

## 1958 de Çöken Ankara Kapalı Spor Salonu Hakkında

Nahit KUMBASAR\*

### ÖZ

Ülkemizde yapılan büyük açıklıklı ilk kabuk yapı, Ankara Kapalı Spor Salonu, kalıpların alınmasından iki yıl sonra, 1958 de çöktü. Yapının çöküş nedeni, oluşturulan yetkin bilirkişi heyetinin raporu ve betonarme hesaplarını yapan öğretim üyesinin savunma yazısına rağmen, açıklık kazanmadı. Binanın projesi elde edilemediğinden bilimsel bir inceleme yapılamadı. Bu çalışmada, Bayülke'nin [1], konu ile ilgili yayınında verilen bilgilere dayanarak, göçme olayı irdelenmeye çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kabuk burkulması, sünme, rüzgâr yükü, doğrusal olmayan çözümlenme.

### ABSTRACT

#### On Ankara Sport Center, Collapsed in 1958

In 1958, Ankara Sports Center, the first long span cylindrical shell structure in Turkey, collapsed two years after its scaffoldings were removed. The underlying reasons for this collapse could not be elucidated, in spite of the juridical experts' report and the designer professor's statement of defense,. In this study, this collapse is investigated by making use of Bayülke's paper published in TMH, Turkish Engineering News [1].

**Keywords:** Buckling of shells, creep, wind loads, nonlinear analysis.

### 1. GİRİŞ

Yazarın üniversiteyi bitirdiği yıl, 1958 yılının 2 Haziran günü, ülkemizde yapılmış büyük açıklıklı ilk kabuk yapı, Ankara Kapalı Spor Salonu göçtü. Olayın can kaybı olmadan, salon kapalı iken meydana gelmesi, hem ülkemiz hem de sorumlu olabilecek kişiler için, büyük şans olmuştur. Gerek o dönemde gerekse daha sonraki yıllarda, yıkılma nedeni ile ilgili teknik açıdan doyurucu bir inceleme ve açıklama yapılamamış, yayınlanan bilirkişi raporu ve statik hesapları yapan Ord. Prof. İhsan İnan'ın savunması kesinlikten uzak kalmıştır. Daha sonraki yıllarda da, binanın betonarme projesini elde etmek mümkün olamadığından bu konuda bilimsel veya teknik bir inceleme yapılamamıştır.

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 18.04.2014 günü ulaşmıştır.
- 30 Haziran 2015 gününe kadar tartışmaya açıktır.

\* İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - kumbasarn@itu.edu.tr

Y.Müh. Nejat Bayülke'nin Türkiye Mühendislik Haberleri dergisinde yayınlanan incelemesi[1] bu alanda en geniş bilgi içeren yayın durumundadır. Bayülke değişik kaynaklara başvurmuş ve yapı hakkında bu güne kadar bilinmeyen değerli bilgilere ulaşmıştır. Bu çalışmada kullanılan bölümleri aşağıda verilecek olmakla birlikte, istenirse, bu kaynağa halen internetten ulaşılabilir.

Yapının göçme nedeni olarak açıklanan ve kesin olmayan sünme, burkulma vb. etkenlerin ne ölçüde gerçekçi olduğunu inceleme amacını taşıyan bu yazı, Y.Müh. Nejat Bayülke'nin, yapının mimarı olan Prof. Mesut Evren'e ait bir yayından ve bilirkişi heyeti içinde olan Dr. Müh. Ali Terzibaşoğlu'ndan elde ederek yayınladığı bilgilere dayanmaktadır. Bu bilgiler bir betonarme projesinden elde edilebilecek ölçüde net olmamakla birlikte yaklaşık değerlendirmeler için yeterlidir.

## 2. ÖN BİLGİLER

Bayülke[1] de verilmiş olmakla birlikte bütünlük açısından bilirkişi raporunda varılan değerlendirmeler aşağıya alınmıştır:

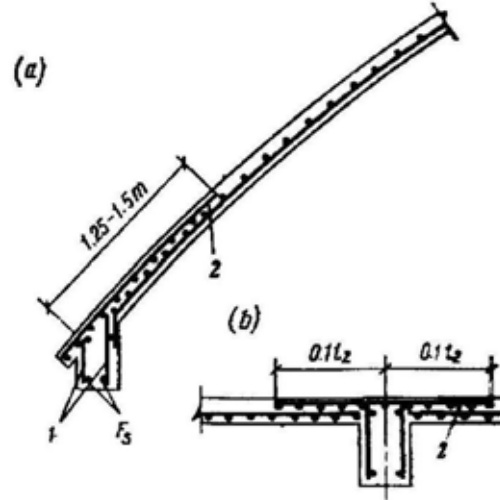
- *Temellerde bir hareket yoktur,*
- *Beton kuru dökülmüş ve vibratörle sıkıştırılmamıştır,*
- *Betonda hava boşlukları ve ayrışma gözlenmiştir,*
- *Beton ve donatı projede istenen dayanımdadır,*
- *Donatılar tam olması gereken yerde değildir,*
- *Yapı projesine göre yapılmıştır,*
- *Hesaplarda dikkate alınmamış yapıya sonradan eklenmiş havalandırma motorları dışında bir aşırı yükleme yoktur,*
- *Uygulama ayrıntıları yapının önemine eşdeğer bir ayrıntı düzeyinde değildir,*
- *Donatıların tek sıra olarak yerleştirilmesi düşündürücü bulunmuştur,*
- *Hesaplarda bazı kabullerin birbirinin eksikliğini giderecek nitelikte olduğu ve sistemin yüksek hiperstatiklik derecesi nedeni ile hesap hatasından ya da eksik bazı kabullerden dolayı bir hatanın yıkılmaya etkimeyeceği varsayılmıştır.*
- *Ayrıca bilirkişi raporunda, kabuk donatılarının tek sıra olduğu ve enkesit ortasına konulması gerekirken alt yüze yakın olarak konulmuş olduğunun görüldüğü söylenmektedir. Yıkılma nedeni "stabilite güvenliğinin yetersizliği" denilmektedir.*
- *Yapılan hesaplarda yıkılma anında kabuk yükü  $330 \text{ kg/m}^2$  hesaplarda kabul edilen yük ise  $275 \text{ kg/m}^2$  olduğu, hesaplarda kabul edilen elastisite modülüne göre yıkılma yükü  $1000 \text{ kg/m}^2$  olduğu ileri sürülmektedir. Ancak Avrupa'da yapılan deneylerde stabilite hesaplarında betonun elastisite modülü betonun reolojik özellikleri nedeni ile 1/3 oranında azaltıldığı söylenmektedir.*

Yine aynı kaynakta belirtildiğine göre, kabuk kalınlığı genel olarak 10 cm, mesnetler civarında 15 cm, malzeme B160 St-I dir. Raporda sözü edilen elastiklik modülünün 1/3 oranında azaltılması düşüncesi, sünme nedeniyle olan şekil değiştirme artımı ile ilgilidir, bugün de *TS500* de burkulma için benzer öneri vardır.

