

SÜLEYMANİYE CAMİİ

TAŞIYICI SİSTEMİNİN ONARIMI VE GÜÇLENDİRME ÇALIŞMALARI

Repair and Strengthening Works of the Load Bearing System of the Süleymaniye Mosque

Prof. Dr. Feridun Çılı | İnşaat Y. Müh./İ.T.Ü.
Prof. Dr. Oğuz Cem Çelik | İnşaat Y. Müh./İ.T.Ü.
Öğr. Gör. Dr. Haluk Sesigür | İnşaat Y. Müh./İ.T.Ü.

Süleymaniye Camii ve minarelerinin restorasyon çalışmaları çerçevesinde güçlendirmeye yönelik olarak hazırlanan raporda, öncelikle yapıda ve özellikle kubbede görülen çatlakların yerleri belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarda kubbede yerleri, genişlikleri ve derinlikleri belirlenen çatlakların oluş nedenleri, kubbenin değişik şekiller ve mesnet durumlarına göre modellenip değişik yük durumları altında incelenmesi ile anlaşılmaya çalışılmıştır. Mevcut gerilme durumunun düzeyi bakımından oluşumu kaçınılmaz olan çatlakların genişliklerine bağlı olarak enjeksiyon ya da paslanmaz çelik elemanlarla dikildikten sonra enjeksiyon yöntemi ile onarılabileceği sonucuna varılmıştır. Restorasyon aşamasında, önerilen çatlak onarım yöntemleri başarılı şekilde uygulanarak yapıdan istenen güvenlik düzeyine ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Taşıyıcı sistem , enjeksiyon, çatlak, gerilme, hasar, kubbe

Within the context of restoration works in the Süleymaniye Mosque and its minarets, crack patterns were determined in the structural system with a special emphasis on the dome surface. The spherical masonry dome was modeled assuming all cracks with their shapes, widths, support and loading conditions. Repair of the cracks which are due to the high stress levels are decided to repair using appropriate stainless steel clamps and the method of mortar injection. The proposed repair method was successfully applied during the restoration work, leading to a sufficient/acceptable level of safety for this type of historic buildings.

Key Words: Load bearing system, injection, crack, stress, damage, dome

1. Cami Ana Kubbesi

Temel zemini açısından bakıldığında, 1970'li yıllarda yapılan çalışmalar sonucuna göre Süleymaniye Camii'nin sist ve grovaktan oluşan bir ana kaya üzerine oturduğu saptanmıştır. Genel olarak cami zemininin, suriçi İstanbul'unun pek çok noktasına göre elverişli bir dayanıma sahip oluşu nedeniyle temel zemini açısından bir sorun görünmemektedir. Saptanan, sadece ana kubbede bölgesel olarak gelişen çatlaklardan oluşmaktadır.

Cami ana kubbesinin çapı +33.70 kotunda $D1=30.00$ m, +39.41 kotunda $D2=27.00$ m olup kubbe kalınlığı +33.70 kotunda $t1=2.80$ m, +39.41 kotunda $t2=1.10$ m, +48.94 kotunda $t3=0.80$ m değerlerindedir (Şekil 1,2,3,4,5). Kubbe 2mm kalınlığında kurşun ile kaplı olup, kurşun altında yaklaşık olarak 7 cm kalınlığında bir dolgu tabakası, tuğla kubbe cidarı ve içte 5 cm kalınlığında bir sıva tabakası bulunmaktadır. Kubbe örgüsü tuğla ile oluşturulmuş olup tuğla kalınlığı 4~6 cm derz kalınlığı 4~6 cm arasında değişmektedir. Ana kubbe yaklaşık olarak 30.00 m açıklığındaki kemerlere mesnetlenmiş, kubbe mesnetlerinin düzlem dışına hareketini engellemek amacıyla kuzey-güney doğrultusunda 22.80 m çaplı yarım kubbeler, doğu-batı ve radyal doğrultularda $s=6.00$ m~9.00 m aralık-

larla payandalar düzenlenmiştir (Şekil 1). Kubbenin +37.18 kotunda pencere hizasından en kesit ölçüleri 60 mm x 100 mm, +38.58 kotunda kubbe iç yüzüne yakın olarak belirlenen ve en kesit ölçüleri 55mm x 80 mm olan dövme demir çemberler bulunmaktadır. Kubbe dış yüzünde belirlenen yatay çatlaktan anlaşıldığı kadarıyla, +45.00 kotunda da bir çember bulunmaktadır. (Foto 13,14).

2. Cami Ana Kubbesinde Hasar Oluşumu

Restorasyon aşamasında yapılan incelemelerde kubbenin geneline yayılmış olan çatlaklar gözlenmiştir (Şekil 2,3,4,5; Foto 1,2,3,4,5,6,7,8). Çatlaklar pencere üst kotundan başlayarak kubbenin çekme bölgesi boyunca devam etmekteydi. Belirlenen hasarlar çatlak rölövelerine işlenmiştir (Şekil 7,8,9,10). En büyük çatlak genişlikleri yaklaşık olarak 10 mm~20 mm mertebesindeydi. Çatlakların büyük bir bölümü SEBU'lar nedeniyle zayıflamış olan bölgelerden geçmekteydi (Foto 9,10). Kubbe örtüsü kaldırılarak yapılan kontrollerde kubbe dışında da kılcal çatlakların olduğu belirlenmiştir (Foto 11,12). Kubbe içinde belirlenen çatlakların derinlikleri 5 cm~45 cm arasında değişmekteydi.

Çapı yaklaşık 30.00 m., kalınlığı ortalama 95 cm olan tuğla yığma kargir kubbede izlenen bu tür çatlak oluşumları yapısal karakterde çatlaklar olup önemsenmesi gerekmektedir. Kargir kubbelerde kabuk davranışı gereği düşey yükler altında çekme bölgesinde, kubbe eteğinden itibaren belli bir kota kadar, radyal çatlak oluşumu beklenir. Bu kubbede de bu davranış tipik olarak gözlenmiştir. Bunun dışında deprem yüklemesi gibi yatay yükler etkisinde ise çatlakların, kubbenin orta bölgelerinde yoğunlaşması beklenmektedir. Kubbedeki çatlak dağılımı incelendiğinde hasarın belli bir bölgede yoğunlaşmayıp, kubbenin geneline yayıldığı gözlenmiş olup, çatlak oluşumunun düşey ve zaman içinde meydana gelmiş önemli deprem etkilerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu oluşumların hesapla doğrulanması amacıyla aşağıda verilen çalışma gerçekleştirilmiştir.

