

Geleneksel Mimaride Kubbeli Örtü Sistemlerinin Yapısal Davranışı

Mustafa Türkmen ¹, Hüseyin Bilgin ²

Özet – Geleneksel mimaride kubbeler, mekan örtüsünde tek olarak kullanıldıkları gibi mekan genişlemesine bağlı olarak yarım kubbelerin çeşitli kombinasyonlarıyla beraber de kullanılmışlardır. Ana kubbe, kemer, pandantif, ve yarım kubbelerin birleşmesinden oluşan bu tür monolitik taşıyıcı sistemlerin yük taşıma mekanizmasını ve yapısal davranışını tespit etmek, günümüzün bilgisayara dayalı sayısal hesap metotları yardımıyla mümkün olabilmektedir. Tarihi yapıların korunmasında atılacak ilk adımlardan biri, şüphesiz taşıyıcı strüktürlerin yapısal davranışını anlamak olmalıdır. Bu çalışmada, İstanbul'daki Süleymaniye Camisi örtü sistemi ile bu örtü sisteminin geometrik boyutları esas alınarak; yarım kubbesiz, iki yarım kubbeli, üç yarım kubbeli ve dört yarım kubbeli teorik örtü sistemlerinin zati yükleri altında, sonlu eleman yöntemine dayalı SAP2000 Yapı Analiz Programı ile statik çözümleri yapılmıştır. Çözüm sonucunda; ana kubbe, kemer, yarım kubbe ve pandantif dörtlüsünün karşılıklı yapısal etkileşimi belirlenmiş ve her sistemin yapısal davranışı sayısal olarak ortaya konmuştur. Dört eşit rijitlikli kemere oturan, dört yarım kubbeli örtü sisteminin gerek deplasman gerekse de gerilme yönünden diğer sistemlere göre daha emniyetli tarafta olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle bu sistemin malzeme özelliğine daha uygun, statik olarak daha dengeli olduğunu söylemek mümkündür.

Anahtar Sözcükler: Kubbe, kubbeli örtü, kemer, pandantif, yarım kubbe.

STRUCTURAL BEHAVIOUR OF DOMED ROOF SYSTEMS IN TRADITIONAL ARCHITECTURAL BUILDINGS

Abstract - Domes in traditional architectures were not only used alone as covering spaces but they were also used as a various combinations of semi-domes based on larger main and flanking areas. To determine the structural behavior and the load carrying mechanisms of the monolithic systems formed main dome, arches, pendentives and semi-domes is now possible through current numerical methods based on computer-aided analysis. One of the first steps to protect the historical buildings should definitely be to understand the structural behaviour of these buildings. In this study, considering the dome system and its geometrical features of Suleymaniye Mosque in Istanbul, the theoretic roof systems with arches on four sides, arches on two sides and semi domes on two sides, semi domes on three sides and arch on one side and semi domes on four sides were statically analyzed under their dead loads by Structural Analysis Programme (SAP2000) based on finite element methods. As a result, the structural behaviour of main

¹ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta., Turkey. E-mail: mturkmen@mmf.sdu.edu.tr

² Meteoroloji Bölge Müdürlüğü, Atatürk Bulvarı, Eğirdir Yolu Üzeri, Isparta, Turkey. E-Mail: huseyin@asia.com

dome, arches, semi-domes and pendentives was determined and the structural behaviour of each system was revealed. Domes rest on four arches with the same stiffness and also supported by four semi-domes are superior to the other systems in terms of displacements and stresses. Thus, it is possible to state that this system is, considering constituting materials, suitable and statically stable.

Keywords: Dome, domed roof, arch, pendentive, semi-dome.

1. GİRİŞ

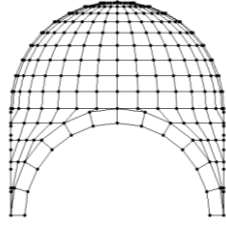
Geleneksel mimaride kubbeler, geniş ve anlamlı mekan oluşturulmasında kullanılagelen, öz ağırlık ve kar yükleri gibi düşey kuvvetleri yüzeyi içinde taşıyan, pozitif Gauss eğrilikli kabuk sistemlerin en sık kullanılagelmiş türünü oluşturmaktadır. Mekan örtüsünde tek olarak kullanıldıkları gibi, mekan genişlemesine bağlı olarak yarım kubbelerin değişik kombinasyonlarıyla beraber de kullanılmışlardır. Bu formun boyutlandırılmasının geçmişte, daha önceki örneklere ve mühendislik sezgisine dayalı olarak yapıldığı bilinmektedir.

