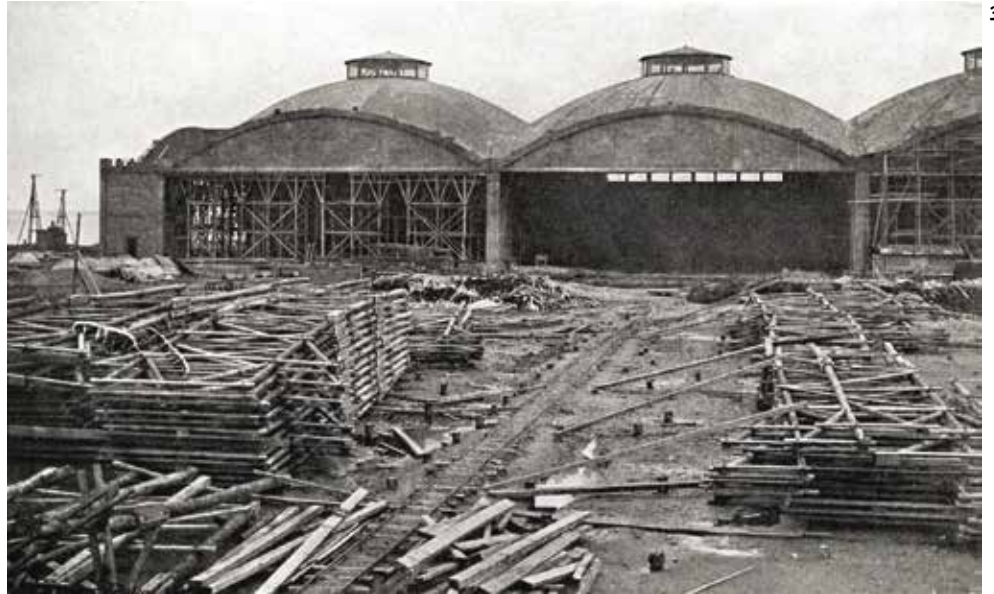
Betonarmenin yapılarda ilk kullanımından kısa süre sonra, kalıp teknolojisinin gelişimine de koşut olarak, özellikle 2. Dünya Savaşı'ndan sonra betonarme kabukların kullanımı artmıştır. Mimari projeye uygun çözümler sunması nedeniyle spor salonları, uçak hangarları, havalimanı binaları gibi yapıların yanında su kuleleri, silolar, soğutma kuleleri, tüneller, tanklar gibi diğer mühendislik yapılarında da geniş uygulama olanağı bulmuşlardır. Taşınma sorunları nedeniyle açıklıkları sınırlı olan önüretimli (prefabriğe) yapılarda da kabuk bileşenlerden yararlanıldığı bilinmektedir.

İlk uygulamalarda yapısal davranışın karmaşıklığı nedeniyle çekincelerin ortaya çıkması, gereğinden daha kalın cidarlı ve aşırı donatılı betonarme kabukların tasarlanması ile sonuçlanmıştır. Gerçekte kabuklar, taşıma kapasitelerini, kullanılan malzeme ya da çelik donatıdan çok geometrik özelliklerinden almaktadırlar. Bununla birlikte, şüphesiz çevresel mesnetlenme koşulları da kabuk geometrisi ne kadar güçlü olursa olsun ihmal edilemeyecek düzeyde taşıma gücünü ve tümsel davranışı etkilemektedir. İnce kabukların tekil/noktasal yüklerle karşı zaıfıllıkları bilinmektedir. Kabuk teorisindeki gelişim, uluslararası düzeyde yapılan kuramsal ve deneysel çalışmalar, kabukların her türlü yük altındaki gerçek kapasitelerinin büyük doğrulukla belirlenmesi sonucunu doğurmuştur. Bu alanda öncü kuramsal çalışmalar Philip G. Hodge (ABD), William Prager (ABD), Daniel C. Drucker (ABD), Antoni Sawczuk (Polonya) ve Emin Turan Onat (ABD) tarafından yapılmıştır. 1950-70 yılları arasındaki yoğun kullanım, deneyimlerin artması ve daha ekonomik kabuk tasarımlarının ortaya çıkması ile sonuçlanmıştır. Daha ince kabuk ile daha büyük açıklıkların geçilmesi (açıklık/kalınlık oranı büyük) pek çok mimar ve mühendisin ilgisini çekmiştir. Ancak, yük aktarma biçiminde kabuk yüzeyinde ortaya çıkan basınç etkileri kabuk inceldikçe sorunlu hale gelmekte, hatta kabuk stabilite yetersizliği nedeniyle göçebilmektedir. Başka bir deyişle, geçilen açıklığa göre inceliği belirleyen çoğu zaman donatı detaylandırması, beton dökümü ve daha da önemlisi burkulma sorunlarıdır<sup>1</sup>.