Bayülke[1] de, binanın mimarı Prof. Mesut Evren'in bir yazısına dayanarak verdiği taşıyıcı sistem şeması, alışılmış, tempan duvarlarına oturan, silindirik kabuk çatı örtülü bina tipinden farklıdır. Burada silindirik kabuk, yalnız uçlardaki tempan duvarlarına değil, doğrusal kenarlar boyunca yerleştirilmiş kolonlara mesnetli, tribün sistemine bağlı, oldukça rijit bir kirişe de oturmaktadır. Bu nedenle, klasik silindirik çatı örtüsü, kabaca, daire parçası kesitli bir kiriş gibi davranırken, burada daha çok tonoz davranışının etkili olacağı beklenir. Bununla birlikte, yapılan statik çözümler, bu doğrusal mesnetlerde önemli bir hareket olmamasına rağmen, kabuğun, bu mesnetlere yakın bölgesindeki yanıl yerdeğıştirmeler nedeniyle, tonoz davranışından uzaklaştığı, aksenal doğrultuda, azımsanmayacak büyüklükte çekme ve basınç mambran kuvvetlerin oluştuğunu göstermiştir.

### 3. BİLİRKİŞİ RAPORU HAKKINDA

O gün için oluşturulabilecek en iyi bilirkışı heyetinin seçildiği kuşkusuzdur. Gözlemleri ve değerlendirmeleri bilimsel ve mühendisçedir. Bununla birlikte birkaç noktada farklı değerlendirme öne çıkabilir. Donatının tek sıra konmuş olmasını düşündürücü bulan heyet büyük olasılıkla o dönemde önerilen kabuk donatı düzeninin genellikle bu yönde olduğunu gözden kaçırmış olmalıdır. Bu anlayış, mesnetler civarında etkili olan eğilme momentinin, diğer bölgelerde ihmal edilebileceği ve sadece mambran kuvvetlerin göz önüne



Şekil 1. Kabukta vaktiyle uygulanan donatı düzeni

almabileceği düşüncesine dayanırdı. Bugün terkedilmiş olan bu anlayışın bir örneği olarak Şekil 1 de Rusçadan çevrilmiş bir betonarme kitabında[2] verilen kabuk kesiti gösterilmiştir. Ayrıca heyet bu donatının kabuk ortasına konması gerekirken alt yüze yakın konduğunu belirtirken, bunun uygulama hatası olduğunu, bu gün de zaman zaman rastladığımız, donatıya basarak yerinin değiştirilmesinden kaynaklandığını belirtmemiştir. Sünme etkisi, betonun reolojik özelliği adı altında üstü kapalı vurgulanmıştır.

Bilindiği gibi sünme, betondaki gerilme değişmeye de, şekil değiştirmenin zamanla artmasıdır. Sünme, ortamın nemliliğine, betonun yüklenme anındaki yaşına, bileşimine, boyutuna bağlı olarak değişir. Bu nedenle incelenen yapıda bu etkenlerin durumu, özellikle yüklenme anındaki yaşı bilinmediğinden bu etki en büyük değeri ile, bilirkişi raporunda olduğu gibi, elastiklik modülünün üçte biri kullanılarak gözönüne alınacaktır.

#### 4. BURKULMA KONUSU

Bilirkişi raporunda üzerinde durulan burkulma sorunu ve proje mühendisinin ileri sürdüğü ve bilirkişilerce zımnen kabul edilen kalıp geometrik hatalarını düzeltmek amacı ile ek olarak 5cm beton ağırlığı, son yıllarda yoğunlaşan geometri bozukluğuna (imperfection) bağlı burkulma sorunu yayınlarını akla getirmektedir. Bu nedenle konu burkulma ve hatalı geometri açısından da incelenecektir.

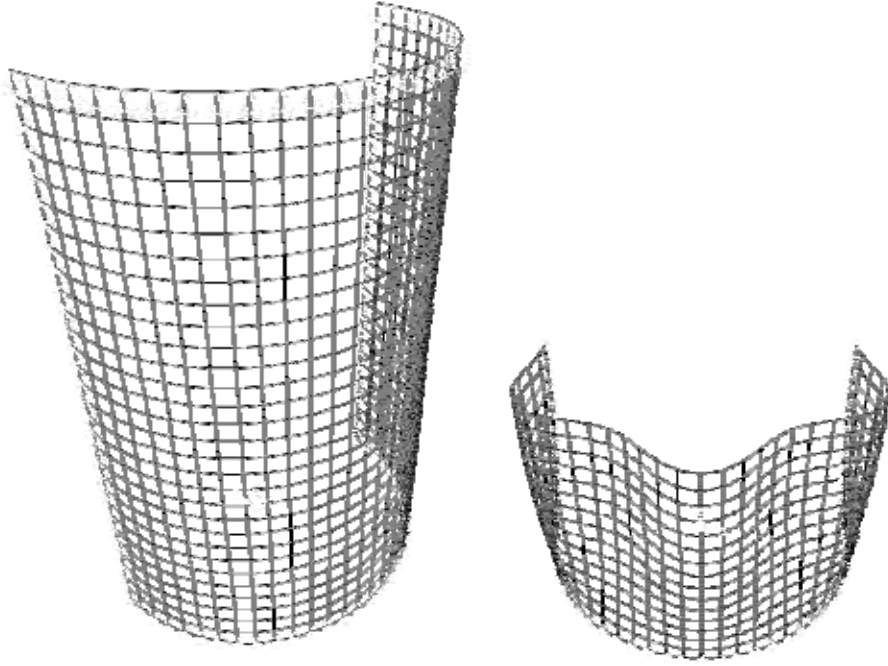
Kabuk sistemlerin burkulma sorunu, basit geometri ve sınır koşulları dışında, kolay olmayan bir problemdir. Bununla birlikte belirli yaklaşımlarla uygulamaya ışık tutacak sonuçlar elde edilebilir. O yıllarda kabuk literatüründe verilen bağıntılar bu tür yaklaşımları içermekte idi. Örneğin Flügge[7] S.433 Şekil 15 veya Pflüger[8] S573 Şekil 90, dış basınç etkisinde, dairesel kenarları basit mesnetli bir tam silindirin burkulma yükünü bulmak için düzenlenmiştir. Böyle ilgisiz gibi görünen iki sistemi, tam silindir ve silindirik çatı örtüsünü, burkulma konusunda benzeştirmek ilk bakışta çok kaba bir yaklaşım olarak görülebilir. Ancak, çok defa, tam silindirin birbirine yakın özdeğer veren burkulma modlarından biri, incelenen sistemin sınır koşullarına yakın düşmektedir. Bu nedenle, o dönemde silindirik ve küresel kabuk burkulması için tam silindir ve tam küre esas alınmıştır.

