

MİMAR SİNAN YAPILARINDA KUBBELİ ÖRTÜ SİSTEMLERİNİN YAPISAL ANALİZİ

Hüseyin BİLGİN

Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, DENİZLİ

huseyibilgin@gmail.com

ÖZET: Sinan yapılarında kubbeler, mekan örtüsünde tek olarak kullanıldıkları gibi mekan genişlemesine bağlı olarak yarım kubbelerin çeşitli kombinasyonlarıyla beraber de kullanılmıştır. Bununla birlikte, Mimar Sinan, genç yaşta ana kubbe + kemer + pandantif + yarım kubbelerin sentezi olan mükemmel bir taşıyıcı sistem geliştirmiştir. Oluşan bu monolitik sistemin yapısal davranışı oldukça karmaşıktır. Bu yüzden, sistemin yük taşıma mekanizmasını ve yapısal davranışını tespit etmek, günümüzün bilgisayara dayalı hesap metotları yardımıyla mümkün olabilmektedir. Çalışmada, "SAP2000" yapısal analiz programı kullanılarak, Mimar Sinan'ın önemli bazı camilerinden dörtgen mesnet sistemi ile desteklenen; Mihrimah Sultan/Edirnekapı, Süleymaniye, Mihrimah Sultan/Üsküdar, Şehzade Mehmed; altıgen mesnet sistemi ile desteklenen; Karaahmetpaşa, Sokullu Mehmet Paşa/Kadirga; sekizgen mesnet sistemi ile desteklenen; Sokullu Mehmet Paşa/Azapkapı ve Selimiye camileri mekân örtülerinin zati ağırlıkları altında analizleri yapılmıştır. Tüm modeller, modellemede ve çözüm sonuçlarında ortaya çıkabilecek karışıklıkları önlemek amacıyla kemerlerin kolonlara oturduğu seviyelerden yukarısı için kurulmuştur. Çözüm sonunda, ana kubbe, kemer, yarım kubbe ve pandantif dörtlüsünün karşılıklı yapısal etkileşimi belirlenmiş ve her bir sisteminin yapısal davranışı sayısal olarak ortaya konulmuştur. Altıgen ve sekizgen destek sistemi ile desteklenmiş yapıların gerek deplasman gerekse gerilme dağılımı bakımından diğer sistemlere göre daha emniyetli tarafta kaldığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mimar Sinan, Kubbe, Pandantif, Kemer

Structural Analysis of Domed Roof Systems in Architect Sinan's Works

ABSTRACT: Domes in historical buildings by Architect Sinan 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. On the other hand, Sinan, in the early years of his profession, improved a system based on the mixture of perfectly developed main domes, pendentives, arches and semi-domes. The behavior of this monolithic system is quite complex. Therefore, to determine the structural behavior and the load 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. In this study, considering the superstructure of Sinan's important mosques, Mihrimah Sultan/Edirnekapı, Süleymaniye, Mihrimah Sultan/Üsküdar, Şehzade Mehmed mosques supported by square support system, Karaahmetpaşa, Sokullu Mehmet Paşa/Kadirga mosques supported by hexagonal support system, Sokullu Mehmet Paşa/Azapkapı and Selimiye mosques supported by octagonal support system were statically analyzed under their dead loads by Structural Analysis Programme (SAP2000) based on finite element methods. To avoid the confusion, which may come out in modeling and analyzing domed roof systems, the models of all space coves have been established for the upper levels of arches resting on columns. As a result, the structural behavior of main dome, arches, pendentives and semi-domes was determined and the structural behavior of each system was numerically revealed. Domes rested on hexagonal and octagonal support systems are superior to other systems in terms of displacements and stresses.

Keywords: Architect Sinan, Dome, Pendentive, Arch

GİRİŞ

Geçmişin kültür ve sanat birikimlerinin somut bir simgesi olan geleneksel yapıların korunmasına ve restorasyonuna verilecek önem, bugün artık tartışılmaz bir uygarlık ölçüsü haline gelmiştir. Bu yapıların korunması, geçmiş ile günümüz arasındaki kültürel mirasın korunması anlamına gelir, ki bu da bu yapılara sahip çıkıp, korumakla mümkün olabilir. Bu yapıların korunmasında atılacak ilk adım şüphesiz, taşıyıcı strüktürlerin yapısal davranışını anlamak olmalıdır.

Geleneksel mimaride kubbeler, geniş ve anlamlı mekân oluşturulmasında kullanılagelen, kendi ağırlığı yanında kar, rüzgar, deprem, sıcaklık değişimi ve zemin oturması gibi çevreden gelecek tesirleri yüzeyi içinde taşıyan pozitif Gauss eğrilikli sistemlerin en sık kullanılagelen türünü oluşturmaktadır (Türkmen ve Bilgin, 2002).