3. Kubbenin Mevcut Durumunun Analizi

Ana kubbede gözlenen çatlakların oluşma nedenlerini belirlemek amacıyla kubbe üç boyutlu olarak SAP2000 yazılımı yardımıyla modellenmiştir. Modellemede kubbe cidarı için serbestlik derecesi 24 olan 2324 adet trapez/üçgen prizma şekilli katı (solid), demir gergiler için 702 adet çubuk eleman kullanılmıştır, Şekil 6. Düşey yükler etkisi altında (öz ağırlık, kar, buzlanma) kubbede maksimum düşey yer değiştirme yaklaşık olarak $\delta=1.00$ mm, kubbenin birinci doğal titreşim periyodu $T_1=0.15$ s olarak hesaplanmıştır. Düşey yükler etkisi altında kubbede oluşan en büyük radyal çekme gerilmesi $\sigma_c=1.00$ kg/cm², kayma gerilmesi $\tau=0.95$ kg/cm², kubbe ortasında ve eteğindeki çember kuvvetleri $T=0.20$ t ve $T=2.15$ t olarak hesaplanmıştır (Tablo 1). Deprem yüklemesi etkisi altındaki çözümde, Doğu-Batı yönündeki yüklemeye kubbede oluşan en büyük radyal çekme gerilmesi $\sigma_c=5.30$ kg/cm², kayma gerilmesi $\tau=4.10$ kg/cm², kubbe eteğindeki çember kuvveti $T=6.10$ t, Kuzey-Güney yönündeki yüklemeye kubbede oluşan en büyük radyal çekme gerilmesi $\sigma_c=4.50$ kg/cm², kayma gerilmesi $\tau=4.70$ kg/cm², kubbe ortasındaki ve eteğindeki çember kuvvetleri $T=7.00$ t ve $T=10.20$ t olarak hesaplanmıştır.

Bu modelin sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla pence-re üst kotundan itibaren serbestlik derecesi 8 olan 800 adet trapez/üçgen şekilli kabuk (shell), 80 adet çubuk elemandan oluşan ve mesnet koşulları olarak iki farklı durumu yansıtan kubbe modeli de çözülmüştür. Hesaplar kubbenin en elverişsiz çevre ve mesnet koşullarına göre gerçekleştirilmiştir. İlk modelde kubbe mesnetlerinin meridyen doğrultusundaki hareketleri önlenmemiştir. Bu durum, kubbenin gerçek davranışını yansıtmamakla birlikte mevcut mesnetlenme koşullarına göre çözüm ile karşılaştırma yapılması ve gerçekte hiçbir zaman oluşmayacak bu davranışın sonucunda ortaya çıkacak gerilmelerin sınır değerlerinin he-

saplanması amaçlanmıştır. Bu modelde düşey yükler etkisi altında kubbede maksimum düşey yer değiştirme yaklaşık olarak $\delta=3.50$ mm, kubbenin birinci doğal titreşim periyodu $T_1=0.19$ s olarak elde edilmiştir. Düşey yükler etkisi altında kubbede oluşan en büyük radyal çekme gerilmesi $\sigma_c=6.70$ kg/cm², kayma gerilmesi $\tau=2.50$ kg/cm², kubbe ortasındaki ve eteğindeki çember kuvvetleri $T=0.36$ t ve $T=4.70$ t olarak hesaplanmıştır (Tablo 1). Deprem yüklemesi etkisi altındaki çözümde Doğu-Batı/Kuzey-Güney yönündeki yüklemeye kubbede oluşan en büyük radyal çekme gerilmesi $\sigma_c=14.00$ kg/cm², kayma gerilmesi $\tau=3.00$ kg/cm², kubbe ortası ve eteğindeki çember kuvvetleri $T=0.70$ t ve $T=13.00$ t olarak hesaplanmıştır. Kubbenin gerçeğe daha yakın olan davranışını göstermesi amacıyla ikinci modelde kubbe mesnetlerinin meridyen doğrultusundaki hareketleri yarım kubbelerin bulunduğu doğrultularda engellenmiştir. Bu modelde düşey yükler etkisi altında kubbede maksimum düşey yer değiştirme yaklaşık olarak $\delta=1.30$ mm, kubbenin birinci doğal titreşim periyodu $T_1=0.14$ s olarak elde edilmiştir. Düşey yükler etkisi altında kubbede oluşan en büyük radyal çekme gerilmesi $\sigma_c=2.00$ kg/cm², kayma gerilmesi $\tau=0.78$ kg/cm², kubbe ortasındaki ve eteğindeki çember kuvvetleri $T=0.24$ t ve $T=1.90$ t olarak hesaplanmıştır (Tablo 1). Deprem yüklemesi etkisi altındaki çözümde ise Doğu-Batı yönündeki yüklemeye kubbede oluşan en büyük radyal çekme gerilmesi $\sigma_c=6.10$ kg/cm², kayma gerilmesi $\tau=4.20$ kg/cm², kubbe ortası ve eteğindeki çember kuvvetleri $T=2.29$ t ve $T=4.50$ t, Kuzey-Güney yönündeki yüklemeye kubbede oluşan en büyük radyal çekme gerilmesi $\sigma_c=12.00$ kg/cm², kayma gerilmesi $\tau=4.50$ kg/cm², kubbe ortası ve eteğindeki çember kuvvetleri $T=2.12$ t ve $T=7.50$ t olarak hesaplanmıştır (Tablo 1).