Pozitif Gauss-Eğrilikli yüzeysel taşıyıcı olarak kubbe; sütun, lento ve kemer gibi sadece kendi düzlemindeki yükü aktarabilen yapı eleman ve strüktürlerinden tamamen farklıdır ve en az iki boyulu bir teori yardımı ile incelenebilir. Kubbe kalınlığının(h), kubbe yarıçapına(r) oranı; $h/r < 1/10$ ise, 19. Yüzyılın son çeyreğinde geliştirilen ve halen geçerli olan iki boyutlu kabuk teorisi yardımıyla, yüklerin kubbede oluşturduğu etkiler ve meydana getirdikleri iç kuvvetler, nümerik olarak elde edilebilmektedir. Bu husus her ne kadar günümüzün imkanlarıyla ortaya konulmuşsa da, bu durum, ankititeden beri kullanılmasına engel teşkil etmemiştir[1].

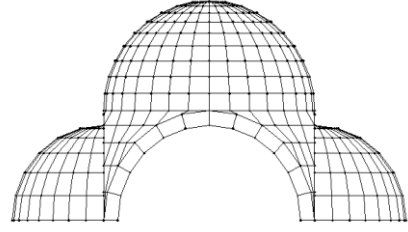
Mekan genişlemesine bağlı olarak; Ana kubbe + pandantif veya tromp + kemer + yarım kubbelerin değişik kombinasyonlarının birleşmesinden oluşan oldukça karmaşık, monolitik bir örtü sistemi olarak ortaya çıkmıştır(Şekil 1). Bu tür taşıyıcı sistemlerin yük taşıma mekanizmasını ve yapısal davranışını tespit etmek, günümüzün bilgisayarlara dayalı hesap metotları yardımıyla mümkün olabilmektedir[2].

Yüzyıllardır ayakta duran, yaşlı anıtsal yapıların korumasında atılacak ilk adımlardan biri şüphesiz, taşıyıcı strüktürlerin yapısal davranışını incelemek olmalıdır. Ancak; tarihi yapıların restorasyonunda görev alacak mimar veya mühendisin, taşıyıcı strüktürlerin yapısal davranışları hakkında yeteri kadar bilgilendirilmesi ile onarımın başarıya ulaşması sağlanabilir. Bu nedenle önemli yapıların onarım öncesi, bilimsel ve çağdaş yöntemler kullanılarak, yapısal değerlendirilmesine gidilmelidir.

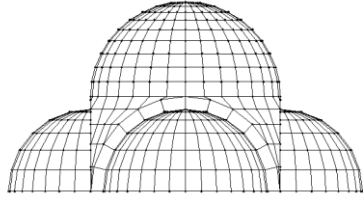
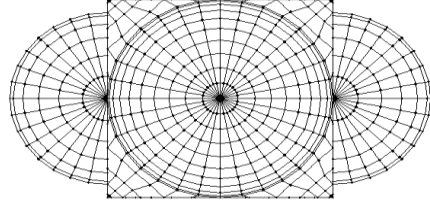
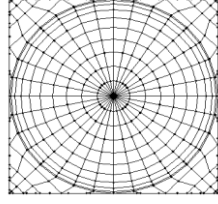
Bu çalışma; İstanbul'daki Süleymaniye Camisi örtü sistemi ile aynı ana kubbe ve kemer rijitliklerine sahip yarım kubbesiz, üç yarım kubbeli, dört yarım kubbeli teorik örtü sistemlerinin, zati yükler altında, sonlu elemanlar metoduna dayalı SAP2000 yapı analiz programıyla statik çözümlerini yapmayı hedeflemiştir. Bunda amaç; ana kubbe, kemer, yarım kubbe ve pandantif dörtlüsünün karşılıklı yapısal etkileşimini ortaya koymak, varsa kritik noktaları tespit etmek ve sistemleri birbiriyle karşılaştırmak üstünlüklerini ortaya koyarak en uygun sistemi belirlemektir.