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 boyutlu bir teori yardımı ile incelenebilir. 19. Yüzyılın son çeyreğinde geliştirilen ve halen geçerli olan iki boyutlu teori yardımıyla, yüklerin kubbede oluşturduğu etkiler ve meydana getirdikleri iç kuvvetler, nümerik olarak elde edilebilmektedir (Mungan, 1987).

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. Bu tür taşıyıcı sistemlerin yük taşıma mekanizmasını ve yapısal davranışını tespit etmek, günümüzün bilgisayarlara dayalı hesap metotları yardımıyla mümkün olabilmektedir.

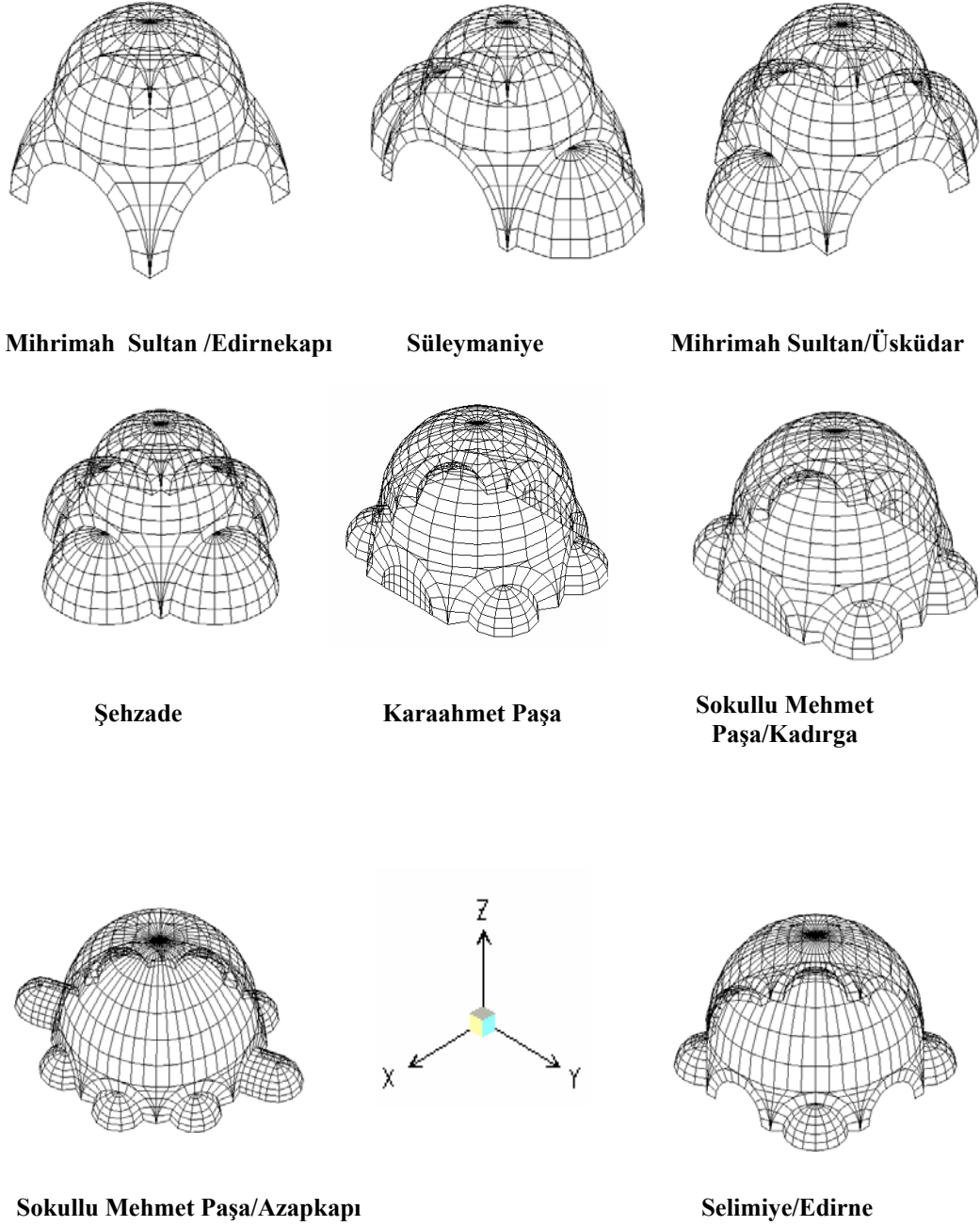
Bu çalışmada, Mimar Sinan'ın önemli bazı camilerinden dörtgen mesnet sistemi ile desteklenen Mihrimah Sultan/Edirnekapı, Süleymaniye, Mihrimah Sultan/Üsküdar,