Beton elastiklik modülünü o yıllarda yapıldığı gibi 21000 MPa alarak, sözü edilen diyagramlar kullanılarak, 60m uzunluğunda 20m yarıçapı ve 10cm kalınlığı olan silindir için kritik dış basınç 109 MPa olarak elde edilir, büyük olasılıkla kritik yükü  $1000 \text{ kg/m}^2$  olarak bulan bilirkişiler de bunu yapmıştı. O yıllarda uygulama için daha iyi bir yaklaşım söz konusu değildi.

Öte yandan plak, levha gibi sürekli ortamlar için eşdeğer çubuk sistem tanımı uygulaması Hrennikoff [5] un çalışması nedeniyle 1941 den beri bilinmektedir. Daha sonra gelişen ve bu yöntemin devamı kabul edilen sonlu eleman yöntemi Hrennikoff'un çalışmasını gölgede bırakmıştır.

Bu çalışmanın yazarı, yöntemi burkulma problemine uygulayarak profil kesitlerin burkulmasını, İTÜ de bir Mustafa İnan seminerinde sunmuştur. Bu uygulamada kullanılan *kumbas26* bilgisayar programında, uzay bir çubuk sisteme dönüştürülen sürekli ortamda burkulma, yeter yaklaşıklıkla, çubuk sistem burkulması olarak incelenebilmektedir. Yük küçük kademelerle artırılarak uygulanmakta, her kademedede yerdeğştirmeler sistemin

geometrisine eklenerek p-delta etkisi de göz önüne alınmaktadır. İstenirse her kademede değişen bir elastiklik modülü veya eylemsizlik momenti kullanılabilir. Çubuk sistemlerin burkulma durumu yaygın olarak kullanılan SAP2000 programı ile de incelenebilmektedir.



Şekil 2. Silindirik kabuk modeli ve burkulmuş şeklin yarısı

Yukarıda sözü edilen yöntemi incelenmekte olan spor salonu problemine uygulamadan önce çözümü bilinen bir örnek probleme uygulayarak yaklaşıklık düzeyi kontrol edilecektir. Yukarıda sözü edilen silindir  $E=24000 \text{ MPa}$  için incelendiğinde [8] deki diyagramlarla  $l/a=60/20=3$ ,  $k=(t/a)^2/12=2.08 \times 10^{-6}$  ile  $q_1=1 \times 10^{-4}$  ve  $p=q_1 D/a$  ile

$$p = \frac{2.4 \times 10^7 \times 0.1}{(1 - 0.2^2) \times 20.0} \times 1 \times 10^{-4} = 12.5 \text{ kN / m}^2$$

bulunur. Bu silindir, simetri koşulları kullanılarak yarısı, yarım daire 30 a ,  $l=60m$  30 a bölünerek elde edilen noktasal ağ, eşdeğer kesitli ( $2.0 \times 0.1$  ve  $2.09 \times 0.1$ ) çubuklarla SAP2000 de modellenmiş, boyuna doğrultudaki çubuklara silindir eksenine yönelik çizgisel yükler uygulanmış,  $14.9 \text{ kN/m}$  kesitin çarpıldığı ve burkulma yüküne erişildiği görülmüştür

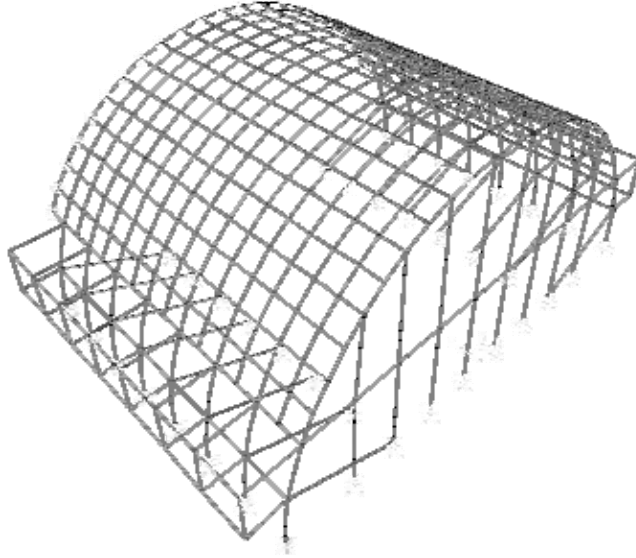
### 1958 de Çöken Ankara Kapalı Spor Salonu Hakkında

(Şekil 2). Pflüger'deki diyagramda burkulmanın çembersel doğrultuda 5~6 dalga içeren bir modda olduğu görülür. Burada da benzer burkulma modu bulunmuştur.