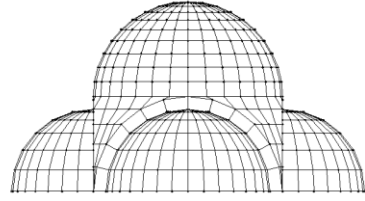
Tip1



Tip2, Tip2A



Tip3, Tip3A



Tip4

Şekil 1. Örtü sistemleri sonlu eleman modelleri

2. GELENEKSEL MİMARİDE KUBBE VE KUBBELİ ÖRTÜ SİSTEMLERİ

2.1. Genel Olarak Kubbe

Kubbelerin mekan örtüsü olarak kullanılmasının orijini hakkında kesin bilgiye sahip değiliz. Büyük boyutlu olarak ilk kez Roma devride kullanıldığı bilinmektedir. Taş ve tuğla gibi küçük yapı elemanlarından inşa edilmiş olan kubbelerin, dairesel bir zemin üzerine oturduğunu ve merkezinden geçen düşey kesitlerin daima bir kemer olduğunu söyleyebiliriz. Bununla beraber bu kemerin, kubbenin yarım küre şekline göre basık veya sivri kemer şeklinde de olabileceğini belirtmek gerekir.

Kubbeler; prensip itibariyle şekilleri icabı dairesel, muntazam çokgen ve kare planlı yapıları örtmekte kullanılan yapı örtüsüdür. Kare veya dikdörtgen planlı bir alt yapıyla oldukça güç uyum sağlar. Kubbenin uygulamadaki kolaylığa kavuşabilmesi, kare planlı bir alt yapıdan dairesel bir mekan örtüsüne geçişte kullanılan ve geçit elemanları adı verilen pandantif ve köşe kemerlerin (tromplar) kullanılması ile mümkün olmuştur.

Kubbe mesnetlerinde sürekli bir taşıyıcı yüzeye ihtiyaç vardır. Bu nedenle de dairesel bir kaideye oturması gerekir. Bu da geçit elemanlarının kullanılmasıyla sağlanmış ve kubbe, örtü sistemleri içinde ayrıcalıklı bir konuma kavuşmuştur.

Kubbeye etkiyen yüklerin dağılımı uygunsa ve kubbenin mesnedlendirme tarzı uygun seçilmişse, bir kubbe tekil yükler ve ısı yükleri hariç öz ağırlık, kar ve rüzgar gibi yayılı yükleri büyük ölçüde membran kesit kuvvetleriyle karşılayabilir. Dolayısıyla tarihi kubbeler, çekme dayanımı basınç dayanımına göre düşük olan malzemelerden yapılmış olsalar dahi, yüklerin en az bir kalınlıkla, yani en az malzeme miktarıyla, taşınabilmesine imkan sağlarlar[1].

2.2. Kubbelerde Malzeme

Geleneksel mimaride kubbe ve kubbeli örtü sistemleri Horasan kagirinden yapılmıştır. Horasan; kırılmış, öğütülmüş kiremit ve tuğla benzeri pişmiş kildir. Horasan harcı ise; Horasan ve kireç(hava kireci) ile üretilen harca denir. Bizans, Selçuklu ve Osmanlı yapılarında geniş ölçüde Horasan harcına rastlanır. 15.Yüzyıl Osmanlı yapılarında ve daha sonraki devirlerde de Horasan harcı kullanılmıştır.

Kagir, basınca belli limitlere kadar dayandığı halde, çekme dayanımı oldukça zayıf bir malzemedir. Bu nedenle, bu malzeme ile yapılan taşıyıcı strüktürlerin taşıma kapasitesi; malzeme ve strüktürün yapımındaki özene ve yapım tekniğine bağlı olduğu gibi, yapıldıktan sonra sertleşme süreci içinde çevreden gelebilecek etki şekillerine de bağlıdır.

Tarihi Horasan harçlı kagir ile labaratuvarıda üretilen Horasan harcı ve Horasan kagir üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre, strüktürün nümerik çözümlerinde kabul edilebilecek basınç emniyet dayanımının;1.2-1.8 N/mm², çekme emniyet gerilmesinin ise; 0.5 N/mm² olarak alınabileceği ve Horasan harçlı kagirin az da olsa çekme dayanımının var olduğu belirtilmektedir[3].