Şehzade Mehmed, altıgen mesnet sistemi ile desteklenen: Karaahmetpaşa, Sokullu Mehmet Paşa/Kadırga, sekizgen mesnet sistemi ile desteklenen Sokullu Mehmet Paşa/Azapkapı ve Selimiye camileri mekân örtülerinin zati ağırlıkları altında, sonlu elemanlar metoduna dayalı "SAP2000" yapısal analiz programıyla statik çözümlerinin yapılması ve sonuçlarının değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Tüm modeller, modellemede ve çözüm sonuçlarında ortaya çıkabilecek karışıklıkları önlemek amacıyla kemerlerin kolonlara oturduğu seviyelerden yukarıya için kurulmuştur. Çözüm sonucunda, ana kubbe, kemer, yarım kubbe ve pandantif dörtlüsünün karşılıklı yapısal etkileşimi belirlenmiş ve her bir sistemin yapısal davranışı sayısal olarak ortaya konulmuştur.

Genel Olarak Kubbe

Sinan mimarlığında kubbe, yapının ağırlık merkezini oluşturur. Tüm yapı strüktürü kubbenin mesnetlenmesi ve desteklenmesi doğrultusunda biçimlenir. Usta zekası ve mimari üretkenliğini birleştirip mükemmel bir kombinasyon kurarak, geleneksel mimaride bir ekol olmayı başaran Sinan, kubbeyi cami, hamam, türbe ve benzeri yapılarda kullanmıştır.

Ana kubbe çevresinde merkezlenmiş olan Sinan'ın yapılarının üst yapısını göz önüne alırsak, destekleyici elemanlar ve alt seviyedeki yardımcı elemanlar vasıtasıyla çeşitli yapısal seviyelerden geçerek, kubbenin yükleri ve kubbeden gelen kuvvetlerin iletiği mesnet yapısal sistemi tanımlanabilir. Sinan eserlerinde kare, altıgen, sekizgen olmak üzere üç çeşit kubbe destek sistemi kullanmış ve hayatı boyunca kazandırdığı eserlerinde, kare ve altıgen mesnet sisteminin dört, sekizgen mesnet sisteminin üç farklı çeşidini kullanmıştır.



Şekil 1. Kubbeli mekan örtü sistemlerinin sonlu eleman modelleri.

Figure 1. Finite element models of domed roof systems.

SİNAN YAPILARINDA KUBBE VE KUBBELİ ÖRTÜ SİSTEMLERİ

Kubbenin Yük Taşıma Mekanizması

Uzay yüzeysel taşıyıcı olarak kubbe, kare, çokgen ve dairesel planlı yapıları örtmekte kullanılır. Kubbeler, kendi ağırlıkları ve kar yükleri gibi düşey kuvvetleri yüzeyleri boyunca

taşıyan, düzgün eğri yüzeyle birer taşıyıcıdır. Tarihi yapılarda malzeme kâgirdir. Taşıma ilkesi yükün en tepedeki kilit taşından başlayarak komşu taşlara aktarıla aktarıla kubbenin tabanına iletilmesine dayanır. Bu sebeple kubbe tabanına gelindiğinde yükün yatay ve dikey bileşenleri söz konusu olacaktır. Dikey bileşen, kubbeyi tutan kemer, duvar gibi elemanlarla

zemine aktarılır. Yatay bileşen de, ciddi boyutlardaysa kubbe bir gergiyle desteklenir.

Sinan kubbeyi, değişik yapım teknikleri ile cami, medrese, hamam ve türbe yapılarında kullanmıştır. Bu yapı elemanı yüklerini, kalınlığı boyunca düzgün olarak yayılan ve ortalama yüzeye paralel olarak tesir eden iç kuvvetler yardımı ile taşır. Yüklerin kubbe üzerinde etkisi ve meydana getirdikleri iç kuvvetler, günümüzde kabuk teorisi yardımı ile teorik ve nümerik olarak hesaplanabilmektedir.

Kubbeye etkileyen yüklerin dağılımı uygunsa ve kubbenin mesnedlendirme tarzı uygun seçilmişse, bir kubbe tekil yükler ve sıcaklık etkileri hariç öz ağırlık, kar ve rüzgar gibi yayılı yükleri büyük ölçüde membran kesit kuvvetleriyle karşılayabilir (Mungan, 1987). 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.

