



GİRİŞ

Mimar Sinan'ın, eserlerinde ortaya koyduğu üstün sanat ve mimari özelliklerin yanı sıra, uyguladığı teknolojiler de ayrıca dikkat çekicidir. Yıllardır sözü edilmesine, hatta bir kısmının efsaneleşmesine rağmen, bu teknolojiler ile ilgili araştırmalar ancak yeni yeni başlamış bulunmaktadır. Bunun en tipik örneklerinden biri de câmilerde uyguladığı akustik teknolojisidir. Özellikle Süleymaniye Câmii'nin akustik özelliklerini irdelemek amacı ile nargileden yararlanması hâlâ konu edilmektedir. Bütün bunlara rağmen, Sinan Câmileri'nin akustik özelliklerini belirten bir veri ortaya konmamış, bu kadar çok konu edilen "iyi akustik özellikler" dahi tam olarak tanımlanmamıştır.

Bu nedenle, Sinan Câmileri'nin akustik özelliklerini belirlemek amacı ile bir araştırma projesi başlattık ve projemize başlangıç olarak yedi câmi seçtik. Bu câmilerden ele alınan altı eser;

1. Üsküdar Mihrimah Sultan (İstanbul),
2. Süleymaniye (İstanbul),
3. Cenabî Ahmet Paşa (Ankara),

4. Rüstem Paşa (İstanbul),

5. Sokollu Mehmet Paşa (Kadirga-İstanbul),

6. Selimiye (Edirne)

câmileridir. Yedinci câmi olarak seçilen Şehzâde'de restorasyon çalışmalarının devam etmesi nedeni ile gerekli ölçümler yapılamamış, sadece belirli incelemeler yapılabilmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen veriler, Sinan'ın tasarım etabında akustik konusunu ele aldığını, detaylı hesap ve planlama sonucu oluşan tasarımı uyguladığını ortaya koymuştur.

Ele alınan câmilerde Sinan'ın, farklı plân şemaları ve yüzey kaplama malzemeleri uygulamasına rağmen, üstün bilgi ve teknoloji ile uygun çözümleri gerçekleştirerek, yeterli, hatta Sokollu Mehmet Paşa ve Rüstem Paşa Câmilerinde olduğu üzere ideal akustik ortamı oluşturabildiği tesbit edilmiştir. Bu amaçla, günümüz akustik tasarımında uygulanan tasarım etap ve prensiplerinin Sinan tarafından da uygulandığı belirlenmiştir.

1. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Hacim akustiği tasarımında amaç "yeterli anlaşılabilirliğin" gerçekleştirilmesidir. Bu amaçla tasarım iki etapta ele alınır. Şöyleki;

1. Homojen ses dağılımının sağlanması,

2. Optimum çınlama zamanının gerçekleştirilmesi. Sinan'ın bu etaplar için ortaya koyduğu sonuçları ele alınan câmilerde inceleyelim.

1.1. Homojen Ses Dağılımı

Sinan Câmileri'nin plân ve kesitleri incelendiğinde, hacim içinde homojen ses dağılımını sağlamak amacıyla yönelik önlemler alınmış olduğunu ve bunların tasarıma yansımalarını görmekteyiz. Bu önlemleri şöyle sıralayabiliriz:

1.1.1. Sinan, düzgün prizmatik formlardan kaçınmıştır. Hatta, kare plân şemalı câmilerinde dahi niş, payanda, maskure gibi elemanlarla forma hareket vermiştir. Böylece, Diyarbakır Behram Paşa ve Ilgın Lala Mustafa Paşa Câmilerinde olduğu üzere, düzgün prizmatik, özellikle düzgün kare plânlı formlar nedeni ile oluşacak duran dalgaların, hacmin akustik özelliklerine olan olumsuz etkilerinden kaçınma yoluna gitmiştir. Bu uygulama ile sesin çeşitli yönlerde yansımaları sağlanmasını yanı sıra, oluşacak duran dalgaların düzgün kare plân nedeni ile aynı frekans bölgelerine yığılmalarını önleyebilmiştir. Bu tip yüzey parçalanmalarının câmi hacmi büyüdükçe daha belirgin hale geldiğini görüyoruz. Buna Süleymaniye (Şekil 1., Resim 1.) ve Mihrimah Sultan (Şekil 2.) Câmilerini örnek gösterebiliriz.