4. Değerlendirme ve Onarım Yöntemi

Kubbenin özgün durumu, +37.18, +38.58 ve +45.00 kotlarındaki çemberli durumlar için de çözümlenmeler yapılmış, bunlara ilişkin hesap sonuçları özet olarak Tablo 1'de verilmiştir. Buna göre düşey yük durumunda, kubbenin radyal doğrultusunda oluşan en büyük çekme gerilmesi $\sigma_c=1.00$ kg/cm²'dir. Deprem etkisinin gözönüne alındığı durumlarda radyal doğrultuda oluşan en büyük çekme gerilmeleri ise sırasıyla $\sigma_c=5.30$ kg/cm² ve $\sigma_c=4.50$ kg/cm² olarak hesaplanmıştır. Çekme dayanımı ihmal edilen yığma kargir yapı elemanlarında, bu düzeydeki çekme gerilmeleri altında tipik çatlak oluşumu doğaldır. Kubbe yüzeyinde bu durumlara ilişkin gerilme dağılımları Şekil 12 ve 29'da verilmiştir. Böylece kubbede oluşan çatlakların ve hesap sonucu ortaya çıkan çekme gerilmesi yörüngelerinin çoğunlukla üst üste düştüğü görülmektedir. Yerinde yapılan incelemelerden kubbe eteğinde ve ortasında saptanan çemberlerde herhan-

gi bir bozulma belirlenmemiştir; kubbe ile ilgili hesaplar-
dan demir çemberlerdeki gerilme düzeylerinin değerlendiril-
mesi sonucunda bu elemanların olabilecek bir depremde
kubbenin ağır hasar almasını engelleyici nitelikte olduğu
sonucuna varılmıştır. Kubbede oluşan basınç gerilmeleri
emniyetli değerlerin oldukça altında kalmaktadır. Bu ne-
denlerle kubbedeki mevcut çatlakların onarılması, koroz-
yona uğramış gergilerin temizlenmesi dışında bir güçlen-
dirmenin yapılmasına gerek duyulmamıştır.

Kubbede belirlenen çatlakların onarımı için aşağıdaki
yöntemler önerilmiş ve uygulanmıştır:

- Çatlakların kılcal olması durumunda (çatlak geniş-
liği 1cm'den küçük) yapının mevcut harcına benzer
özelliklerdeki malzemenin 1~2 bar gibi düşük ba-

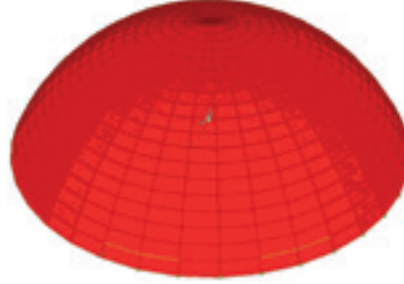
sınc altında enjeksiyonuyla onarımı (Şekil 36).

- Çatlakların orta genişlikte olması durumunda (çat-
lak genişliği 4 cm'ye kadar) çatlakın paslanmaz çelik
dikiş elemanlarıyla dikildikten sonra yapının mev-
cut harcına benzer özelliklerdeki malzemenin 1~2
bar gibi düşük basınç altında enjeksiyonuyla onarı-
mı (Şekil 37).

5. Sonuç

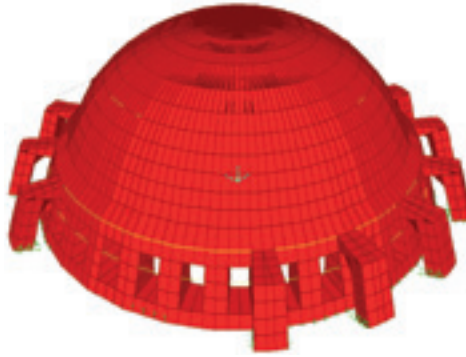
Süleymaniye Camisi Ana Kubbesinin mevcut durumu-
nun belirlenmesi amacı ile yapılan inceleme, hesaplar ve
değerlendirmeler ışığında önerilen onarım yöntemlerinin
uygulanması ile kubbe, inşa edildiği tarihteki güvenlik dü-
zeyinde kullanılabilir duruma erişmiştir.

KABUK ELEMANLARLA ÇÖZÜM

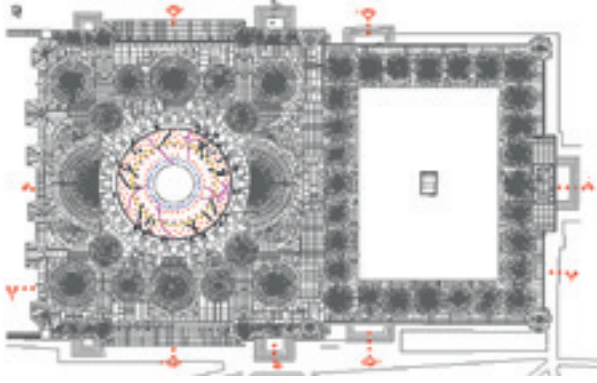


TİP	Mesnetlenme şekli	Şekil No	← (kg/cm ²) (çekme)	← (kg/cm ²) (basınç)	↔ (kg/cm ²)	Tçember (t)		Yön	Şekil No	← (kg/cm ²) (çekme)	← (kg/cm ²) (basınç)	↔ (kg/cm ²)	Tçember (t)	
1		12,13,14	6.7	1.2	2.5	0.36	4.7	DB	15,16,17	14	4.8	3	0.70	13
								KG	15,16,17	14	4.8	3	0.70	13
2		18,19,20	0.42 - 2.00	1.55	0.78	0.24	1.90	DB	21,23,25	3.10-6.10	4.5	4.2	2.29	4.5
								KG	22,24,26	4.06-12.00	4.7	4.5	2.12	7.5

KATI MODELLEME İLE ÇÖZÜM



TİP	Mesnetlenme şekli	Şekil No	← (kg/cm ²) (çekme)	← (kg/cm ²) (basınç)	↔ (kg/cm ²)	Tçember (t)		Yön	Şekil No	← (kg/cm ²) (çekme)	← (kg/cm ²) (basınç)	↔ (kg/cm ²)	Tçember (t)	
3		27,28,29	1.0	1.1	0.95	-0.20	2.15	DB	30,32,34,	5.3	5.3	4.1	7.9	6.1
								KG	31,33,35	4.5	5.1	4.7	7.0	10.2