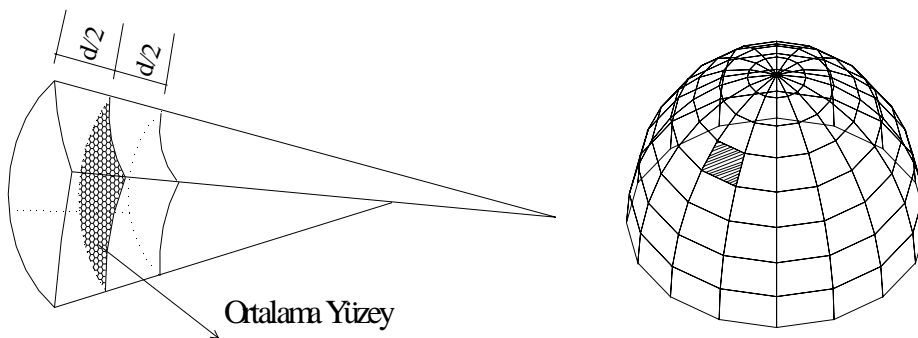
Sinan Kubbelerinde Malzeme

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. Sinan strüktüründe kubbe, tonoz ve kemerler, horasan kâgirinden; duvar ve ayaklar, taştan oluşur.

Doğal taş veya pişmiş toprağın (tuğlanın), bağlayıcı bir harçla birlikte kullanılması ile elde edilen malzemeye "kâgir" denir. Kâgir, 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. Kâgir malzeme homojen bir malzeme olmayıp heterojen özellik gösterir. Birim hacim ağırlığı, $\gamma = 2.1 \sim 2.2 \text{ t/m}^3$ arasında değişmektedir.

Tarihi Horasan harçlı kagir ile laboratuarda üretilen elemanlar 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 (Tablo 1.).



Şekil 2. Kabuk orta yüzeyi.
Figure 2. Middle surface of the shell.

Tablo 1. Kabul edilebilecek maksimum emniyet gerilmeleri (Akman vd., 1986).

Table 1. Maximum allowable stresses (Akman vd., 1986).

Basınç Emniyet Gerilmesi (N/mm ²)	3.84~4.90	1.20~1.80 (*)
Çekme Emniyet Gerilmesi (N/mm ²)	1.71	0.50 (*)

(*) Güvenlik sayısı (G_s) = 3 alındığında, hesaplarda kabul edilebilecek maksimum basınç ve çekme emniyet gerilmeleri.

Deneylerden görüleceği üzere, tarihi kubbelerin yapımında kullanılan Horasan harçlı kâgirin az da olsa çekme dayanımının var olduğu anlaşılmaktadır. Sinan devri kubbelerinde belirgin çatlamalara rastlanmaması da bunu kanıtlamaktadır.

Gerçekte kâgir 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 (Bartoli ve Blasi, 1997).

ÖRTÜ SİTEMLERİNİN ANALİZİ VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Analize Esas Örtü Sistemlerinin Geometrik Boyutları ve Malzeme Sabitleri

Ana kubbe çevresinde merkezleşmiş olan Sinan yapılarının üst yapısını gözönüne alırsak, destekleyici elemanlar ve belli seviyelerdeki yardımcı elemanlar yoluyla çeşitli yapısal seviyelerden geçerek, ana kubbe yüklerinin ve kubbeden gelen kuvvetlerin iletiildiği mesnet yapısal sistemi tanımlanabilir. Bu çalışmaya

konu olan tarihi yapılarda, örtü sistemleri modellenirken, tüm örtü sistemi modellenmemiştir. Sadece ana mekânı örten elemanlar ile bu örtü elemanlarının oturduğu kemer-duvar sistemi ve bu seviyedeki yarım kubbeler modellenerek, zati ağırlıkları altında statik analizleri yapılmıştır. Tüm örtü sistemlerinin modellerinde, kemerlerin kolonlara oturduğu seviyelerin yukarısı gözönüne alınmıştır. Bu noktalarda kemerlerin, kolonlara, yarım kubbelerin ise alt konstrüksiyona mafsallı olarak bağlandıkları kabul edilmiştir. Daha alt seviyelerde, mekân genişlemesine bağlı olarak gelişen tali örtü elemanları modellemeye dahil edilmemiştir.

Çözümüne esas yapıların örtü sistemlerinin ana kubbesi kare, altıgen ve sekizgen destek sistemi türünde olup, ana kubbe + kemer + pandantif + yarım kubbelerin çeşitli kombinasyonlarından oluşan monolitik bir taşıyıcı sistemdir.

Kemer ve yarım kubbelerin, alt konstrüksiyona mafsallı olarak bağlandıkları kabul edilmiş, modellemelerde simetriden faydalanılmıştır. Bu çalışmada incelenen tüm örtü sistemleri için, elastisite modülü; $1.30E+07$ kN/m², poisson oranı $\nu=1/6$, birim hacim ağırlık $w=2.20+01$ kN/m³ olarak alınmıştır.