1.1.2. Hacim içindeki payanda, ayak gibi taşıyıcı elemanlara sesi dağıtarak yansıtacak formlar vermiştir. Bu amaçla yapı içindeki bütün elemanlardan yararlanmıştır. (Resim 2.,3.).

1.1.3. Dik açılı köşelerden, kubbeğe geçiş elemanı olarak kullandığı mukarnaslar ile köşegen Eigen frekansların oluşturacağı duran dalgaları önlediği gibi, bu elemanlardan yararlanarak sesin dağılarak yansımaları sağlamıştır. Bu şekilde mukarnaslara, strüktürel işlevlerinin yanı sıra, estetik ile birleştirilerek akustik işlev de yüklemiş, diğer bir deyişle statik, estetik ve akustik işlevleri bir uyum içinde birleştirmiştir.

1.2. Optimum Çınlama Zamanı

Hacim içinde ses enerjisi düşüş süresi - "çınlama zamanı T" olarak isimlendirilmekte ve kaynak sustuktan sonra hacimdeki ses enerjisinin 60 dB (desibel) düşmesi için geçen süre olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3).

Bir hacimde ses enerjisi düşüşü (çınlama zamanı) hacim sınırlarındaki ve içindeki yüzeylerin ses yutma özellikleri ile kontrol edilir. Hacimdeki işleve ve hacim büyüklüğüne bağlı olarak belirlenen optimum çınlama zamanı (T), bir hesap sonucu belirlenen yutucu elemanlarla gerçekleştirilir (Şekil 4). Ancak, câmilerde çınlama zamanının ne olması gerektiğini belirten bir veri daha önce ortaya konmamıştır. Bu durumda, öncelikle, câmilerde çınlama zamanı T, hacim büyüklüğüne bağlı olarak Şekil 5'de verildiği üzere belirlenmiştir.

Ele aldığımız Sinan Câmilerinde ise; yaptığımız ölçü sonuçlarında iki büyük câmiin dışındaki dört câmide çok olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 6). Bunun üzerine, bu dört câmide, hacimler dolu iken oluşacak çınlama zamanını hesaplamak zorunlu hale gelmiştir. Kullanıcı faktörünü ilâve ederek yapılan hesaplar sonucunda, özellikle Rüstem Paşa ve Sokollu Mehmet Paşa Câmileri için ideal sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 7.). Bu câmilerin duvarlarının akustik yönden çok olumsuz bir malzeme olan çini ile kaplı olduğu, Rüstem Paşa Câmii'nde çinilerin kubbe kasnağına kadar devam

ettiği göz önüne alındığında, Sinan'ın akustik bilim ve teknolojisindeki üstünlüğü kolayca anlaşılabilir. Yapılan ölçü ve hesap sonuçları, Sinan'ın bu hacimlerde homojen ses dağılımının yanı sıra ses enerjisi düşüşünü de kontrol edebildiğini ve bunu gerçekleştiren ses yutucu elemanların bir tasarım ürünü olduğunu ortaya koymuştur. Yapılan inceleme sonucunda Sinan'ın bu amaçla hacim içindeki bütün yüzey kaplama elemanlarından yararlandığı görülmüştür.

2. YUTUCU ELEMANLAR

Sinan'ın kullandığı ses yutucu elemanlar, dönemin teknolojisini ve bu teknolojinin yapı malzemesine olan hâkimiyetini yansıtmaması açısından önem kazanmaktadır. Yapılan incelemede, Sinan'ın ses yutucu olarak yararlandığı malzemelerin fiziksel özelliklerini akustik verilerin gerektirdiği doğrultuda değiştirebildiği ve kontrol edebildiği görülmüştür. Bu elemanları kısaca inceleyelim.

2.1. Sıvalar

Ele alınan câmilerde, özellikle sıva teknolojisi dikkati çekmiştir. Ana malzeme olarak kullanılan Horasan harcı sıvanın, ihtiyaca göre katkı malzemeleri ile fiziksel özelliklerinin değiştirilebildiği tesbit edilmiştir. Duvar ve kubelerde kullanılan bu tip sıvalara kırılcı ilâve edilerek akustik bir sistem elde etme yoluna gidildiği görülmüştür. Yay görevi yapan kırılcı tabakasının üzerindeki sıva kütle görevi yapmakta ve sistem, özellikle alçak ve orta frekanslarda görev yapan (ses enerjisi yutan) panel rezonatör olarak çalışmaktadır. Bu tip sıvanın sertliğinin kubbelerde azaltılarak kullanılması ayrıca dikkati çekmiştir.