Gerçekte kagir malzeme; homojen ve izotrop bir yapıya sahip değildir. Bu tip yapıların oldukça karmaşık olmasından dolayı, hesaplama yöntemlerinde bazı

basitleştirmeler yapılması gerekir. Genellikle, kabul edilen temel basitleştirme malzemenin homojen ve izotrop olduğudur. Küçük gerilme değerleri için, lineer elastik davranış kabulü geçerli bir kabul olarak düşünülebilir ve aynı zamanda çekme gerilmeleri de dikkate alınabilir. Bu, çatlama ve aşırı basınç durumlarının çıktığı bölgeleri tanımlamada ve görmede çoğunlukla faydalıdır. Asıl, başlangıçta oluşturulan bir elastik modelden sonra kagir yapının davranışı tanımlanabilir[4].

3. ÖRTÜ SİSTEMLERİNİN ANALİZİ

3.1. Analizlere Esas Geometrik Boyutlar ve Malzeme Sabitleri

Çözümüne esas örtü sistemleri, Şekil 1’de görüldüğü gibi;

- **Tip1:** Merkezi ana kubbe eşit rijitlikli dört kemer üzerine oturmuş ve pandantiflerle desteklenmiş, yanlarda yarım kubbeler yoktur,
 - **Tip2:** Merkezi ana kubbe eşit rijitlikli dört kemer üzerine oturmuş ve iki yarım kubbe ile birlikte pandantiflerle desteklenmiştir,
 - **Tip2A:** Tip2’den farklı olarak, yarım kubbelerin bulunduğu taraftaki kemer rijitlikleri, diğer istikametteki kemer rijitliklerinden daha düşük, Süleymaniye’de olduğu gibi,
 - **Tip3:** Merkezi ana kubbe eşit rijitlikli dört kemer üzerine oturmuş ve üç yarım kubbe ile birlikte pandantiflerle desteklenmiştir,
 - **Tip3A:** Tip3’den farklı olarak, başta bulunan kemerin duvar içinde yer aldığı,
 - **Tip4:** Merkezi ana kubbe eşit rijitlikli dört kemer üzerine oturmuş ve dört yarım kubbe ile birlikte pandantiflerle desteklenmiştir,
- şeklinde belirlenmiştir.

Bütün örtü sistemlerinde, Süleymaniye Camisi’nin örtü sistemini oluşturan merkezi ana kubbe, kemer ve yarım kubbelerin geometrik boyutları kullanılmıştır. Bu boyutlar, kaynak [5] den bu yapı ile ilgili plan ve kesitlerden yaklaşık olarak alınmıştır.

Ana kubbe çapı 27.0 m., kalınlığı kemere bağlandığı nokta seviyesinde 85 cm., en tepe noktasında ise 40 cm. olarak alınmıştır. Bu durum, eleman kalınlıklarının 5’er cm. düşürülmesi ile sağlanmıştır. Pandantif kalınlığı benzer şekilde, en alt elemanda 1.10 m., en üst elemanda ise 90 cm. alınmıştır. Yarım kubbelerde ise en alt eleman kalınlığı 55 cm., en üst eleman kalınlığı 30 cm.’dir. Kemer yükseklikleri 1.80 m., kalınlıkları ise; eşit rijitlikli örtü sistemlerinde 2.65 m., Tip2A’da yarım kubbe ile desteklenmiş kemerlerde 2.65 m., yarım kubbesiz kemerlerde ise 3.95 m. olarak alınmıştır. Bütün sistemler için elastisite modülü $E=1.3E+07$ kN/m², poisson oranı $\nu=1/6$, birim ağırlık $w=2.20E+01$ kN/m³ olarak alınmıştır.