Örtü sistemlerinin geometrik boyutları, ilgili kaynaktan bu yapılar için verilen plan ve kesitlerden alınmıştır (Çamlıbel, 1988). Örtü sistemlerine ait geometrik büyüklükler ve her bir örtü sisteminin modellenmesinde kullanılan sonlu eleman sayısı Tablo 2. ve 3.'te verilmiştir.

Tablo 2. Dörtgen destek sistemi ile desteklenen cami örtü sistemleri için geometrik özellikler (Çamlıbel, 1988).

Table 2. Geometrical features of domed roof systems supported with square support systems (Çamlıbel, 1988).

Elemanlar	Cami Adı	Mihrimah /Edirnekapı	Süleymaniye	Mihrimah /Üsküdar	Şehzade
Ana Kubbe Çapı (m)		20.0	26.0	11.0	19.0
Kemer Kalınlıkları/Y.Kubbesiz (m)		1.60	3.95	1.60	-
Kemer Kalınlıkları/Y.Kubbeli (m)		-	2.65	1.60	2.12
Kemer Yükseklikleri (m)		2.40	1.80	1.50	1.60
Ort. Ana Kubbe Kalınlığı (m)		0.60	0.60	0.38	0.50
Ort. Yarım Kubbe Kalınlıkları (m)		-	0.45	0.30	0.40
Ort. Pandantif Kalınlıkları (m)		1.00	1.00	0.70	0.90
Kullanılan Sonlu Eleman Sayısı		336	432	552	624

Tablo 3. Altıgen ve sekizgen destek sistemi ile desteklenen örtü sistemleri için geometrik özellikler (Çamlıbel, 1988).

Table 3. Geometrical features of domed roof systems supported with hexagonal and octagonal support systems (Çamlıbel, 1988).

Cami Adı Elemanlar	Karaahmet Paşa	Sokullu /Kadırga	Sokulu /Azapkapı	Selimiye
Ana Kubbe Çapı (m)	12.50	12.80	20.60	31.50
Kemer Kalınlıkları/Y.Kubbesiz (m)	1.50	0.90	1.60	2.35
Kemer Kalınlıkları/Y.Kubbeli (m)	1.50	0.90	1.60	2.35
Kemer Yükseklikleri (m)	1.15	1.50	2.05	1.80
Ortalama Ana Kubbe Kalınlığı (m)	0.40	0.40	0.45	0.60
Ort. Yarım Kubbe Kalınlıkları (m)	0.30	0.30	0.35	0.40
Ort. Pandantif Kalınlıkları (m)	0.70	0.70	0.90	1.00
Kullanılan Sonlu Eleman Sayısı	504	504	944	816

Hesap Sonuçlarının Tanıtılması ve Değerlendirilmesi

Mimar Sinan'ın önemli bazı yapılarına ait mekân örtü sistemlerinin, olması muhtemel strüktür zorlanmalarını araştırmak amacıyla, zati yükleri altında statik çözümleri yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmeye çalışılmıştır.

Analizin yapılmasında evvela, plan ve kesitler üzerinden geometrik boyutları okunan örtü sistemlerine ait geometrik modeller SAP2000 programında kabuk (shell) elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Programın analizde kullanacağı malzeme özelliklerine ait bilgiler ve yükler girilmiş ve böylelikle lineer statik bir analiz için gerekli bilgiler hazırlanmıştır. Daha sonra analizi yapılan her bir modele ait sonuçlar irdelenerek Tablo 4. ve 5.'de sunulmuştur. Analizdeki aşamalara ait geometrik özelliklerin tanıtılması, malzeme özellikleri, yüklerin tanımlanması ve analiz aşamalarına ait görüntüler Şekil 3.'de verilmektedir.