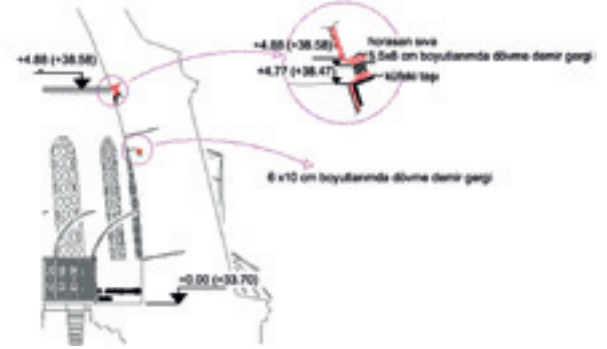
Şekil 1 Plan



Şekil 5 Kubbe III-III Kesiti



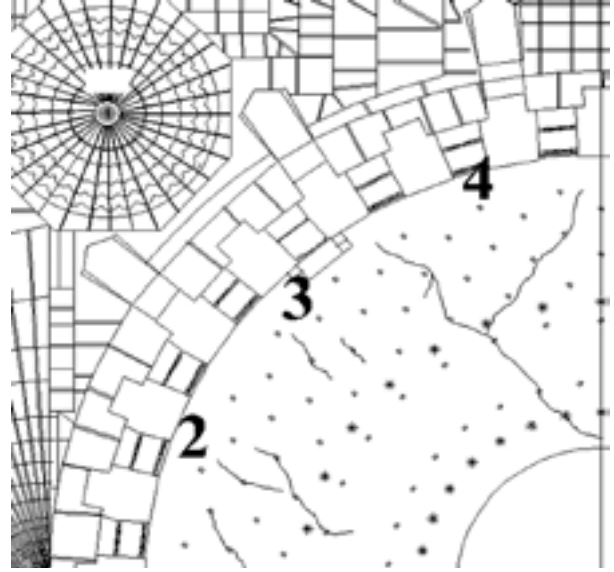
Şekil 2 Cami II-II Kesiti



Şekil 6 Kubbe eteğinde belirlenen çember kesitleri



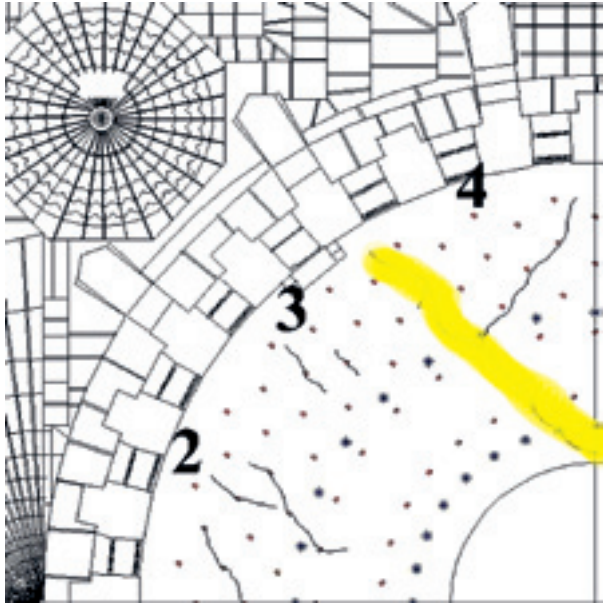
Şekil 3 Cami III-III Kesiti



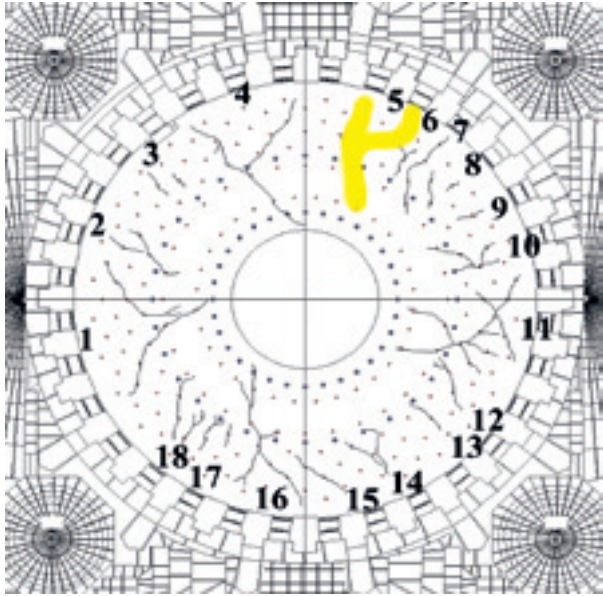
Şekil 7



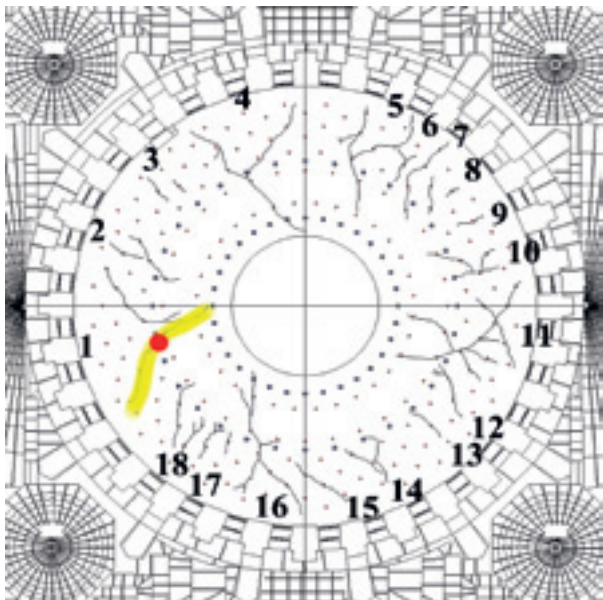
Şekil 4 Kubbe II-II Kesiti



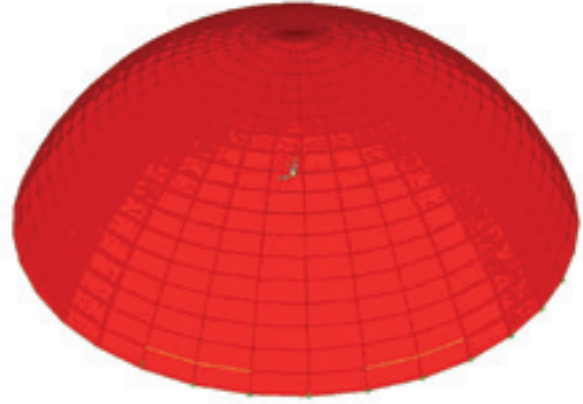
Şekil 8



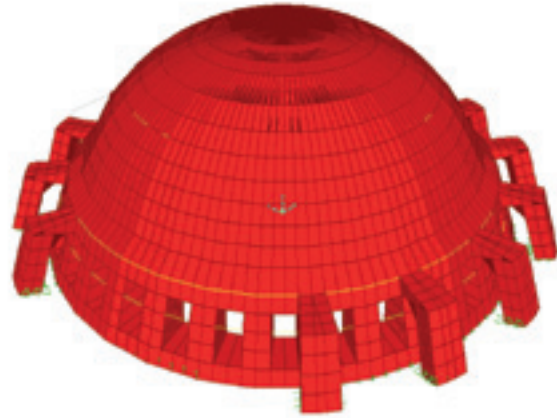
Şekil 9



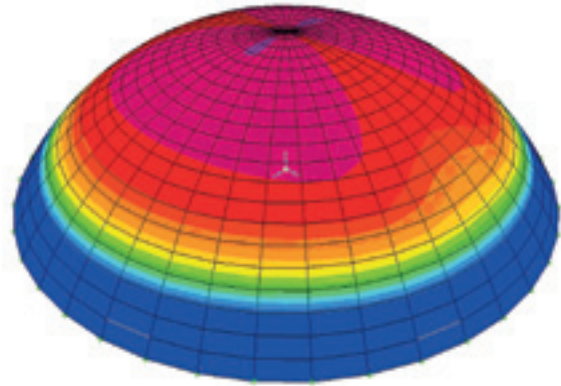