Aynı model yazarın yukarıda sözü edilen *kumbas26* programı ile düğüm noktalarına uygulanan  $1 \text{ kN}$  tekil yüklerle burkulma durumu aranmış, her adımda eklenen yük için 64 üncü adımda burkulduğu görülmüştür. Bu ise, her düğüm noktası  $2.00 \times 2.09 \text{ m}$  alana kapsadığından,

$$p = \frac{64 \times 1}{2.00 \times 2.09} = 15.3 \text{ kN / m}^2$$

yayıllı yüke karşı gelir, SAP çözümü ile uyumlu ve Pflüger sonucuna yakındır. Pflüger sonucu ile olan farkın basit mesnet sınır koşulunun teorik kabule tam olarak karşı gelmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3. Simetri gözönüne alınarak Ankara Kapalı Spor Salonu için düzenlenen SAP2000 modeli

Bir silindirik kabuğun burkulma yükünün, yeter yaklaşıklıkla, bulunabileceği görüldükten sonra Ankara Kapalı Spor Salonu'nun, yine simetri koşulları kullanılarak, yarısı çubuk sistem olarak modellenmiştir. Bu modellemede gerek kalkan duvarı, gerekse yan yapı elemanları tahmin edilen kesitlerle alınmış, kabuğun kendisi bilinen  $0.10 \text{ m}$ , mesnetlerde bir sıra  $0.15 \text{ m}$  kalınlıkla ve bunu mesnetleyen boylama kiriş  $0.60/1.10 \text{ m}$  olarak alınmıştır. Yapıda beton dökümü ile kalıpların alınması arasında geçen süre bilinmemekle birlikte

sünmenin oldukça elverişsiz durumu düşünülerek  $E$  elastiklik modülü  $1/3$  değeri ile,  $E=8000 MPa$  alınmıştır.

Yukarıda sözü edilen çubuk sistem modellemesi SAP2000 programı ile de yapılmış, yöntemin yaklaşıklığını kontrol için kiriş ve kolonlar aynen kullanılmak üzere silindirik kabuk bir de kabuk elemanlarla modellenerek çözülmüştür. Bütün düğüm noktalarına etki ettirilen  $2.5 kN$  tekil yük etkisinde, orta noktada:

Kabuk modellemede: Çembersel doğrultuda  $N_1=-12.13 kN/m$  boyuna doğrultuda  $N_2=-33 kN/m$

Çubuk modellemede: Çembersel doğrultuda  $N_1=-11.98 kN/m$  boyuna doğrultuda  $N_2=-36 kN/m$

bulunmuştur. Buna karşılık yer değiştirmeler aynı ölçüde uyumlu değildir:

Orta noktada düşey doğrultuda yerdeğiştirme:

Kabuk modellemede:  $w_{max}= 0.0058m$

Çubuk modellemede:  $w_{max}= 0.0128m$

olarak elde edilmiştir. İç kuvvetlerdeki uyum nedeni ile yaklaşımın yeterli olduğu kabul edilebilir.

Yapı önce hatasız bir geometri ile çözülmüştür. Bu çözümlemede SAP2000 modelinde her bir düğüm noktasına  $25kN$  (kenar noktalara yarısı) etki ettirilerek burkulma yükü aranmıştır. SAP2000 burkulma için  $0.992$  katsayısını verir. Bu sonuçla düzgün yayılı yükün,

$$p = \frac{0.992 \times 2.50}{2.0 \times 2.09} = 5.93 kN / m^2$$

olması gerektiği sonucuna varılır. Görüldüğü gibi, o günün koşulları gereği, oldukça kaba bir benzeşimle elde edilen

$$p=1000/3=333kg/m^2 (3.33kN/m^2)$$

değeri daha gerçekçi olduğu düşünülen  $5.93kN/m^2$  den çok farklıdır, yapı var olan yükler altında burkulmaya karşı  $1.78$  kat güvenli görünmektedir.

Göçme sırasında şiddetli rüzgâr olduğundan bu yükün bilirkışı heyetince olay sırasında var olduğu hesaplanan  $330kg/m^2$  ye eklenmesi gerektiği düşünülebilir, ancak bu yük uzun süreli olmadığından elastiklik modülünün bu yükleme için de  $1/3$  oranında azaltılması güvenli yanda bir hesap olacaktır. Bununla birlikte sadeliği sağlamak üzere yapı ağırlığına rüzgâr yükü de eklenerek burkulma kontrolü yapılmıştır. Silindirik tonoz yapılarda rüzgâr yükünün yayılışı [9] da incelenmiştir. Blackmore ve Tsokri'nin bu çalışmasında verdikleri rüzgâr basıncı ve emme oranı, buradaki yükseklik/açıklık oranı için Avrupa Normu EN1991-1-4 te verilen değerlere yakındır. Silindirik çatının yarı bölümünde  $0.8$ , diğer yarısında  $-0.2$  katsayısı ile elde edilen  $0.64kN/m^2$  ve  $-0.16kN/m^2$  rüzgâr yükü ile birlikte yapılan burkulma çözümlemesinde SAP2000 için düğüm noktalarına sabit yük için  $3.33kN$ ,

## 1958 de Çöken Ankara Kapalı Spor Salonu Hakkında

rüzgâr yükü için bölgeye göre 0.64kN ve -0.16kN tekil yük düzenlenmiştir. Program burkulma için 0.698 katsayısını verir. Bu duruma karşı gelen yayılı yük

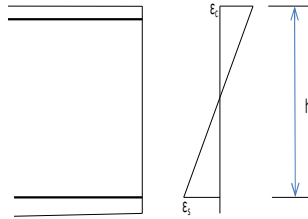
$$p = \frac{0.698 \times 3.33}{2.0 \times 2.09} = 5.56 \text{ kN/m}^2$$

dir. Bu da rüzgâr yükünün burkulma üzerinde önemli bir etkisi olmadığını gösterir. Elde edilen bu değerler, doğrusal davranış ve brüt kesit eylemsizlik momenti ile, yani çatlamamış kesit kabulü ile bulunmuştur.

## 5. DOĞRUSAL OLMAYAN ÇÖZÜMLEME

Bilirkişi raporunda, tek sıra donatının kesit ortasına konduğu ve bazan tam olması gereken yerde olmadığı belirtilmektedir. Bu ise eğilmede ve özellikle çekme kuvveti ve eğilme momenti etkisindeki kesitlerde eğilme rijitliğinin hesaplarda gözönüne alınan değer çok altına düşebileceğini gösterir. Bilindiği gibi, kesit eğilme rijitliği, betonun elastiklik modülü dışında, donatı miktarı ve tarafsız eksen mesafesi gibi etkenlere de bağlıdır. Kullanılan *kumbas26* programı çözüme adım adım yaklaştığından her adımda farklı kesit rijitliği kullanılabilir. Bu çalışmada yararlanılan SAP2000 programı ile de doğrusal olmayan çözümlene yapılabilmektedir, ancak doğrusal olmayan davranış, önceden tanımlandığından, sistemin değişik noktalarında ve ilerleyen yükleme düzeylerinde farklı değerler alan eksenel yükün etkisi yeterli biçimde hesaba katılamamaktadır. Bu düşünce ile, Ankara Kapalı Spor Salonunun kabuk yapısını oluşturan kesitlerin değişik yüklemeler altındaki davranışı belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 4 ten görüleceği gibi, betonarme kesitin dönmesi, betonun ve çeliğin şekil değiştirmeleri cinsinden

$$\frac{M}{EI} = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_s}{d} \quad (1)$$



Şekil 4. Betonarme bir kesitte dönme ve birim uzamalar

olarak yazılabilir. Buradan, kesite etki eden eğilme momenti altında şekil değiştirmeler biliniyorsa eğilme rijitliğinin elde edilebileceği görülür. Bernoulli-Navier hipotezinin geçerli olduğu varsayıldığı sürece bu bağıntı doğrusal olmayan gerilme durumları için de geçerlidir.