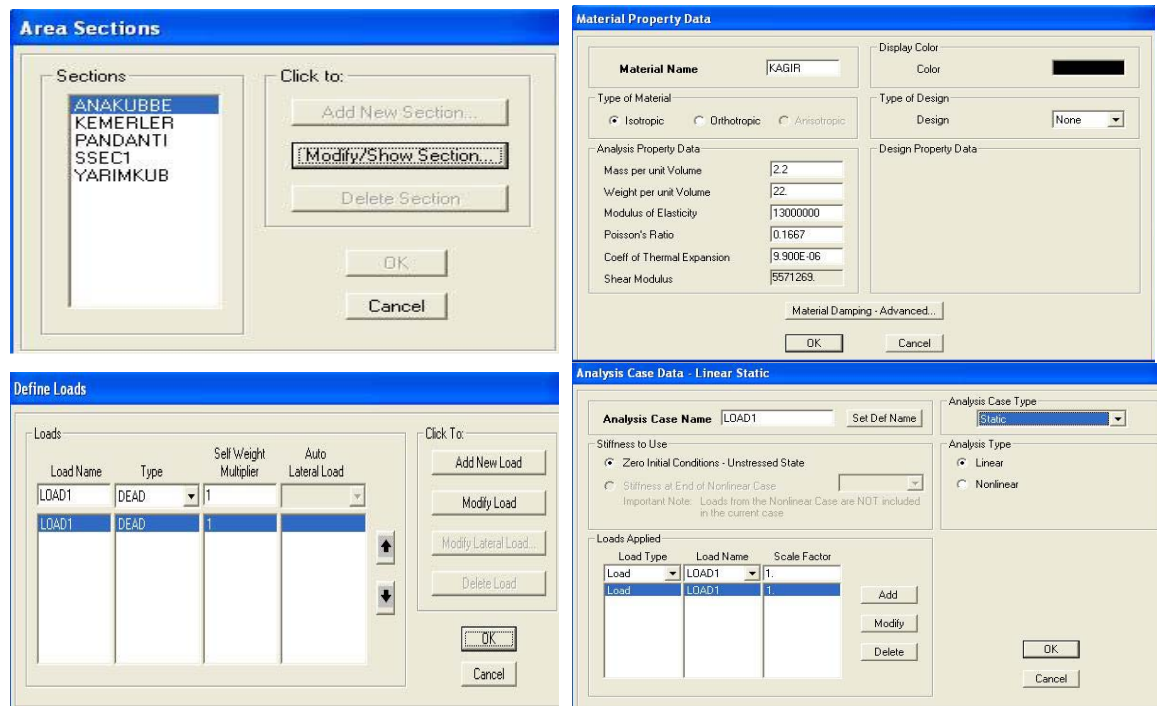
Sonuçların değerlendirilmesinde, kemerlerin anahtar kesitlerindeki yanal ve düşey deplasmanlar ile gerilmeler; pandantiflerde sadece gerilmeler; ana kubbede ise, tepe noktasındaki deplasmanlar ve maksimum basınç ve çekme gerilmelerinin olduğu bölgeler belirlenmiştir.

Kâgir malzemeden yapılmış tarihi yapılarda güvenliği oluşturan iki özellik aranır;

- Yükler etkisi altında taşıyıcı elemanlarda oluşan maksimum basınç gerilmelerinin malzemenin basınç emniyet gerilmesini geçmemesi gerekir,
- Taşıyıcı elemanlarda oluşan çekme gerilmelerinin çatlama oluşturacak mertebelere ulaşmamış olması gerekir.

Bu durum taşıyıcı elemanın geometrisi ile ilgili bir özellik olup, Mimar Sinan'ın yapılarında en uygun biçimde gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarından bulunan maksimum gerilmeler, Tablo 1'de verilen emniyet gerilmeleri ile karşılaştırılmış, cami örtü sistemlerinin belli bir güvenliğe sahip olduğu görülmüştür.

Tablo 2. ve 3'te verilen malzeme sabitleri ve geometrik boyutlara göre kurulmuş lineer elâstik modellerin statik analizlerinden elde edilen sonuçlar, bugünkü mevcut deformasyonu vermeyebilir. Bununla birlikte; genel gerilme dağılımına ait bilgiler verilerek, örtü sistemlerinin yapısal davranışlarının yorumlanmasında faydalı olacağını söylemek mümkündür.



Şekil 3. Modelleme aşamaları

Figure 3. Modelling stages

Tablo 4. Analiz sonuçlarından elde edilen maksimum gerilmeler (basınç, çekme) (N/mm²).Table 4. Maximum stresses obtained from analysis results (compression, tension) (N/mm²).

Yapı Adı	Kemer		Pandantif		Ana kubbe	
	Öbasınç	Öçekme	Öbasınç	Öçekme	Öbasınç	Öçekme
Mihrimah Sultan/Edirnekapı	0.41	0.34	0.69	0.64	0.52	0.10
Süleymaniye	0.48	0.46	0.80	0.95	0.79	0.51
Mihrimah Sultan/Üsküdar	0.22	0.11	0.18	0.17	0.18	0.05
Şehzade	0.41	0.24	0.49	0.33	0.49	0.22
Karaahmetpaşa	0.07	0.08	0.08	0.10	0.10	0.06
Sokullu/Kadırga	0.06	0.10	0.06	0.07	0.11	0.08
Sokullu/Azapkapı	0.08	0.12	0.07	0.12	0.18	0.13
Selimiye	0.36	0.23	0.13	0.27	0.28	0.24

Tablo 5. Analiz sonuçlarından elde edilen maksimum deplasman değerleri (mm.).

Table 5. Maximum displacement values obtained from analysis results (mm.).