Analize esas örtü sistemi modelleri; kemerlerin kolonlara oturduğu seviyelerden yukarısı için kurulmuştur ve çözümlerde kabuk eleman kullanılmıştır. Bu noktalarda kemerlerin kolonlara (fıl ayakları), yarım kubbelerin ise tabanları boyunca alt konstrüksüyona mafsallı olarak bağlandıkları kabul edilmiştir. Model oluşturma ve çözüm sonuçlarında ortaya çıkabilecek karışıklıkları önlemek ve simetri avantajından yararlanmak için, geometrik formda bazı basitleştirmeler yapılmıştır.

3.2. Hesap Sonuçlarının Tanıtılması ve Değerlendirilmesi

Çözümüne esas örtü sistemleri Şekil 1 ve Şekil 2’de görüldüğü gibi, ana kubbe + kemer + pandantif + yarım kubbelerin çeşitli kombinasyonlarından oluşan monolitik bir taşıyıcı sistemdir. Bu taşıyıcı sistemlerden Tip2A, İstanbul’daki Süleymaniye Camisi örtü sisteminin Referans [5]’den alınan yaklaşık boyutlarını içerir. Teorik olarak düşünülen diğer tip örtü sistemlerinde de aynı boyutlar kullanılmıştır. Bunda amaç; zati yükler altında, örtü sistemini oluşturan elemanlar arasındaki yapısal etkileşimden hareketle, aynı geometrik boyutlara sahip örtü sistemlerini karşılaştırmaktır.

Şekil 2’de görüldüğü gibi, her bir sistemde aynı noktaları gösteren, belirli referans noktaları seçilmiştir. Bu noktaların deplasmanları değerlendirilerek sistemlerin yapısal davranışı ortaya konulmaya çalışılmıştır. Kabul edilen malzeme sabitleri ve geometrik boyutlara göre kurulmuş bulunan lineer elastik modellerin analiz sonuçları, şu anda örtü sistemindeki mevcut deformasyonu vermeyebilir. Ancak; genel davranışa ilişkin bilgi vererek, sistemin yapısal değerlendirilmesinde önemli katkıları olduğu söylenebilir.

Süleymaniye örtü sistemine ait statik çözümler, aynı kabuller altında daha önce, Kaynak [2]’de çözülmüş ve gerilme değerleri incelenmiştir. Bu çözümde de paralel sonuçlar bulunmuş ve Kaynak [3]’de verilen emniyet gerilmelerini aşmadığı gözlenmiştir. Bu açıdan, bu çalışmada örtü sistemini oluşturan elemanların deplasmanları üzerinde durulacaktır.

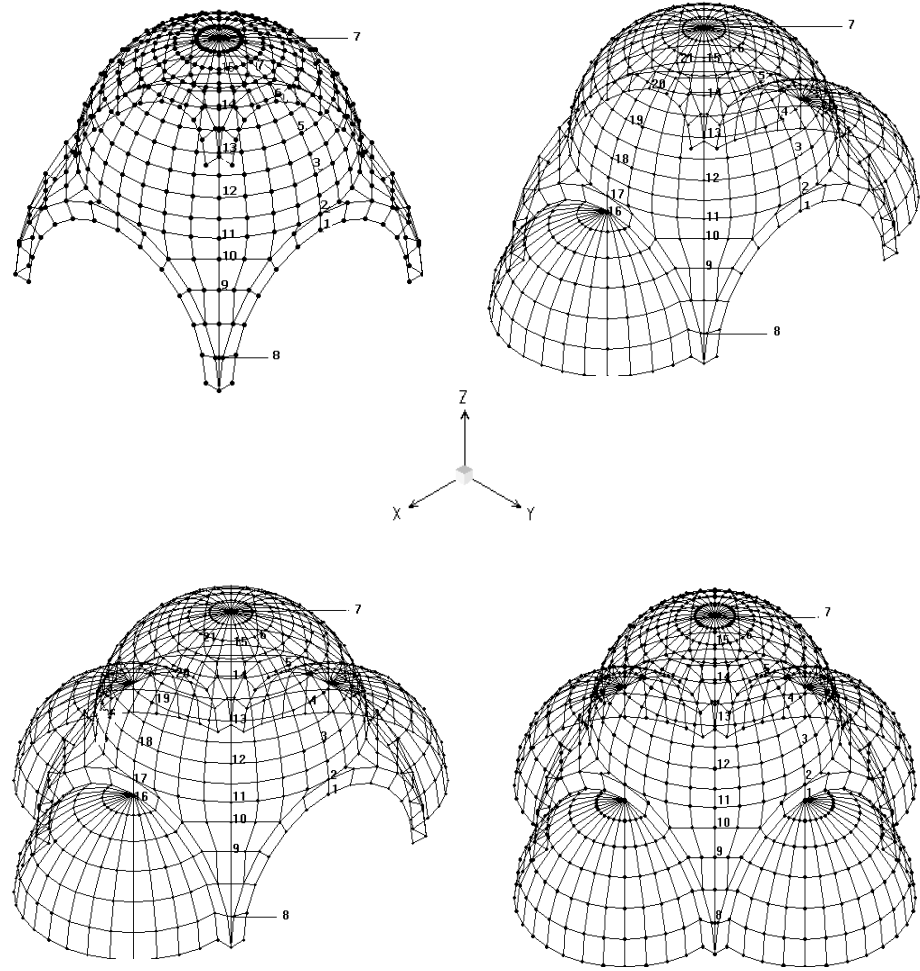
Tablo 1 ve 2’de örtü sistemlerinin seçilen referans noktalarına ait deplasman değerleri verilmiştir. Daha kolay yoruma gidebilmek için; Tip1-Tip4, Tip2-Tip2A ve Tip3-Tip3A karşılaştırması yapılmıştır.