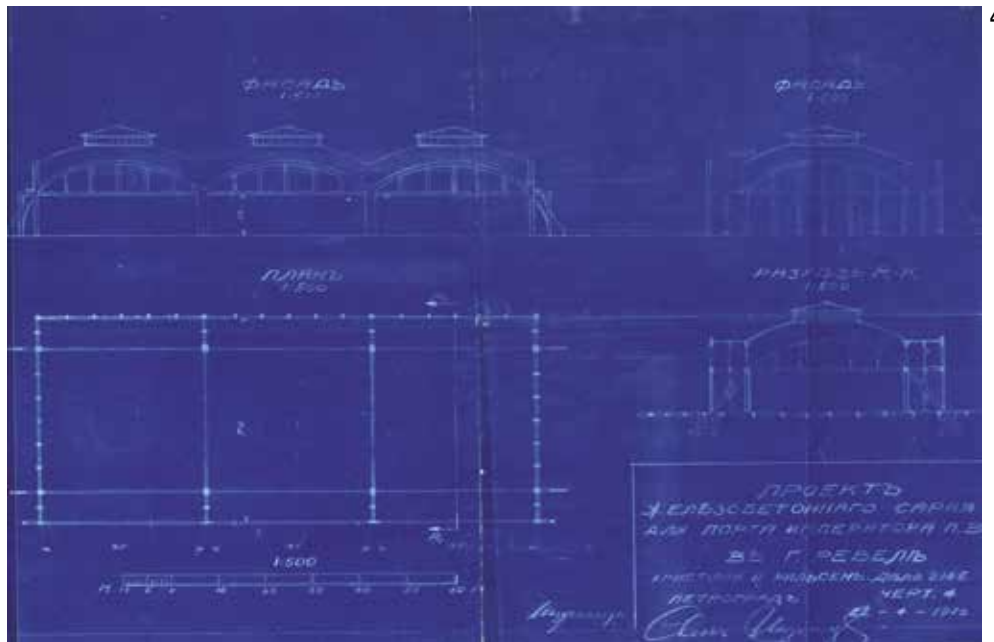
Kabuk strüktür tasarımında öne çıkanlar arasında Pier Luigi Nervi, Felix Candela, Eduardo Torroja ve Eero Saarinen sayılabilir. Avrupa ve Amerika kıtalarında önemli örnekler değişik kabuk türlerinde yapılmıştır. Kabuk strüktürlerde farklı nedenlerle meydana gelen yerel ya da tümsel göçmeler ile kalıp maliyetlerindeki



2



3



4



5



6



7

artışlar ne yazık ki ilerlemeyi durdurmuş, günümüzde ise neredeyse yok denilebilecek bir noktaya getirmiştir. Türkiye’de ise Ankara’daki şanssız bir uygulamanın (Ankara Kapalı Spor Salonu) 2 Haziran 1958’de göçmesi ile gelişim, bazı standart uygulamalar dışında, tamamen durmuştur<sup>2</sup>.

Dünyada değişik bölgelerde kabuk yapılar tasarlanırken çoğu zaman gözden kaçan Sovyet-Rusya ve etkisindeki ülkelerde kabuk strüktürler uygulama alanı bulmaktaydı. Bu yazı kapsamında, 1916-17’ye tarihlenen ve Danimarkalı firma Christiani & Nielsen tarafından tasarımı ve yapımı gerçekleştirilen, Estonya’nın Tallinn şehrinde yer alan Lennusadam (Seaplane Harbour) Hangar Yapısı ele alınacaktır. Yapı uzun süre kullanılmamış, 2009’da açılan bir yarışma sonucu 2012’de müze olarak yeniden işlevlendirilerek kullanıma açılmıştır. Yapının özelliği yalnızca Estonya’da değil, betonarme kabuk strüktürler içinde o yıllarda Avrupa’da hatta dünyadaki en cesur geometrik özelliklere sahip, öncü örneklerden biri olmasıdır.