Yapı Adı	Kemer Anahtar Kesiti						Ana Kubbe
	Yarım Kubbeli			Yarım Kubbesiz			
	Düşey	İçe	Dışa	Düşey	İçe	Dışa	
Mihrimah Sultan/Edirnekapı	-	-	-	0.75	-	0.20	0.96
Süleymaniye	1.78	0.78	-	1.34	-	0.78	1.84
Mihrimah Sultan/Üsküdar	0.14	0.01	-	0.15	-	0.02	0.21
Şehzade	0.67	0.21	-	-	-	-	0.80
Karaahmetpaşa	0.05	0.01	-	0.02	-	0.03	0.13
Sokullu/Kadırga	0.05	0.03	-	0.03	-	0.05	0.16
Sokullu/Azapkapı	0.09	0.02	-	-	-	-	0.39
Selimiye	0.29	-	-	0.29	-	-	1.02

Mihrimah Sultan/Edirnakapı Camisi örtü sisteminde, ana kubbe ve kemerlerde oluşan gerilmeler ile deplasmanlar sistemin stabilitesini bozacak mertebede değildir. Ancak pandantifte, Tablo 1'de 0.5 N/mm^2 olarak verilen çekme emniyet gerilme değeri az da olsa aşılmıştır. Bu bölgede, güvenlik sayısı düşmekte ve kemer eksenlerine paralel çatlakların oluşması ihtimali bulunmaktadır.

Süleymaniye Camisi örtü sisteminde ana kubbe ve kemerlerde oluşan gerilmeler ile deplasmanlar sistemin stabilitesini bozacak mertebede değildir. Ancak pandantifin orta bölgesinde maksimum çekme gerilmesi değerinin, Tablo 1'de 0.5 N/mm^2 olarak verilen çekme emniyet gerilme değerinden yüksek olduğu görülmüştür. Bu bölgede, güvenlik sayısı 3'ün altına düşmekte ve kemer eksenlerine paralel çatlakların oluşması ihtimali bulunmaktadır.

Mihrimah Sultan/Üsküdar Camisi örtü sisteminde ana kubbe, kemerler ve pandantiflerde oluşan gerilmeler ile deplasmanlar, sistemin stabilitesini bozacak mertebede olmayıp, Tablo 1'de verilen değerlerin çok altındadır.

Şehzade Camisi örtü sisteminde ana kubbe, kemer ve pandantiflerde oluşan gerilmeler ile deplasmanlar, sistemin stabilitesini bozacak mertebede olmayıp, Tablo 1'de verilen değerlerin altındadır. Dört eşit rijitlikli kemere oturan dört yarım kubbeli bu örtü sistemi gerek gerilme, gerekse deplasman yönünden diğer dörtgen destek sistemi ile desteklenen camilere oranla daha emniyetli taraftadır. Böylelikle, bu sistemin malzeme özelliğine daha uygun, statik olarak daha dengeli olduğunu söylemek mümkündür.

Altıgen mesnet sistemi ile desteklenmiş olan Karahmetpaşa ve Sokullu Mehmet Paşa/Kadırğa Camisi örtü sistemlerinde, ana kubbe, kemer ve pandantiflerde oluşan gerilmeler ile deplasmanlar sistemin stabilitesini bozacak mertebede olmayıp, Tablo 1'de verilen değerlerin çok altındadır.

Sekizgen mesnet sistemi ile desteklenmiş Sokullu Mehmet Paşa/Azapkapı Camisi örtü sisteminde ana kubbe, kemer ve pandantiflerde oluşan gerilmeler ile deplasmanlar, sistemin

stabilitesini bozacak mertebede olmayıp, düzgün bir gerilme yayılımı mevcuttur.

Sekizgen mesnet sistemi ile desteklenmiş Selimiye Camisi, 31.50 m.'lik çapla en büyük ana kubbeli örtü sistemine sahiptir. Ana kubbe çapı bu kadar büyük olmasına rağmen, ana kubbe, kemerler ve pandantiflerde oluşan gerilmeler ile deplasmanlar sistemin stabilitesini bozacak mertebede olmayıp, düzgün bir gerilme yayılımı mevcuttur. 1575'de Edirne'de tamamlanan bu eser, Osmanlılar tarafından yapılan en büyük kubbeli camidir. Kubbe, 15'er metre açıklıklı sekiz askı kemerine oturmuştur. Açık ki, daha az kemerle desteklenen bir sisteme göre bu yapı, daha az yapısal problemlerle karşılaşır. Analiz sonuçları da, bu kabulü desteklemektedir.