Burada şunu belirtmek gerekir ki, önceki yıllarda yapılan onarım ve restorasyon çalışmalarında bu tip sıvaların yerine veya üzerine alçı gibi sert bir sıva yapılması, sistemin akustik özelliklerini yok etmektedir. Buna Süleymaniye ve Selimiye Câmilerini örnek

gösterebiliriz. Bu iki câmide böyle uygulamalar sonucu, alçak ve orta frekanslarda etkin olan ses yutucu yüzeylerin azalması, gerekli ses enerjisinin yutulmasını önlemiş ve bu frekans bölgelerinde çınlama zamanının uzamasına neden olmuştur. Şekil 7.'de her iki cami için açıkça görülen bu durum, duvarları yine sıva ile kaplı olan Mihrimah Sultan ve Cenabî Ahmet Paşa Câmilerinde, az miktarda da olsa görülmektedir.

2.2. Boşluklu Rezonatörler

Orta ve büyük boyutlardaki câmiler gibi büyük hacimlerde Eigen frekansların oluşturacağı duran dalgaların hacmin akustik verilerini olumsuz yönde etkileyeceği ortadadır. Bunun yanı sıra, böyle büyük hacimlerin kubbesinden yansıtılacak sesin yaratacağı ekonun ise problemin büyümesine neden olacağı kolayca görülebilir. Bunun bilincinde olan Sinan'ın, kubbeye, ses yutucu sıvanın yanı sıra boşluklu rezonatör kullanarak duran dalgaları yok etme yoluna gittiği belirlenmiştir. Sinan bu amaçla küplerden yararlanmış ve ağızları iç hacme açılacak şekilde kubbeye yerleştirdiği bu küplerin boşluklu rezonatör olarak çalışmasını sağlamıştır.

Boyutları dalga boyundan çok küçük olan boşluklu rezonatörler, belli başlı akustik sistemlerden biri olup özellikle alçak frekanslarda etkili olmaktadır. Sistem V hacminde bir boşluk ve bu boşluğu hına hacmine bağlayan bir boyun veya açıklıktan oluşmaktadır. Dar bir frekans bandında ses yutma özelliğinin yanı sıra sistem, genişliği rezonatörün kalite faktörü Q'ya bağlı olan bir frekans bandında ise sesi dağıtarak yansıtılmaktadır (Şekil 8.). Sinan'ın duran dalgaları önlemek amacı ile çoğunlukla bu tip sistemlere başvurduğu, sistemin etkili olduğu frekans bandını genişletmek amacı ile kalite faktörü Q'yu küçültecek önlemler aldığı belirlenmiştir. Özellikle, duvarları diğer câmilere oranla daha az hareketli ve daha büyük düz yüzeylere sahip olan Şehzâde Câmii'nin duvarlarında da bu tip rezonatörlerin bulunması (35 adet) dikkate değerdir (Resim 4.). Sinan'ın, bu

uygulama ile karşılıklı paralel duvarlardan yansıyan ses dalgalarının oluşturacağı duran dalgaları önleme yoluna gittiği ortadadır.

Ele alınan câmilerde ise, bu tip rezonatörlerden çok sayıda tesbit edilmiştir (Resim 5.). Ancak, yine daha önceki yıllarda ağız kapatılarak üstü sıvanmış birçok rezonatör belirlenmiştir. Özellikle Fosatti ve ekibi tarafından geçen yüzyılda bu tip hatalar câmilerin çoğunda yapılmış ve ne yazık ki konu bilinmediği için, daha sonraki restorasyonlarda bu hataların düzeltilmesi yoluna gidilememiştir. Süleymaniye ve Selimiye Câmilerinde yapılan çınlama zamanı ölçümleri sonucunda, alçak frekanslarda görülen artışın aşırı olmasına bu tip hatalar yol açmaktadır.

Bu arada, araştırma programına girmemesine rağmen, Sultan Ahmet Câmii'nde restorasyon çalışmalarının devam etmesi nedeni ile bu câmide kubbeyle ulaşma imkânı elde edilmiştir. Kubbede yapılan inceleme ve araştırma sonucunda, çok sayıda rezonatör ortaya çıkarılmış ve böylece (Resim 6., 7.) kubbedeki toplam boşluklu rezonatör yetmişbeşe ulaşmıştır¹ (Şekil 9).