### Lennusadam Hangar Binası yapısal sistemi

Estonya’nın erken betonarme yapılarından biri ve en önemlisi olan Lennusadam Hangar Yapısı planda düzgün dikdörtgen bir alanı örtmektedir. Plan ölçüleri 36,4x36,4 m olan üç adet kare mekanın birleşimi ile tek bir kapalı alan elde edilmiştir<sup>3</sup>. Uçak hangarı olarak kullanılacağından her bir karesel planın üstü betonarme ince kabuklarla geçilmiş, bunlara yedi adet kısa silindirik kabuklar eklenerek yapı örtülmüştür. Yapının köşelerinde 6,8x6,8 m plan ölçülerinde iki katlı betonarme kolon ve kirişlerden oluşan kuleler yer almaktadır. Böylece, iç mekanda 36,4x116 m’lik alan kolonsuz olarak geçilebilmiştir. Yapıda, çevrede oluşturulan 24 adet betonarme kolon ve özellikle kabuklardan gelen itkileri karşılamak üzere düzenlenen 12 adet eğik betonarme eleman vardır. Uygun olmayan zemin özellikleri nedeniyle üst yapıdan gelen etkiler, kolonlar aracılığı ile kazıklı temellere aktarılmaktadır. Tallinn’de deprem etkilerinin bulunmaması nedeniyle yapının tasarımında ağırlıklı olarak düşey yükler, ikincil etki olarak rüzgar basınçları dikkate alınmıştır.

Üçte bir ana mekanları örten ana strüktür, betonarme küresel kabuk şeklinde tasarlanmış, peşpeşe tekrarlanan üç küresel kabuk ile mekan örtülmüştür. İç mekanda zeminden itibaren maksimum yükseklik



8

( $h_{max}$ ) 22 m alınmış, uçlarda ise bu değer ( $h_{min}$ ) 10 m'ye kadar düşürülmüştür. Silindirik kabuk olan bölümlerde ise maksimum yükseklik ( $h_{max}$ ) 16,0 m'dir. Küresel kabuklarda ( $h_{max}$ ) 12 m, kenar silindirik kabuklarda ise ( $h_{max}$ ) 6 m'dir. Her iki türden kabukların da açıklıkları (L) 30,6 m'dir. Kabuk kalınlıkları mesnet bölgelerinde ( $t_m$ ) 15 cm, açıklık ortasında ise ( $t_o$ ) 8 cm alınmıştır; başka bir deyişle, kabuk kalınlığı açıklık boyunca değişkendir. Köşelerde geçiş bölümlerinde kalınlıklar yerel olarak daha da artmaktadır. Küresel kabukların orta bölümlerinde, tepede 10 m çapında çatı feneri yer almaktadır; çatı fenerinin çevresinde 25x25 cm enkesit ölçülerinde bir betonarme basınç çemberi tasarlanmıştır. Yapının özgün hesaplarına arşivlerde ulaşılmış olup kaynaklarda ince kabuk teorisi ile hesapların yapıldığı, basitleştirici pek çok varsayımın dikkate alındığı belirtilmektedir. Hatta, kesin olmamakla birlikte, membran (zar) teorisinin tasarımıda kullanıldığı ilk kabuk strüktürün Lennusadam yapısı olduğu düşünülmektedir.

Yapının gerçekte iki aşamalı bir yarışma projesi ile gündeme geldiği bilinmektedir. Programda mimari özelliklerin yanısıra beton dayanımının 150kg/cm<sup>2</sup> olması öngörülmüştür. Yapıda gerçekleşen beton dayanımı ise 129~280kg/cm<sup>2</sup> aralığında ölçülmüştür; yapım yılı ve o yıllardaki beton teknolojisi düşünüldüğünde oldukça başarılı dayanımların elde edildiği söylenebilir.

Altı yarışmacının ikinci aşamaya geçtiği, bunlardan Christiani & Nielsen



9

tarafından önerilen çözümün beklenen mimari fonksiyonu en ekonomik şekilde sağlaması nedeniyle benimsendiği belirtilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken bir nokta, o döneme göre bu kadar etkin bir strüktür çözümünü öneren mühendisin isminin projeler üzerinde yer almamasıdır. Tahminler olmakla birlikte fikrin kime ait olduğu bilinmemektedir. Bir diğer konu da, ilk önemli ölçülerdeki betonarme kabuk strüktürün Almanya, Jena'daki planetaryum (1924) olduğu pek çok kaynakta belirtilmekte, daha önce inşa edilen Lennusadam yapısından ise hiç söz edilmemektedir.