Analiz sonuçlarından da görüleceği üzere, incelenen Sinan mekân örtü sistemleri, gerek malzeme seçimi gerekse statik ve stabilite bakımından günümüz standartlarına uygun yapılar. Kubbe strüktürü sade, geometrisi düzgün, alt yapıya mesnetlendirilmesi çevre boyunca üniformdur.

Pendantifler gerilmelerin en yüksek olduğu bölgeler olarak tespit edilmiştir. Orta bölgeleri çekme gerilmelerinin, ana kubbeye mesnetlendiği üst bölgeleri ise basınç gerilmelerinin yoğunlaştığı kısımlardır. Çekme gerilmelerin fazla olduğu bu bölgelerde kemer eksenlerine paralel çatlakların oluşması muhtemeldir.

Sinan mekânlarını örten ana kubbelere bağlı yarım kubbeler ise, genelde kubbe mesnetlerindeki yanal itki kuvvetlerini alan elemanlar olmayıp, ancak mekân örtü elemanları niteliğindedir. Bu elemanlar, ancak kubbe mesnedinin iki doğrultudaki stabilitesini sağlayan elemanlardır. Bu durumda yarım kubbeler çok rijit askı kemerlerine mesnetlendirilirse stabilite elemanları olarak çalışacak ve kemer düzlemine dik doğrultudaki dönmeleri önleyebilecektir. Ayasofya'da olduğu gibi, çok rijit olmayan bir kemere bağlanmaları sonucu kemer yükleri ile yüklenirse, membran teorisine uymayan gerilmeler etkisi ile çatlayarak kemerlerin stabilitesini bozabilir (Çamlıbel, 1988).

Statik analizleri yapılan Sinan örtü sistemlerine ait taşıyıcı strüktürlerin, statik olarak oldukça

dengeli olduğu, ortaya çıkan gerilmelerin yapı stabilitesini bozacak mertebelerde olmadığı saptanmıştır. Bu da Sinan'ın mimar olduğu kadar, deneyimden gelen bir bilgi birikimine ve güçlü bir mühendislik sezgisine sahip olduğunu

ortaya koymaktadır. Bununla beraber, yapılardaki malzemelerin belirli limitlere kadar çekme gerilmelerini karşılayabildiği ve bu yönden de, Sinan'ın devrin yapı malzemesini en uygun biçimde kullandığı anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

- Bartoli G., Blasi C., 1997., "Masonry Structures, Historical Buildings and Monuments". In: Advances in Earthquake Engineering (Volume 3), Computer Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures. (Beskos, D. E., Anagnostopoulos, S. A., eds) Computational Mechanics Publications, I-50139, Southampton UK, Boston USA.
- Çamlıbel, N., 1998., "Sinan Mimarlığında Strüktürün Analitik İncelenmesi"; Yıldız Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Yay., İstanbul, 630s.
- Giordano, A., Mele, E., De Luca, A., 2002., "Modelling of historical masonry structures: comparison of different approaches through a case study"; Elsevier, Engineering Structures. 24 (2002), 1057-1069.
- Güngör, I. H., 1988., "The Dome in Sinan's Works"; In: Proceedings of the IASS-MSU International Symposium, pp. 61-92, İstanbul, Turkey.
- Karaesmen, E., Ünay, A. İ., 1988., "A Study of Structural Aspects of Domed Buildings with Emphasis on Sinan's Mosques"; In: Proceedings of the IASS-MSU International Symposium, pp. 93-104, İstanbul, Turkey.
- Koçak, A., 1999., "Tarihi Yapıların Statik ve Dinamik Yükler Altında Lineer ve Non-Lineer Analizi; Küçük Ayasofya Örneği"; Yıldız Teknik Üniversitesi FBE, Doktora Tezi, 330s, İstanbul.
- Mungan, İ., 1987., "Mimar Sinan ve Kubbe Statiği"; (Yayımlandı). Mimar Sinan Üniversitesi, İstanbul.
- Mungan, İ., 1988., "The Structural Development of the Ottoman Dome with Emphasis on Sinan"; In: Proceedings of the IASS-MSU International Symposium, pp. 105-114, İstanbul, Turkey.
- Türkmen, M., 1994. "Ayasofya, Süleymaniye, Şehzade ve Mihrimah Tipi Cami Örtülerinde Yük Aktarımının Sonlu Elemanlar Metoduyla Çözümünü İrdelenmesi"; M.S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 145s, İstanbul.
- Türkmen, M., Bilgin, H., 2002., "Geleneksel Mimaride Kubbeli Örtü Sistemlerinin Yapısal Davranışı"; Balıkesir Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi IV. Mühendislik Mimarlık Sempozyumu, Balıkesir, Türkiye.
- Wilson, E. L., 1999., "Three Static and Dynamic Analysis and Design of Structures, Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Analysis Reference"; Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA.