2.3. Döşeme Kaplaması; Halı

Toplu kullanıma yönelik ve sesin işlev açısından önemi olan (konser veya kongre salonu v.b.) hacimlerin akustik tasarımı yapılırken, hacmin yeteri kadar dolu olmaması halinde, kullanıcı sayısının az oluşunun akustik verileri olumsuz yönde etkilememesine dikkat edilir. Bu amaçla döşeme kaplaması olarak ses yutma özelliği, kullanıcının özelliğine yakın olan malzemeler seçilir. Halı ise bu tip malzemelerin başında gelmekte olup câmilerde kullanılması

geleneğe haline gelmiş bulunmaktadır. Ancak çınlama zamanı değerlerinin çok olumlu olduğunu belirttiğimiz Rüstem Paşa ve Sokollu Mehmet Paşa Câmilerinde bu değerlerin hacimler dolu iken ideal verilere (Şekil 5.) ulaşması oldukça dikkat çekicidir. Boş ve dolu hacimlerin verileri arasındaki farkın, kullanıcı ve halının ses yutma değerleri arasındaki farka eşit oluşu (Şekil 10.,11.), Sinan'ın akustik tasarımında kullanıcı faktörünü göz önüne aldığını ortaya koymaktadır. Bu sonuç ise, bu konudaki bilgi ve teknoloji üstünlüğünün diğer bir kanıtıdır.

2.4. Diğer Elemanlar

Sinan'ın ses enerjisi düşüşünün kontrolünde hacim içindeki diğer elemanlardan da yararlandığı görülmektedir. Buna galeri veya mihrap şebekelerini örnek olarak gösterebiliriz. Yapılan çalışmalarda, hacim içindeki ve sınırlarındaki tüm elemanların hacmin akustik verilerine katkısının Sinan tarafından bilindiği ve akustik tasarımda bunların göz önüne alındığı belirlenmiştir. Esasen, dolu hacimlerin çınlama zamanı eğrileri, kullanıcıdan en ufak yüzey kaplamasına kadar tüm elemanların ses yutma özelliklerinin böyle bir tasarımda dikkate alındığının en güçlü kanıtıdır.

3. SONUÇ

Önceki bölümlerde belirtildiği üzere, araştırmamızın ilk bölümünde, Sinan'ın akustik sorunlara çözüm getirmek amacı ile önceden hazırladığı akustik tasarımın sonucunu uyguladığı belirlenmiştir. Akustik bilim ve teknolojisine olan hâkimiyeti ile ortaya çıkacak akustik sorunları önceden belirlediği ve bunlara çözüm getirdiği ortadadır. Uyguladığı teknolojilerin

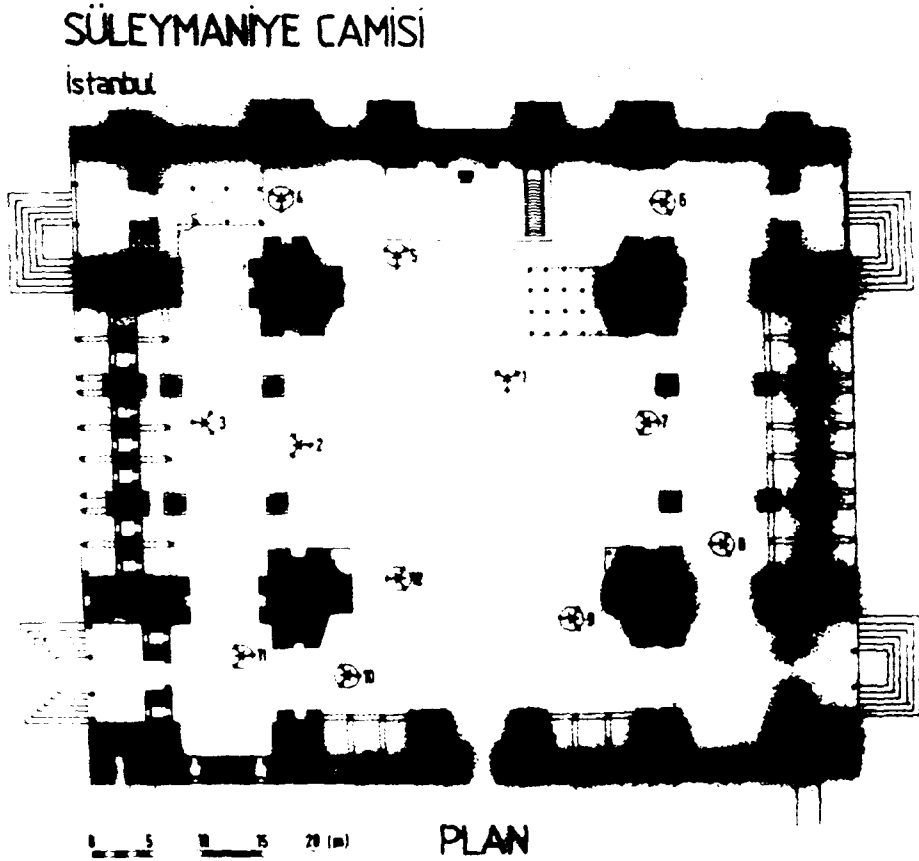
¹ Sayın Prof.Dr.Semavi Eyice bildirimizin arkasından yaptığı konuşmada; Fosatti'nin belgeleri üzerinde yaptığı incelemelerde, Sultan Ahmet Camii'nde çalışma yaptığını belirten bir kayıt bulamadığını, cami kubbesinde yaptığı incelemede ise son restorasyon öncesi kubbede bulunan işlemlerde iki Rum ustanın imzasını tesbit ettiğini belirtmiştir.