Yapı zaman içinde, kullanılmaması nedeniyle bakımsızlıktan kaynaklanan sorunları barındırmıştır. Özellikle, yalıtım sorunları yapıyı yıpratmış, zamanla bazı önlemler alınsa da sorun tam olarak çözülememiştir. Yapılan incelemelerde strüktürel çatlakların da ilerlediği görüldüğünden çatlak onarımları güncel

**5-6 Yapının restorasyon öncesi durumu, 2006 ve 2010 (Estonian Maritime Museum'un izniyle).**

**7 Yenileme projesinin uygulama sürecinde şantiyeden görünüm, 2011 (KOKO architects'in izniyle).**

**8-9 Yenileme projesinin tamamlanması ardından ziyarete açılan yapı, 2012 (KOKO architects'in izniyle).**

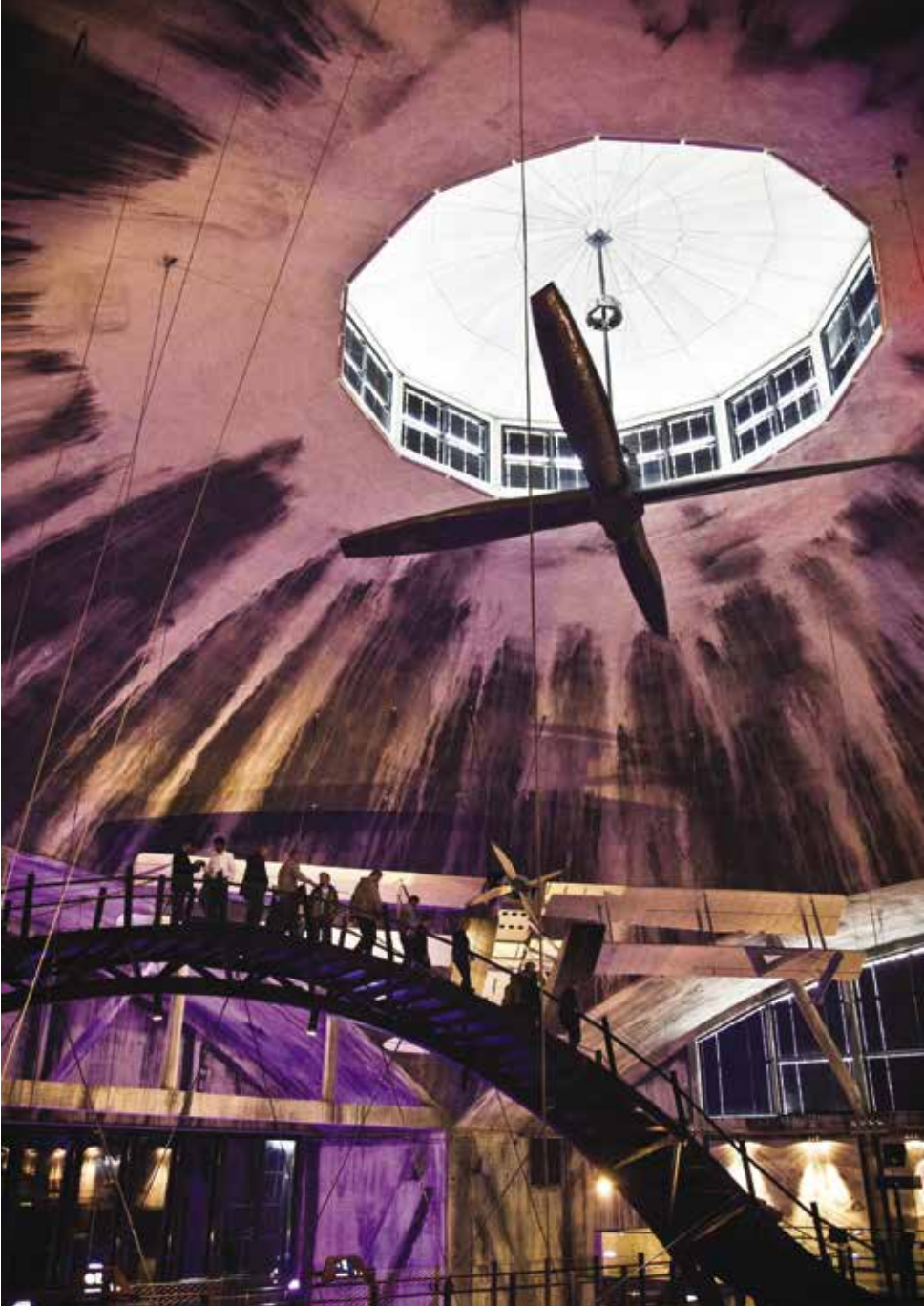
malzeme ve tekniklerle (dikiş, epoksi enjeksiyonu) yapılmıştır. 2000'lerde ise Denizcilik Müzesi olarak yeniden kullanım (*re-use*) gündeme gelmiş ve yapısal sorunlar bir iyileştirme programı çerçevesinde ele alınmıştır. Yeniden kullanım projeleri, 2009'da açılan yarışmada 1. ödülü alan KOKO architects tarafından yapılmıştır<sup>4</sup>.