Şekil 10



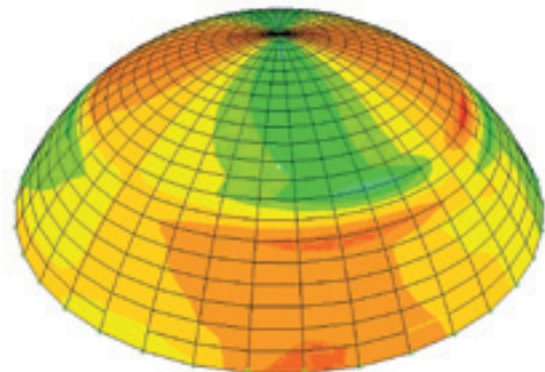
Şekil 11a Kabuk/Katı (Solid) Elemanlarla Kubbe Modeli



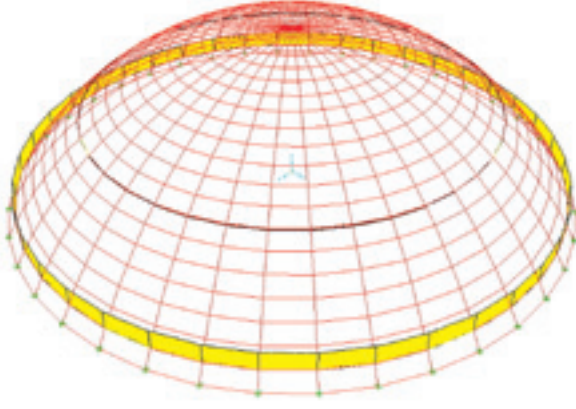
Şekil 11 b Kabuk/Katı (Solid) Elemanlarla Kubbe Modeli



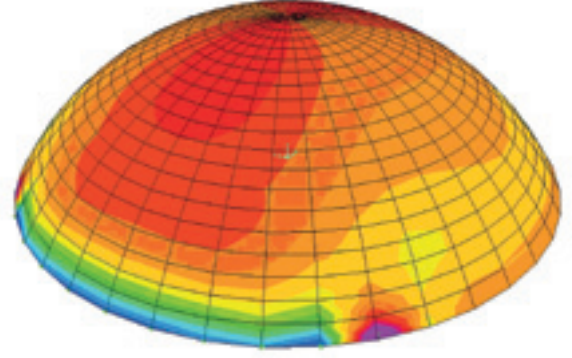
Şekil 12 Tip1 Durumunda Normal Gerilme Dağılımı (Düşey Yük)



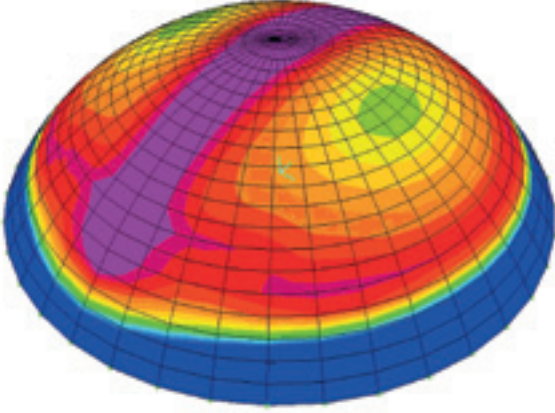
Şekil 13 Tip1 Durumunda Kayma Gerilmesi Dağılımı (Düşey Yük)



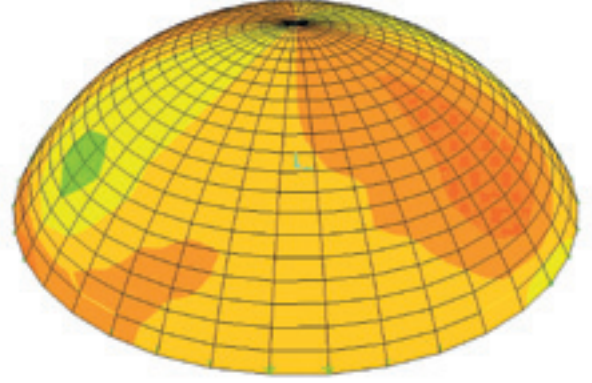
Şekil 14 Tip1 Durumunda Çember Kuvveti Dağılımı (Düşey Yük)