Tip1-Tip4: Bu iki sistem tam simetriye sahiptir ve merkezi ana kubbe eşit rijitlikli dört kemere oturmaktadır. Tip1 yarım kubbesiz, Tip4 ise dört yarım kubbelidir. Tip1’de ana kubbenin tepe noktasındaki deplasman, Tablo 1’de 7 no’lu referans noktasına karşılık gelir ve 2.38 mm.’dir. Tip4’deki ise 1.91 mm olarak bulunmuştur. Kemerlerin anahtar kesitinde, ana kubbenin kemere bağlı bulunduğu noktada düşey deplasman; Tip1 için 2.15 mm. iken Tip 4 için 1.74 mm.’dir. Aynı noktalarda yanal deplasmanlar ise, Tip1’de 0.17 mm. dışarıya doğru iken Tip4’de 0.54 mm. içeriye doğru olmaktadır.

Burada yarım kubbelerin, kemerlerin dışarıya doğru olan yanal deplasmanlarını içeriye doğru yönlendirdiği ve aynı zamanda ana kubbenin tepe noktasındaki düşey deplasmanı %20 oranında azalttığı görülmüştür.

Tip2-Tip2A: Bu sistem bir yönde simetriktir. Tip2’de ana kubbeyi taşıyan dört kemer, eşit rijitliğe sahiptir. Tip2A’da ise yarım kubbesiz kemerlerin rijitlikleri artırılmıştır. Bu, kemer kalınlığı değiştirilerek sağlanmıştır. Tablo 2’den de görüleceği gibi, iki yarım kubbeli sistemlerde yarım kubbesiz kemer rijitliklerinin artırılmış olması; bu kemerlerin dışı doğru olan yanal deplasmanlarını yaklaşık %20, yarım kubbeli kemerlerin ise içeriye doğru olan deplasmanlarını yaklaşık %5, ana kubbe ve kemerlerin düşey deplasmanlarını ise %7’ye kadar azalttığı görülmüştür.

Tip3-Tip3A: Bu sistemde, Tip3 için yarım kubbesiz kemerin duvar içinde olduğu kabul edilmiş, dolayısıyla kemerin duvara iç yüzeyi boyunca mesnedlendiği kabul edilmiştir. Tip3A'da yarım kubbesiz kemerin dışarıya doğru yanıl deplasmanlarında diğer tiplere göre %15'e varan artışlar gözlenmiştir. Tip3, Tip3A'ya göre daha dengeli bir konumdadır. Tip3'de yarım kubbesiz kemerin sağ ve solunda bulunan ve bu kemere dik yarım kubbeli kemerler Tip3A'daki kemerlere göre içeriye doğru %35 daha az deplasman yapmıştır. Aynı durum düşey deplasmanda da söz konusudur. Yarım kubbesiz kemerin karşısında bu kemere paralel yarım kubbeli kemer ise; Tip3'de içeriye doğru Tip3A'ya göre %35'e varan oranda daha az deplasman yapmıştır. Bu oran düşey deplasman için ise %7 civarındadır. Ana kubbenin tepe noktasındaki deplasmanlar; Tip3'de 1.46 mm., Tip3A'da ise 2.05 mm. olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2. Örtü sistemlerinde referans alınan noktalar