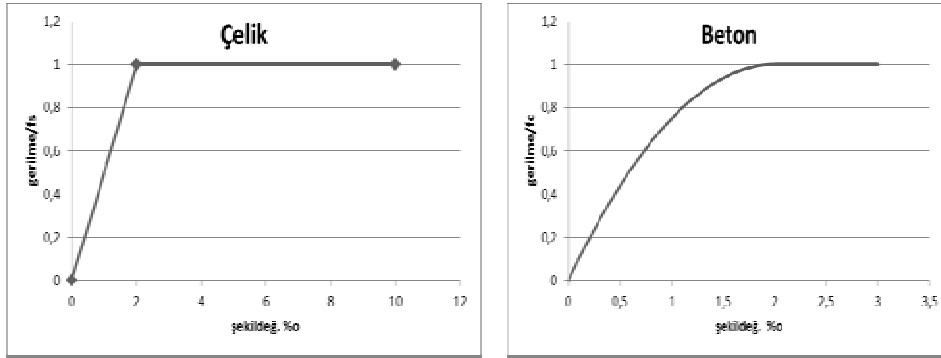


$$EI = \frac{Md}{\varepsilon_c - \varepsilon_s} \quad (2)$$

Öte yandan, taşıma gücü kesit hesaplarında beton için kabul edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramı Şekil 5 te görüldüğü gibidir.  $\varepsilon_c$  nin 0.002 den küçük değerleri için kabul edilen parabolün başlangıç eğiminin

$$E_c = \frac{2f_c}{0.001} = 2000f_c \quad (3)$$

olduğu görülür. Bu bağıntı söz konusu olan düşük dayanımlı beton için yeter yaklaşıklıkla doğrudur. Daha yüksek dayanımlı betonlarda ikinci derece parabol yerine uygun bir eğri kullanılabilir. Bu çalışmada kullanılan kesit hesabı yapan bilgisayar programlarında beton için Şekil 5 teki parabol+ yatay doğrudan oluşan bağıntı, çelik için bir elastoplastik malzemenin, akma sınırına uygun, bilineer bağıntısı kullanılmaktadır.



Şekil 5. Betonda ve çelikte gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi

Bu durumda, elastoplastik davranış biçimi aranan kesitlerin eğilme-şekil değiştirme diyagramlarını elde etmek için, değişik durumları yansıtabilecek özellik ve sayıda kesit hesabı yapmak ve bu hesap sonucunda  $\varepsilon_c$  ve  $\varepsilon_s$  değerlerini elde etmek yeterlidir. İncelenmekte olan silindirik kabuk için [1] de verilen bilgilere dayanarak üç tip kesit için bu işlemler yapılmıştır. Mesnetler civarında kullanıldığı belirtilen birinci tip kesit 0.15m kalınlıklı ve her iki yüzünde  $\Phi 12/150mm$  donatılıdır. İkinci tip kesit, genel olarak diğer bölgelerde olması gereken 0.10m kalınlıklı ve ortasında  $\Phi 12/150mm$  donatısı olan bir kesittir. Üçüncü tip kesit, imalat hatası yüzünden donatısı 20mm kadar kaymış olan ikinci tip kesite karşı gelir. Bu kesitin negatif eğilme momenti durumunda kullanılması gerekmektedir. Ancak kaymış donatının hangi bölgelerde olduğu bilinmediğinden negatif moment bulunan her yerde donatının kaymış olduğunu kabul etmek güdümlü bir değerlendirme gibi düşünülerek bu hatanın hesaba katılmasından vazgeçilmiştir. Bu kesitler

için, değişik aksenal yük etkisinde artan eğilme momentleri uygulanarak taşıma gücüne karşı gelen eğilme momenti ile  $\varepsilon_c$  ve  $\varepsilon_s$  şekil değiştirmeleri bulunmuş ve yukarıdaki (2) bağıntı ile taşıma gücü durumunda eğilme rijitliği hesaplanmıştır.

Küçük  $M$  ve  $N$  değerleri için kesitin doğrusal davrandığı gözönüne alınarak, doğrusal gerilme yayılışına karşı gelen tarafsız eksen mesafesi hesaplanmış buna bağlı olarak atalet momenti bulunmuştur. Bu doğrusal hesaplamada çelik ve betonun elastiklik modülü oranları 7.65 alınmıştır. Doğrusal davranış için bileşik eğilme etkisindeki bir kesitin tarafsız eksen mesafesi ve eylemsizlik momenti için bağıntılar [10] da verilmiştir. Tarafsız eksen mesafesi için donatı oranı ve dışmerkezliğe bağlı üçüncü dereceden bir denklem olan bağıntı artan dışmerkezlik değerleri için çözülüp  $x$  tarafsız eksen mesafesi ve buna bağlı olarak  $I$  eylemsizlik momenti bulunmuştur.

Herhangi bir  $N, M$  yük çiftine maruz kesitin eğilme rijitliği, doğrusal durum ve taşıma gücü durumu eğilme rijitliklerinden, mevcut momentin o aksenal yüke karşı gelen taşıma gücü momentine oranı kullanılarak doğrusal enterpolasyonla elde edilmiştir.

$$EI = EI_{lin} - (EI_{lin} - EI_{tg}) \frac{M}{M_{tg}} \quad (4)$$

Her iki kesit tipi için artan  $N$  aksenal yük durumları için elde edilen taşıma gücü moment değeri, Çakıroğlu-Özer [11] de önerilen taşıma gücü formüllerine benzer bağıntılarla ifade edilmiştir. Benzer biçimde eylemsizlik momenti katsayısı da üstel fonksiyonlara bağlı enterpolasyon bağıntıları ile ifade edilmiş, taşıma gücünü aşan eğilme momenti değerleri için taşıma gücüne karşı gelen eğilme rijitliğinin  $1/4$  ü alınmıştır. Böylece programın, uzun hesaplama zamanı gerektiren, her yükleme adımında ve her kesit için kesit hesabı yapma zorunluluğu kalmamıştır. Örnek olarak 0.15m kalınlıklı ve çift donatılı birinci tip kesit için kullanılan enterpolasyon bağıntıları aşağıda verilmiştir.