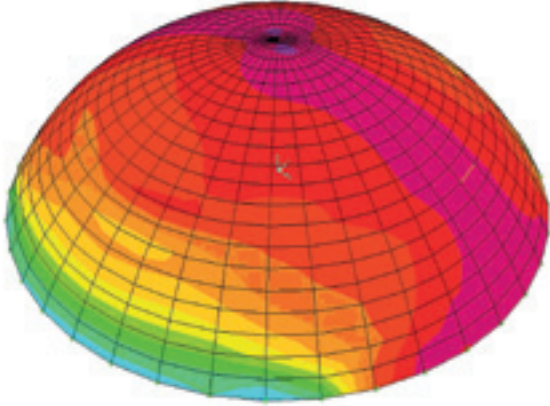
Şekil 18 Tip2 Durumunda Normal Gerilme Dağılımı (Düşey Yük)



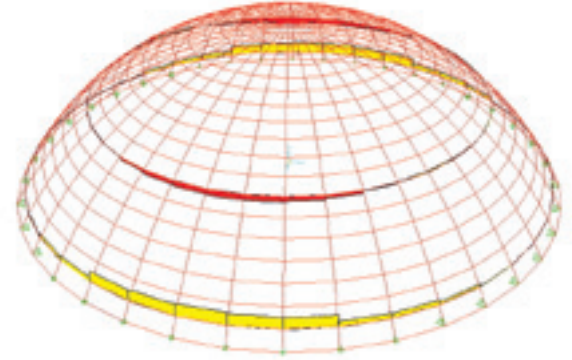
Şekil 15 Tip1 Durumunda Normal Gerilme Dağılımı (Depremlı Durum)



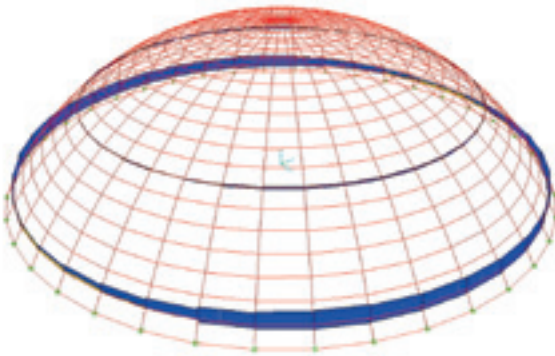
Şekil 19 Tip2 Durumunda Kayma Gerilmesi Dağılımı (Düşey Yük)



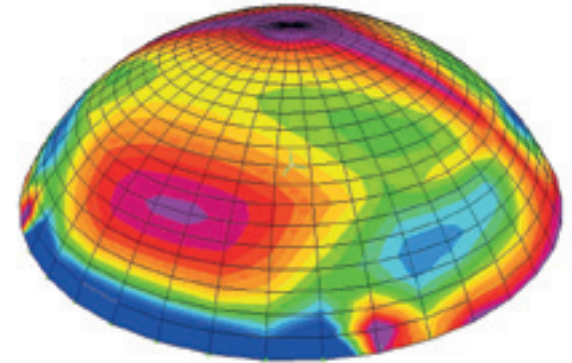
Şekil 16 Tip1 Durumunda Kayma Gerilmesi Dağılımı (Depremlı Durum)



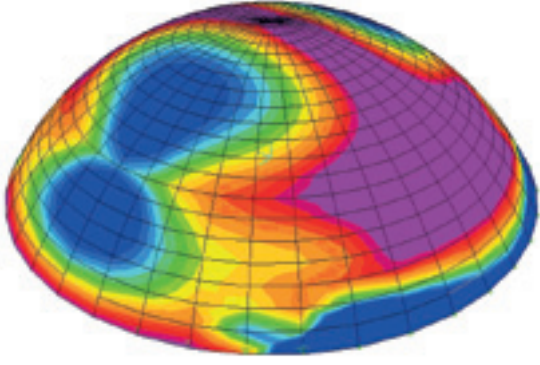
Şekil 20 Tip2 Durumunda Çember Kuvveti Dağılımı (Düşey Yük)



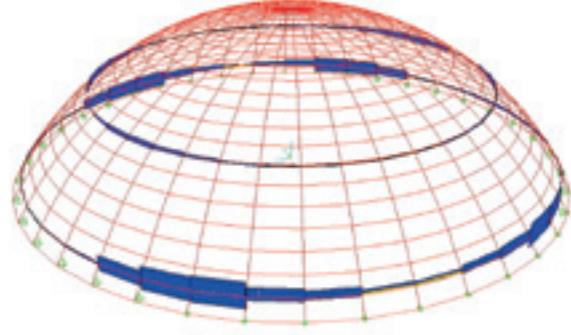
Şekil 17 Tip1 Durumunda Çember Kuvveti Dağılımı (Depremlı Durum)



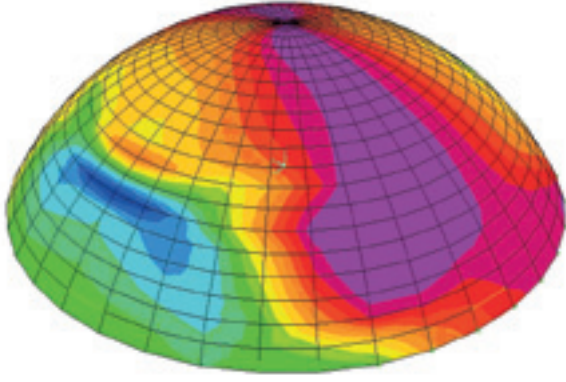
Şekil 21 Tip2 Durumunda Normal Gerilme Dağılımı (Doğu-Batı/DB Yönü Depremlı Durum)



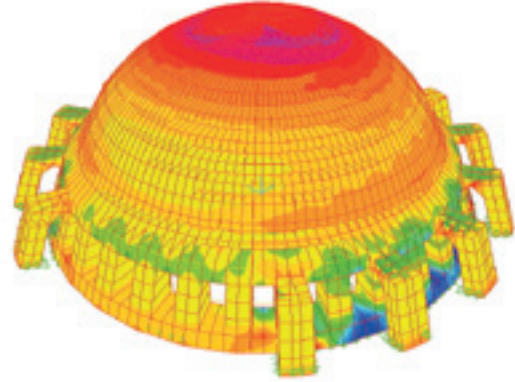
Şekil 22 Tip2 Durumunda Normal Gerilme Dağılımı
(Kuzey-Güney/KG Yönü Depremleri Durumunda)