Tablo 1. Tip1-Tip4 örtü sistemleri için seçilen referans noktalarındaki deplasmanlar (mm)

Ref. No	Tip 1			Tip 4		
	x	y	z	x	y	z
1	0	0.17	-2.15	0	-0.54	-1.74
2	0	-0.02	-2.15	0	-0.47	-1.74
3	0	0.12	-2.05	0	0.04	-1.61
4	0	0.07	-2.10	0	0.05	-1.65
5	0	-0.04	-2.25	0	-0.04	-1.79
6	0	-0.04	-2.34	0	-0.04	-1.87
7	0	0	-2.38	0	0	-1.91
8	0.57	0.57	-0.36	-0.39	0.39	-0.26
9	0.55	0.55	-0.64	-0.38	0.38	-0.47
10	-0.19	-0.19	-1.76	0.16	-0.16	-1.31
11	-0.52	-0.52	-2.04	0.26	-0.36	-1.49
12	-0.08	-0.08	-2.04	-0.03	0.03	-1.49
13	0.01	0.01	-2.09	-0.03	0.03	-1.60
14	-0.04	-0.04	-2.26	0.04	-0.04	-1.79
15	-0.03	-0.03	-2.34	0.03	-0.03	-1.87

Tablo 2. Tip2-Tip2A, Tip3-Tip3A örtü sistemleri için seçilen referans noktalarındaki deplasmanlar (mm)

Ref. No	Tip 2			Tip 2A			Tip 3			Tip 3A		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1	0	0.69	-1.68	0	0.55	-1.55	0	0	0	0	0.76	-1.78
2	0	0.54	-1.68	0	0.51	-1.55	0	0.10	-0.02	0	0.63	-1.78
3	0	0.46	-1.62	0	0.48	-1.48	0	0	-0.16	0	0.67	-1.70
4	0	0.22	-1.75	0	0.22	-1.61	0	-0.48	-0.50	0	0.53	-1.78
5	0	0.03	-1.96	0	0.03	-1.83	0	-0.78	-0.88	0	0.39	-1.94
6	0	-0.01	-2.09	0	-0.01	-1.96	0	-0.86	-1.20	0	0.37	-1.99
7	0	0	-2.16	0	0	-2.03	0	-0.83	-1.46	0	0.41	-2.05
8	0.42	0.56	-0.32	0.36	0.48	-0.28	0.03	0.12	-0.05	0.36	-0.36	-0.25
9	0.28	0.67	-0.56	0.24	0.63	-0.49	-0.03	0.05	-0.19	0.35	0.81	-0.54
10	-0.44	0.09	-1.55	-0.44	0.11	-1.42	-0.31	-0.23	-0.62	-0.37	0.23	-1.52
11	-0.71	-0.18	-1.78	-0.69	-0.16	-1.65	-0.38	-0.40	-0.72	-0.65	-0.02	-1.76
12	-0.18	0.12	-1.78	-0.18	0.12	-1.65	0.40	-0.42	-0.27	-0.15	0.37	-1.76
13	-0.06	0.10	-1.86	-0.05	0.10	-1.73	0.02	-0.57	-0.85	-0.03	0.43	-1.82
14	-0.04	0	-2.03	-0.07	0	-1.90	-0.02	-0.76	-1.08	-0.06	0.37	-1.97
15	-0.04	-0.01	-2.11	-0.04	-0.01	-1.98	-0.01	-0.84	-1.27	-0.04	0.38	-2.03
16	-0.98	0	-2.22	-0.94	0	2.09	-0.53	-0.21	-1.41	-0.78	0.24	-2.00
17	-1.00	0	-2.22	-0.97	0	-2.09	-0.49	-0.26	-1.40	-0.76	0.25	-1.99
18	-0.30	0	-2.06	-0.30	0	-1.93	-0.03	-0.40	-1.30	-0.14	0.30	-1.85
19	-0.10	0	-2.02	-0.10	0	-1.89	0.03	-0.56	-1.30	-0.03	0.35	-1.85
20	-0.11	0	-2.06	-0.11	0	-1.98	-0.01	-0.70	-1.38	-0.08	0.38	-1.96
21	-0.06	0	-2.13	-0.06	0	-2.01	-0.02	-0.80	-1.42	-0.05	0.40	-2.02