çoğunu Sinan öncesinde de görüyoruz. Ancak, akustik bir tasarıma dayanan uygulama ilk defa Sinan'da görülmektedir. Sinan bu uygulamaları ile yapı elemanlarına geleneksel görevlerinin (statik, bölme vs.) yanı sıra akustik görevlerde yüklemiş ve statik, estetik, akustik üçlününün bir armoni içinde uyumunu sağlamıştır.

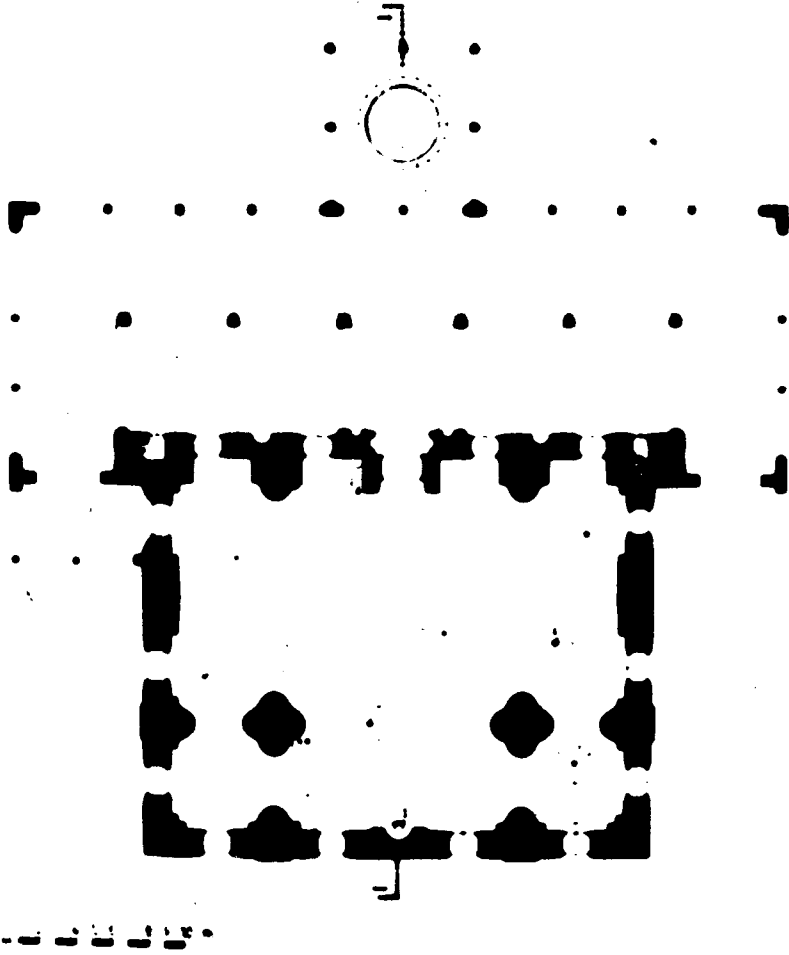
Bu araştırma sonucunda sanat ve mimarlığın yanı sıra Sinan'da üstün bir teknoloji varlığı ortaya konmuştur. Bizim çalışmamız bu teknolojinin sadece bir bölümünü içermektedir. Bunun yanı sıra, Sinan eserlerinin statik yönü ve diğer bazı konuların çeşitli araştırmacılar tarafından ele alındığı bilinmektedir. Bunlar birbirinden ayrı yapılan çalışmalarlardır. Bu da göstermektedir ki, konu sanat ve mimarlığın ö-

tesinde geniş bir bilimsel spektrumu kapsamaktadır.