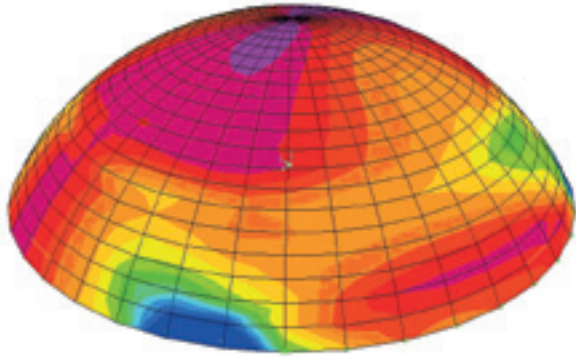
Şekil 26 Tip2 Durumunda Çember Kuvveti Dağılımı
(Kuzey-Güney/KG Yönü Depremleri Durumunda)



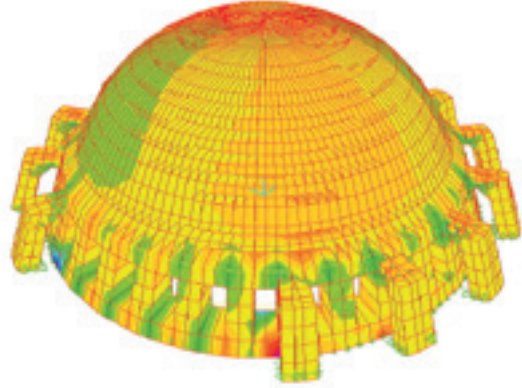
Şekil 23 Tip2 Durumunda Kayma Gerilmesi Dağılımı
(Doğu-Batı/DB Yönü Depremleri Durumunda)



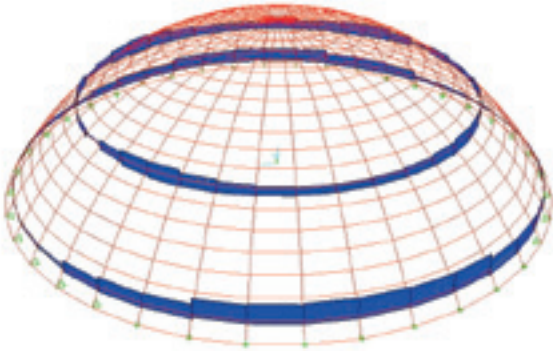
Şekil 27 Tip3 Durumunda Normal Gerilme Dağılımı (Düşey Yük)



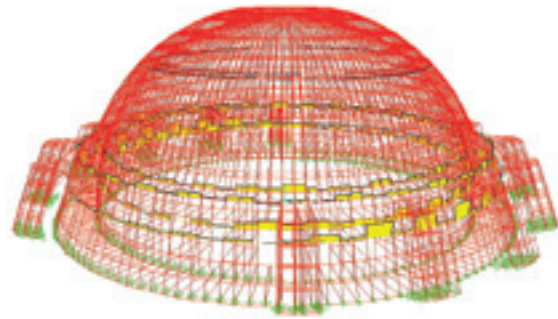
Şekil 24 Tip2 Durumunda Kayma Gerilmesi Dağılımı
(Kuzey-Güney/KG Yönü Depremleri Durumunda)



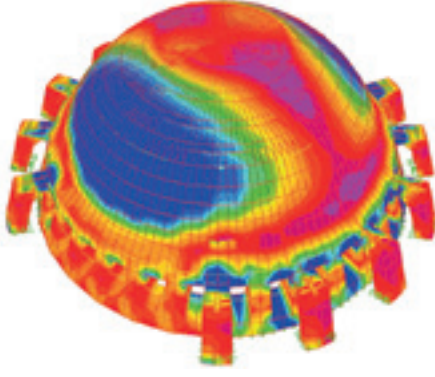
Şekil 28 Tip3 Durumunda Kayma Gerilmesi Dağılımı (Düşey Yük)



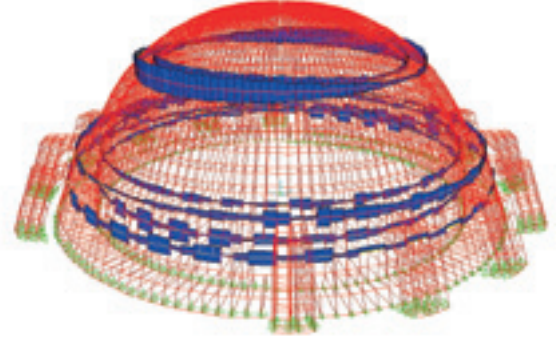
Şekil 25 Tip2 Durumunda Çember Kuvveti Dağılımı
(Doğu-Batı/DB Yönü Depremleri Durumunda)



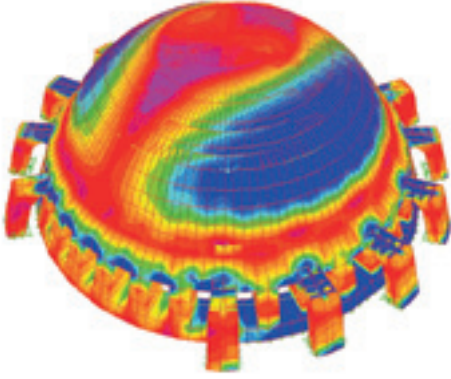
Şekil 29 Tip3 Durumunda Çember Kuvveti Dağılımı (Düşey Yük)



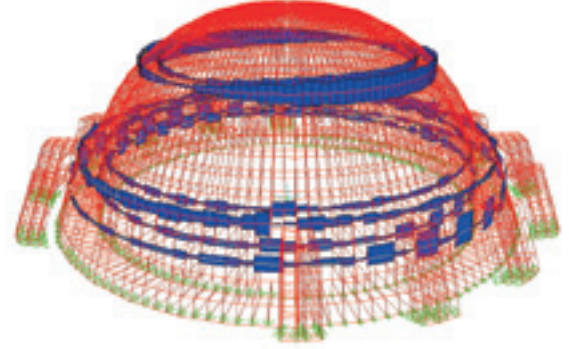
Şekil 30 Tip3 Durumunda Normal Gerilme Dağılımı
(Doğu-Batı/DB Yönü Depremleri Durum)