Yapıdaki betonarme kabuklarda, özelliklerindeki bozulmalar nedeniyle, önerilen en önemli yapısal müdahale iç yüzeyden ince bir püskürtme beton (*shotcrete*) tabakası ile güçlendirilmesi olmuştur. Özgün durumda uçak hangarı olarak tasarlanan yapının denizcilik müzesi



10

11



10-12 Hangar yapısı içinde sergileme alanı ve kafeden görünüm (Estonian Maritime Museum'un izniyle).

işleviyle dönüştürülmesinde özellikle iklimlendirme konusunda zorluklar yaşanmıştır.

### Sonuç

Lennusadam Hangar kabuk strüktürünün yalnızca Estonya'da ya da Avrupa'da değil, dünya betonarme yapılarının en önemlileri arasında yer aldığı açıktır. Bir yarışma ile seçilen projenin seçim ölçütlerinden öne çıkanlar ekonomiklik ve mimari işlevi sağlaması olmuştur. Basit hesaplarla tasarlanan ilk kabuk strüktür olma özelliğini taşımaktadır. Uzun süre bakımsızlıktan kaynaklanan bozulmalar dışında tasarımdan kaynaklanan yapısal bir sorunu bulunmayan yapı, KOKO architects tarafından yapılan başarılı restorasyon ile güvenlik düzeyini kaybetmeden günümüze dek ulaşmıştır. Denizcilik Müzesi işleviyle 2012 yılından itibaren kullanılmakta, Tallinn'i ziyaret eden tüm mimar ve mühendislerin özellikle ilgisini çekmektedir.

Özgün sistemde, tahminler olmakla birlikte, fikrin hangi mühendise ait olduğu ne yazık ki bilinmemektedir.

■ Oğuz Cem Çelik, ITÜ Mimarlık Fakültesi, Yapı ve Deprem Mühendisliği Birimi.

### Notlar:

- 1 Kabuk davranışı, tarihçesi ve öne çıkan yapısal örnekler, 2005 yılında Kaya Özgen ile kaleme aldığımız metinde kapsamlı bir biçimde açıklanmıştır: O.C. Çelik, K. Özgen, "Betonarme Kabuklar: Tarihsel Gelişimi, Bugünü ve Geleceği", *Betonart*, 5, Kış, 2005, s. 53-61.
- 2 Bkz.: N. Kumbasar, "1958'de Çöken Ankara Kapalı Spor Salonu Hakkında", *İMO Teknik Dergi*, Yazı 435, 2015, s. 7099-7114.
- 3 Bu bölümde verilen bilgiler çoğunlukla şu kaynaktan alınmıştır: M. Mändel, O. Orro, "The Marvellous Reinforced Concrete Shells of Tallinn Seaplane Hangars in the Context of Early Concrete Architecture in Estonia", *Construction History*, 27, 2012, s. 65-85.
- 4 KOKO architects: [<http://koko.ee/en>].



12

Konum: **Tallinn, Estonya**  
 Yapım Tarihi: **1917**  
 Mimarlar: **Christiani & Nielsen**  
 Restorasyon Tarihi: **2012**  
 Mimarlar: **KOKO architects**  
 Proje Sorumlusu: **Andrus Kõresaar, Raivo Kotov, Indrek Mikik (restorasyon / yeniden kullanım)**  
 Proje İşbirliği: **Linda Madalik (akustik), Urmas Pastarus, Ahto Kallas, Madis Reivik (aydınlatma); Karl Öiger, Heiki Onton, Marti Sein, Priit Luure, Jaak Sulg, Indrek Tirmaste, Andres Kindel (inşaat mühendisliği), Jaanus Männik, Heinu Klaas (proje yönetimi), Nordecon (uygulama), Teet Tark, Albert Rodin, Kaia Hannus, AIT-Nord (çevre mühendisliği), Mart Mae (elektrik), Indrek Siigur (mühendislik), Margit Aule, Tõnis Savi (mimarlık), Margit Argus, Olga Batuhtina (iç mekan), Lea Laidra, Jelena Altmäe (teknik proje), Jan Tomson (grafik tasarım), Anton Vill (sanatçı).**  
 Çizimler: **KOKO architects**  
 Fotoğraflar: **KOKO architects ve Estonian Maritime Museum**