4. SONUÇLAR

Tip1: Ana kubbeyi taşıyan kemer rijitliklerinin eşit olması nedeniyle dışarıya doğru olan yanal hareket her birinde eşittir. Aynı durum, kemerlerin düşey deplasmanları için de geçerlidir. Kemerlerdeki dışa doğru yanal ve düşey hareket, ana kubbenin tepe noktasındaki düşey deplasmanı diğer tiplere göre artırmaktadır.

Tip2-Tip2A: Yarım kubbeli kemerlerde yanal hareket içeri doğruyken, yarım kubbesizlerde dışarıya doğru oluşmaktadır. Yarım kubbesiz kemer rijitlikleri artırıldığında dışarıya doğru olan yanal hareketlerde azalmalar olmaktadır.

Tip3-Tip3A: Bu tipte yarım kubbesiz kemerin, duvar içinde yer alması ve iç yüzeyi boyunca duvara oturması durumunda; ana kubbe ve diğer kemerlerin deplasmanlarında azalmalar olmaktadır. Bu kemer duvarla desteklenmediği durumda ise; diğer kemerlerin içeriye doğru olan yanal hareketleri artmaktadır.

Tip4: Tip1'in aksine ana kubbeyi taşıyan kemerler içeriye doğru yanal deplasman yapmaktadır.

Sistemlerin gerilme konturları incelendiğinde kaynak [3]'de verilen gerilme değerlerinin genel olarak aşılmadığı görülmüştür. Çekme gerilmelerinin en yoğun olduğu bölgeler, pandantiflerin kemerlerin kesişim noktalarına yakın bölgelerinde; basınç gerilmelerinin ise, yine pandantiflerin ana kubbe ile birleştiği bölgelerinde oluşmuştur.

Merkezi kubbesi dört eşit rijitlikli kemere oturan, yarım kubbesiz sistemin gerek ana kubbe tepe noktasında gerekse de kemerlerindeki düşey deplasmanlar diğer tiplere göre daha fazladır. Ancak; yalın, karmaşık olmayan bir sistem olarak ortaya çıkmaktadır. Merkezi kubbesi dört eşit rijitlikli kemere oturan, dört yarım kubbeli örtü sistemi, deplasman ve gerilme yönünden diğer sistemlere göre daha emniyetli taraftadır. Bu nedenle, bu sistemin malzeme özelliğine daha uygun, statik olarak daha dengeli olduğunu söylemek mümkündür.

KAYNAKLAR

1. Mungan İ. (1987) *Mimar Sinan ve Kubbe Statiği*. (Bildiri). M.S.Ü., İstanbul.
2. Türkmen M. (1994) *Ayasofya, Süleymaniye, Şehzade ve Mihrimah Tipi Cami Örtülerinde Yük Aktarımının Sonlu Elemanlar Metoduyla Çözümünü İrdelenmesi*. (Doktora Tezi). M.S.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü.
3. Akman M. S., Güner A., Aksoy İ. H. (1986) *Horasan Harcı ve Betonun Tarihi ve Teknik Özellikleri*. II. Uluslar Arası Türk-İslam Kongresi, İ.T.Ü., İstanbul.
4. Bartoli G. & Blasi C. *Masonry Structures, Historical Buildings and Monuments*. Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Firenze, I-50139 Firenze, Italy.
5. Çamlıbel N. (1988) *Sinan Mimarlığında Strüktürün Analitik İncelenmesi*. Y.T.Ü. Mimarlık Fakültesi, İstanbul.

6. *Domes From Antiquity To The Present.* (1988). Proceedings of the IASS-MSU International Symposium, İstanbul, Turkey.
7. Salvadori M., Heller R. (1975). *Structure In Architecture.* Prentice-Hall International Series in Architecture. Printed in United States of America.