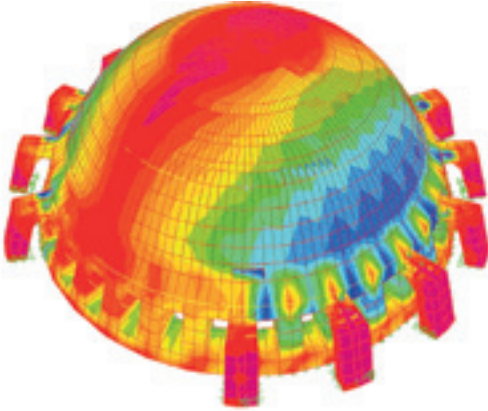
Şekil 34 Tip3 Durumunda Çember Kuvveti Dağılımı
(Doğu-Batı/DB Yönü Depremleri Durum)



Şekil 31 Tip3 Durumunda Normal Gerilme Dağılımı
(Kuzey-Güney/KG Yönü Depremleri Durum)



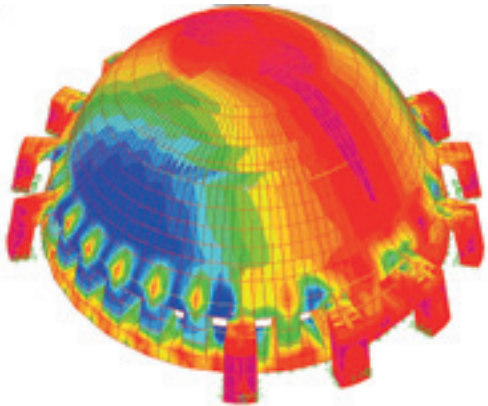
Şekil 35 Tip3 Durumunda Çember Kuvveti Dağılımı
(Kuzey-Güney/KG Yönü Depremleri Durum)



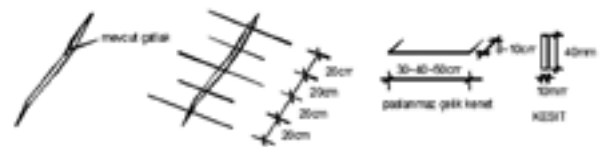
Şekil 32 Tip3 Durumunda Kayma Gerilmesi Dağılımı
(Doğu-Batı/DB Yönü Depremleri Durum)



Şekil 36 Kılcal Çatlaklar İçin Onarım Detayı



Şekil 33 Tip3 Durumunda Kayma Gerilmesi Dağılımı
(Kuzey-Güney/KG Yönü Depremleri Durum)



Şekil 37 Orta Genişlikteki Çatlaklar İçin Onarım Detayı



Fotograf 1



Fotograf 4



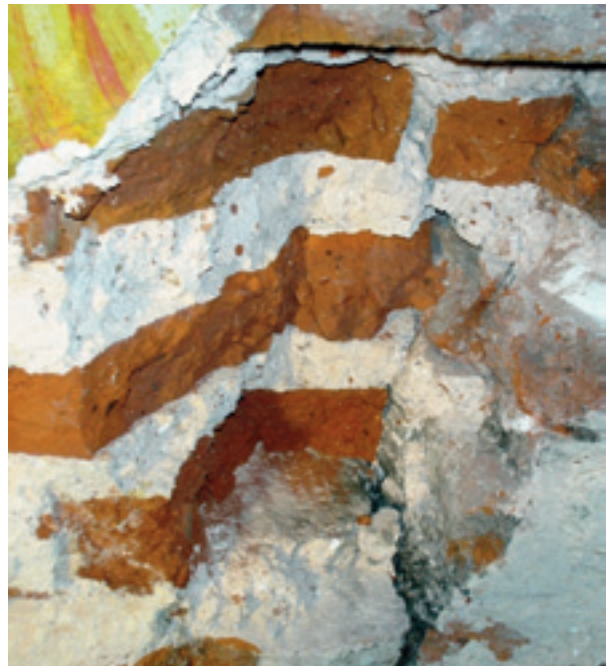
Fotograf 2



Fotograf 5



Fotograf 3



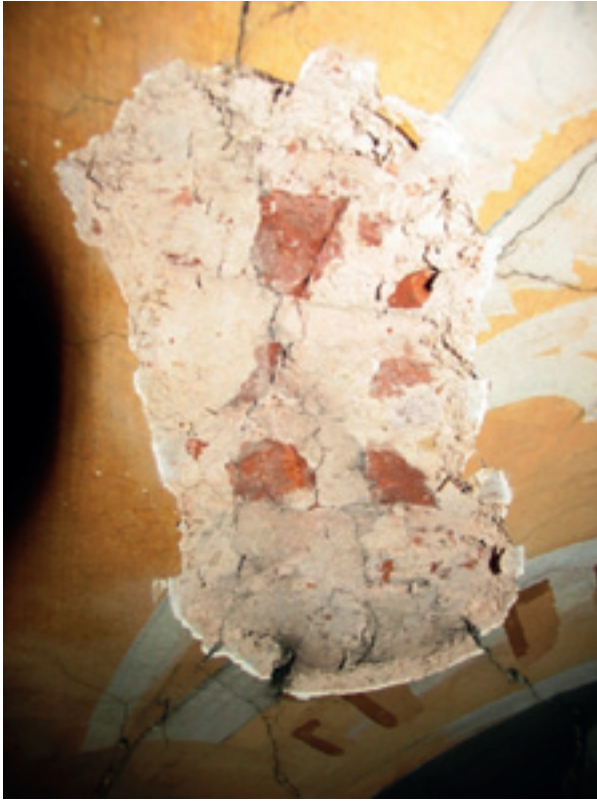
Fotograf 6



Fotograf 7



Fotograf 9



Fotograf 8



Fotograf 10



Fotoğraf 11



Fotoğraf 13



Fotoğraf 12



Fotoğraf 14