Doğrusal başlangıç rijitliği için,  $en = M/(Nd)$  dışmerkezlik olmak üzere eylemsizlik momentini azaltan katsayı  $i$ :

$$i = 0.256 + 0.251e^{-en} + 0.450 \times 10^{-en} \quad (5)$$

Eksenal yük çekme (-) iken, taşıma gücü bağıntısı ve  $i$  katsayısı:

$$-0.0465N + 0.732M - 15.3 = 0 \quad (6)$$

$$i = 0.015 + 0.020e^{-en} + 0.006 \times 10^{-en} \quad (7)$$

Eksenal yük basınç (+) iken, taşıma gücü bağıntısı ve  $i$  katsayısı:

$$0.000037N^2 - 0.0633N + 0.841M - 15.3 = 0 \quad (8)$$

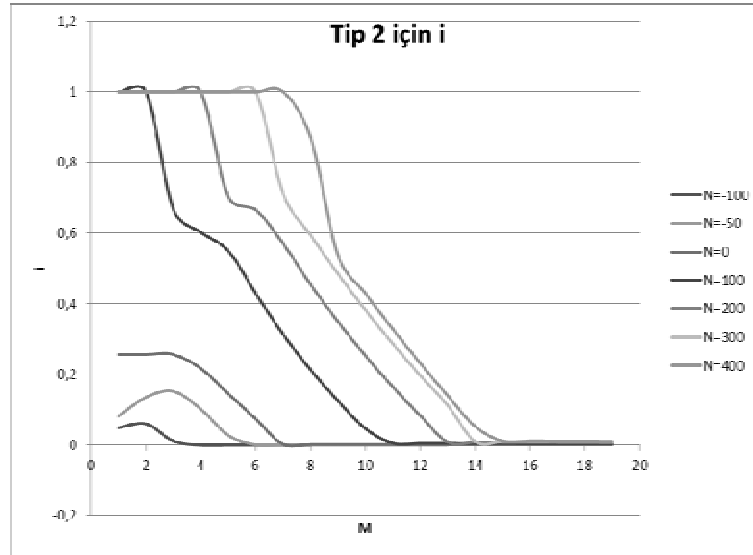
$$i = 0.015 + 0.010e^{-en} + 0.090 \times 10^{-en} \quad (9)$$

Benzer bağıntılar ikinci tip kesit için de elde edilmiştir. Burada kullanılan *kumbas26* programına eklenen bir alt program, her yükleme adımında, bu bağıntıları kullanarak kesit rijitliğini belirler. Eksenel kuvvet çekme iken homojen kesit için bulunan en büyük çekme gerilmesi çekme dayanımından küçükse, eksenel kuvvet basınç iken *en* dışmerkezlik oranı 0.20 den küçükse çatlama kesit eylemsizlik momenti kullanılır. Boyutları tahmini değer olarak verilen ve donatı durumu hakkında bilgi olmayan, kabuk dışındaki kesitlerin, bütün yüklemeler boyunca doğrusal davrandığı kabul edilmiş ve çatlama kesit eylemsizlik momenti kullanılmıştır.

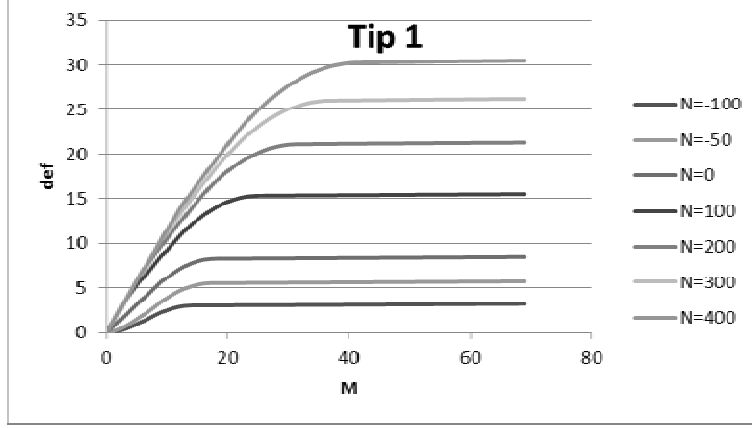
Şekil 6 da ikinci tip, yani donatısı ortada ve  $0.10m$  kalınlıklı kesit için, eylemsizlik momentini küçülten  $i$  değerinin değişik  $N$  eksenel kuvveti ve artan eğilme momenti altında değişimi verilmiştir.

Bu diyagramlarda,  $N=400kN$  basınç için olan eğri en üstte,  $N=-100kN$  çekme için olan eğri en alttadır. Bütün eksenel yük değerleri için artan eğilme momenti ile kesit eylemsizlik momentinin azaldığı ancak eksenel kuvvet değerinin de, önemli bir etken olarak, sonucu etkilediği görülmektedir. Gözönüne alınan çekme kuvveti, sözkonusu kabukta oluşması beklenen düzeydedir. Bu durum, eleman rijitlikleri hesaplanırken, eksenel yük değerinin gözönüne alınması gereğini ortaya koymaktadır.

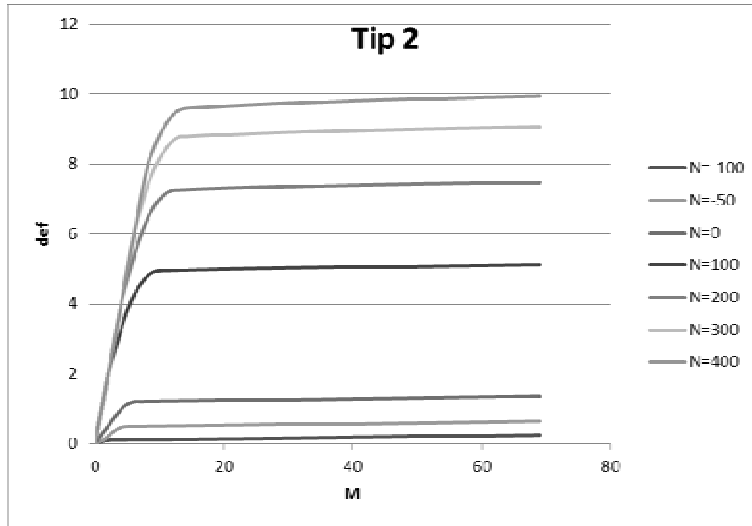
Bu bağıntılar kullanılarak elde edilen kesit rijitliklerinin göstereceği doğrusal olmayan davranışı belirtmek üzere,  $-100\sim+400$  kN arasında değişen eksenel yükler altında, artan eğilme momenti değerleri için elde edilen  $M/i$  değerleri toplanarak elde edilen göreceli eğrilik-moment ilişkileri Şekil 7a-b de verilmiştir. Bu şekiller gerçek moment-eğrilik ilişkisi olmayıp bağıntının niteliğini belirtme amaçlıdır. Diyagramlarda en üstte  $N=400kN$  olmak



Şekil 6. Ortada tek sıra donatılı  $0.10m$  kalınlıklı kesitte değişik eksenel yük değerleri için eylemsizlik moment katsayısı-eğilme momenti ilişkisi



Şekil 7a. Çift sıra donatılı 0.15m kalınlıklı kesitte değişik aksel yük değerleri için şekil değiştirme-moment ilişkisi

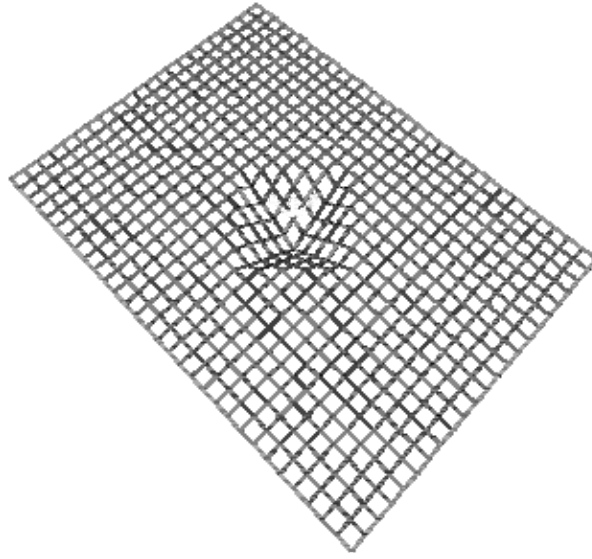


Şekil 7b. Ortada tek sıra donatılı 0.10m kalınlıklı kesitte değişik aksel yük değerleri için şekil değiştirme-moment ilişkisi

üzere azalan  $N$  değerleri için eğriler kendiliğinden sıralanmıştır. Tip2 de  $N=-100kN$  için olan eğri yatay eksene iyice yaklaşmış durumdadır. Buradan aksel basınç kuvvetinin, kesitte basınç bölgesi uzunluğunu artırarak, eylemsizlik momentini büyüttüğü gözlenebilir. Yine bu diyagramlar, donatının ortada olması nedeni ile ikinci tip kesitte, belirgin bir basınç kuvveti yoksa, eğilmeye rijitliğin hızla azaldığını göstermektedir. Bu durum, donatısı kaymış kesitte daha da belirgindir.

İnceleme konusu Ankara Kapalı Spor Salonu silindirik kabuğu, çembersel doğrultuda tümü ile, silindir eksenine doğrultusunda büyük ölçüde membran aksenal basınç kuvvetleri etkisindedir. Ancak, kabuğun boyuna doğrultusundaki mesnetlenmesini sağlayan kiriş ve buna yakın bölgelerde kabuk çekme kuvveti etkisindedir. Şekil 6 daki diyagramlarda, aksenal kuvvetin çekme olması durumunda, kesit eğilme rijitliğinin ve taşıma gücünün çok azalabileceği görülmektedir.

*Kumbas26* programında sistemin geometrisi ve taşıdığı düşünülen yükün küçük bir kesri, bu çalışmada 1/50~1/100 kadarı yük olarak tanımlanır. Her çözüm adımında, kesitler taşıdıkları aksenal kuvvet ve moment etkisine göre yukarıda belirtilen yöntemle kontrol edilip rijitliği belirlenir. Elde edilen  $u,v,w$  yerseğitirmeleri, düğüm noktalarının  $x,y,z$  koordinatlarına, iç kuvvetler bir önceki adımdaki iç kuvvetlere eklenerek yeni adım için hazırlanır. Enterpolasyon bağıntıları kullanılarak yeni kesit rijitlikleri hesaplanır. Statik çözümlemede, çubuk sistemlerin burkulması için bilinen, trigonometrik fonksiyonlara bağlı rijitlik matrisi kullanılır ve her çözümlemede bu matrisin determinantı da hesaplanır. Burkulma, bu determinant değerinin negatif bölgeye geçişi ile belirlir.



Şekil 8. Düzlemsel ağı üzerinde gösterilmiş geometri bozukluğu

Yukarıda, doğrusal davranış kabulü ile burkulma yükü bulunan taşıyıcı sistem modeli, (4)~(9) bağıntıları ile verilen kesit değerlendirmesi ile elde edilen rijitliklerle çözümlenmiştir. İlk adımlarda, kesitlerde çatlama söz konusu olmadığından,  $i$  azaltma katsayısı 1.00 veya donatının etkisi ile 1.00 den biraz büyüktür. İlerleyen adımlarda önce çatlama kesitinin, daha sonra plastikleşmeye yaklaşan kesitin rijitlikleri kullanılmış olur. Bu çözümlemede her

düğüm noktasına etki ettirilen 0.25kN kuvvet için 63 üncü adımda burkulmanın oluştuğu, yani

$$p = \frac{63 \times 0.25}{2.0 \times 2.09} = 3.77 \text{ kN} / \text{m}^2$$

yayıllı yükte burkulduğu görülür.

Kaynaklarda vurgulanan geometri bozukluğu (imperfection) etkisini aramak üzere, bu hatanın kabuk orta bölümünde olabileceği gözönünde tutularak, Şekil 8 de gösterilen, orta noktada 0.10m iken hatalı alan sınırlarına doğru lineer olarak azalan bir geometri hatası ve buna karşı gelen ek yük yine adımlara bölünerek, sabit yüklerle birlikte etki ettirilmiştir. Beklenenin aksine bu durum önemli bir değişikliğe neden olmamıştır. Bu durum için 57inci adımda burkulma oluşmuş, nominal yük için

$$p = \frac{57 \times 0.25}{2.0 \times 2.09} = 3.41 \text{ kN} / \text{m}^2$$

değeri elde edilmiştir. Bu geometrik hata ile birlikte rüzgâr yükü de göz önüne alınırsa 45 inci adımda ortaya çıkan burkulma yükü

$$p = \frac{45 \times 0.25}{2.0 \times 2.09} = 2.69 \text{ kN} / \text{m}^2$$

düzgün yayıllı sabit yüke karşı gelir. Bu değer bilirkışı heyetinin göçme sırasında yapıda var olduğunu bildirdiği 3.30 kN/m<sup>2</sup> den daha azdır. Başka bir deyişle, yapının burkulması sünme etkisi ile azaltılmış  $E/2.45$  elastiklik modülü için burkulabilecektir. İncelenen taşıyıcı sistemi oluşturmak üzere kullanılan 892 çubuğun 670 adedi silindirik kabuğu oluşturmaktadır. Bu yüklemde, burkulmadan hemen önce bu 670 çubuktan 240 ında eylemsizlik momenti yarı değer altındadır, yani  $i \leq 0.5$  tir. Bu 240 elemanın 132 si boyuna doğrultudadır. Yine aynı yüklemde eylemsizlik momenti katsayısı  $i 0.10$  un altına düşen eleman sayısı 97 ve bunların 93 ü boyuna doğrultudadır. Eylemsizlik momenti katsayısı  $0.01$  in altına düşen eleman sayısı 17dir ve bunların tümü boyuna doğrultuda ve çekme kuvveti etkisi altındadır.

Elde edilen bu sonuç, Ankara Kapalı Spor Salonunun imalat hatasından kaynaklanan geometri bozukluğu ile birlikte şiddetli rüzgâr yükünün de etkisi ile, ağırlıklı olarak, donatının ortada olması durumunda özellikle çekme kuvvetinin bulunduğu kesitlerde, eğilme rijitliğinin büyük ölçüde azalmasından kaynaklandığını işaret etmektedir.

## 6. SONUÇLAR

Daha önce [1] de göçme nedeni incelenmiş olan Ankara Kapalı Spor Salonunun, aynı kaynaktan verilen bilgilere dayanarak, doğrusal olmayan burkulma kontrolü yapılmıştır. Yaklaşık olan bu hesaplamada, sürekli bir ortam olan kabuk, [4] te önerilen yöntemle uzay çubuk sisteme dönüştürülmüş, çubuk sistemler için elde edilebilen, doğrusal olmayan

davranış ve stabilite hesabı olanakları kullanılmıştır. Bu silindirik kabuk yapıda eksenel (mambran) kuvvetler doğal olarak hem dayanımı hem de rijitlikleri etkileyecektir. Bu etki her yükleme adımında, enterpolasyon bağıntıları ile yaklaşık olarak gözönüne alınmış olmaktadır. Elde edilen sonuçlar, kabuğun çekme etkisindeki az sayıda elemanın rijitliğinin aşırı azalması sonucu, stabilitesini yitirdiği, burkulduğu düşüncesini doğurmuştur.

Ankara Kapalı Spor Salonu için elde edilen ve Şekil 6~7 de verilen diyagramlar, eleman rijitliğinin sonucu önemli ölçüde etkilediği problemlerde, bu rijitlik değerinin elde edilmesinde eleman eksenel kuvvetinin de gözönüne alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

### Semboller

- $d$  : Betonarme kesit faydalı yüksekliği  
 $E$  : Elastiklik modülü  
 $e_n$  :  $M/(Nd)$  dışmerkezlik oranı  
 $f_c$  : Beton dayanımı  
 $I$  : Eylemsizlik momenti  
 $I_{brüt}$  : Brüt kesit eylemsizlik momenti  
 $i$  :  $I/I_{brüt}$ , eylemsizlik momenti azaltma katsayısı  
 $I_{lin}$  : Doğrusal davranışta eylemsizlik momenti  
 $I_{tg}$  : Taşıma gücü durumunda eylemsizlik momenti  
 $k$  : Burkulma için silindirik kabukta tanımlanan parametre  
 $l$  : Silindir uzunluğu  
 $p$  : Düzgün yayılı yük  
 $w_{max}$  : En büyük düşey yerdeğiştirme  
 $\varepsilon_c$  : Betonda birim kısalma  
 $\varepsilon_s$  : Çelikte birim uzama

### Kaynaklar

- [1] Bayülke, N. Ankara Spor Sarayı Neden Çöktü, Türkiye Mühendislik Haberleri, 59, 1, 47-57, 2009.
- [2] Murashev, V.I., Sigalov, E., Baikov, V., N., Design of Reinforced Concrete Structures. Moscow, Mir, 1968.
- [3] Kao, R., Nonlinear Creep Buckling Analysis of Initially Imperfect Shallow Spherical Shells, Computers & Structures. 14. I-2. II I-122. 1981

*1958 de Çöken Ankara Kapalı Spor Salonu Hakkında*

- [4] Hamed, E, Bradford, M.A., Gilbert, R.,I. Creep Buckling of Imperfect Thin-walled Shallow Concrete Domes, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 5, 1, 107-128, 2010
- [5] Hrennikoff, A., Solution of Problems of Elasticity by the Framework Method, *J. Appl. Mech.* 12. 169-1175. 1941
- [6] Schneider ve diğ. Stability Analysis of Perfect and Imperfect Cylinders Using MSC/Nastran Linear and Nonlinear Buckling, [web.mscsoftware.com](http://web.mscsoftware.com).
- [7] Flügge, W., *Stresses in Shells*, Berlin, Springer, 1962.
- [8] Pflüger, A., *Elastostatiğin Stabilité Problemleri*, (Çeviri: Tameroğlu, S., Cinemre, V., Özbek, T) İTÜ, 1970.
- [9] Blackmore, P.,A., Tsokri, E., Wind Loads on Curved Roofs, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 94, 833–844, 2006
- [10] Löser, B., *Bemessungsverfahren* Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1951.
- [11] Çakıroğlu, A., E.Özer. Eğik Eğilme ve Eksenel Kuvvet Etkisindeki Dikdörtgen Betonarme Kesitlerde Taşıma Gücü Formülleri. Yesa Yayınları, İstanbul 1983.
- [12] CSI, *Three Dimensional Static and Dynamic Finite Element Analysis and Design of Structures*. Berkeley, Ca. USA, 1993