Bu arada şunu belirtmek gerekir ki, Sinan bir dönemin, bir kültürün simgesidir. Yapılan araştırmaların birbirinden ayrı ve kopuk olması, bu konuya harcanan beyin ve finansman gücünden alınan randımanın düşmesine neden olmaktadır. Bu durumda atılacak ilk adım, konunun belirli bir organizasyon çerçevesinde bilimsel bir ekip tarafından plânlı ve programlı olarak ele alınmasıdır. Bu gereksinime örnek olarak Süleymaniye Câmii'ndeki havalandırmanın ciddi bir aerodinamik konusu olduğunu veya restorasyonlarda kullanılması gereken akustik özellikli sıva için geniş kapsamlı bir malzeme laboratuvarı ve eleman gerektiğini verebiliriz.

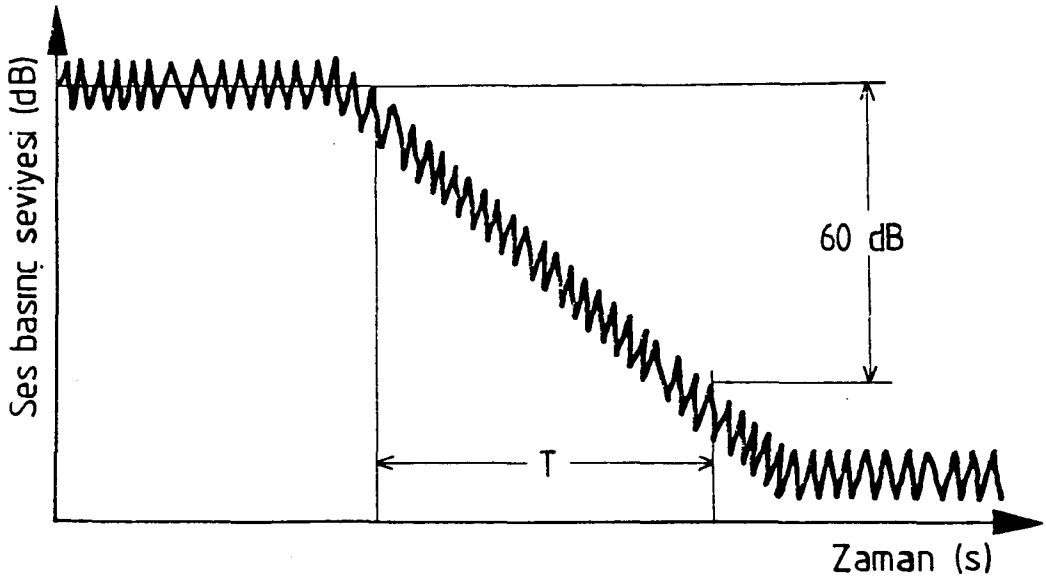


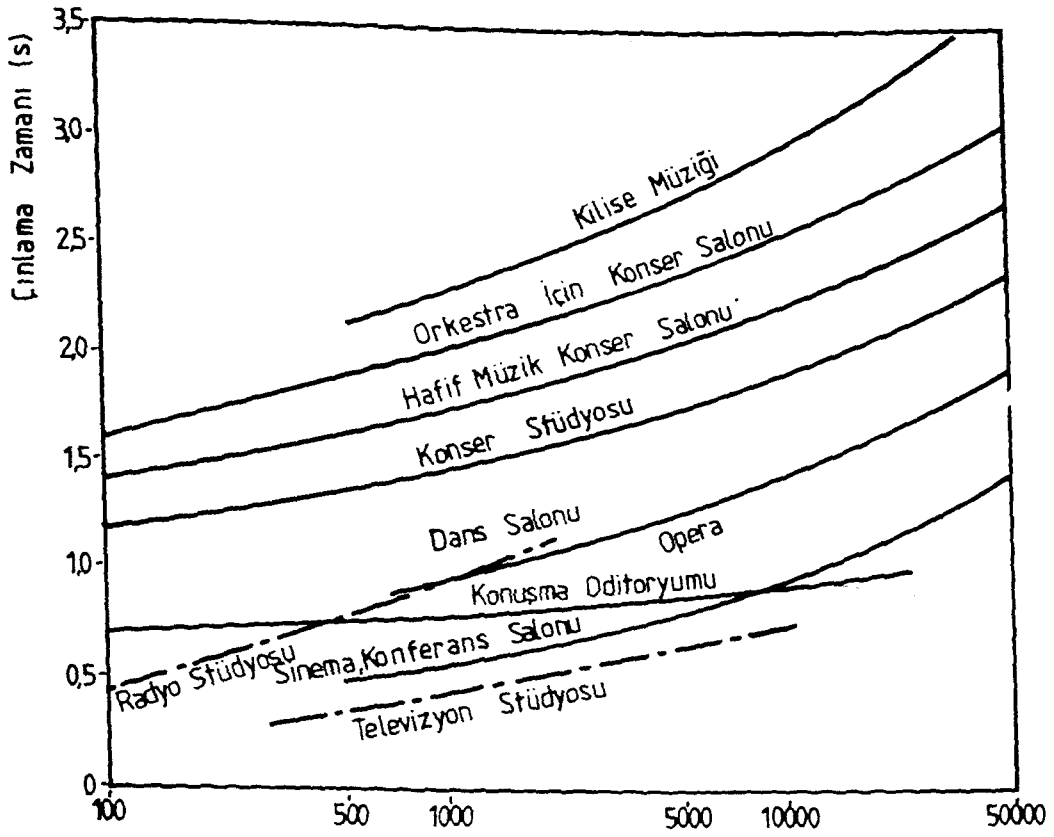
Şekil 1: Süleymaniye Camii planı (H. Güngör'ün arşivinden).



Şekil 2: Mihrimah Sultan Camii planı.

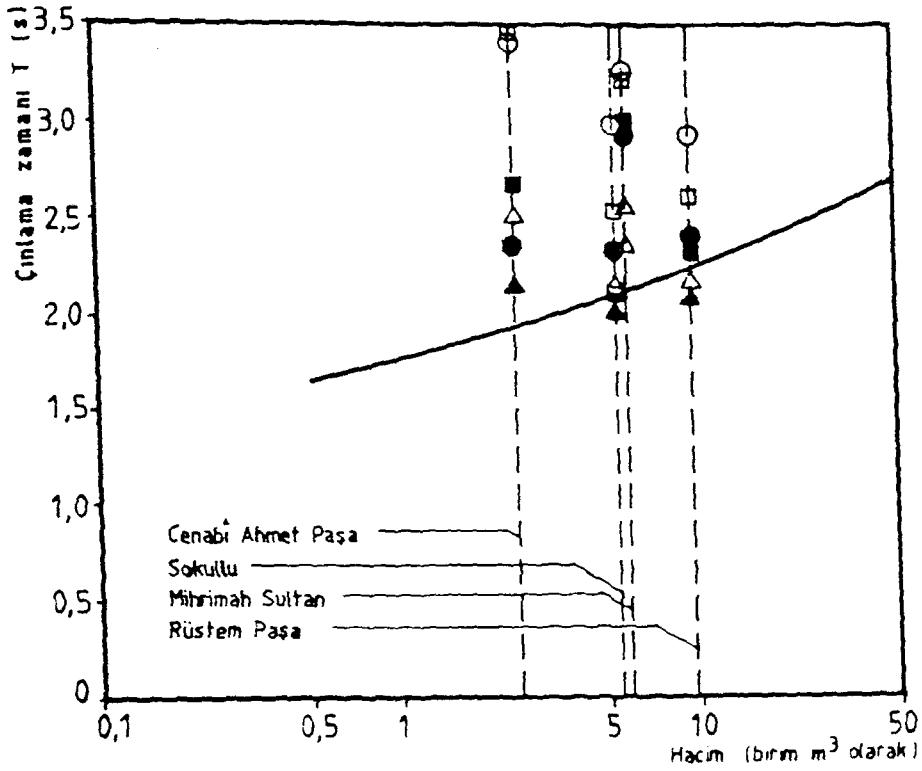
Şekil 3: Çınlama zamanı.

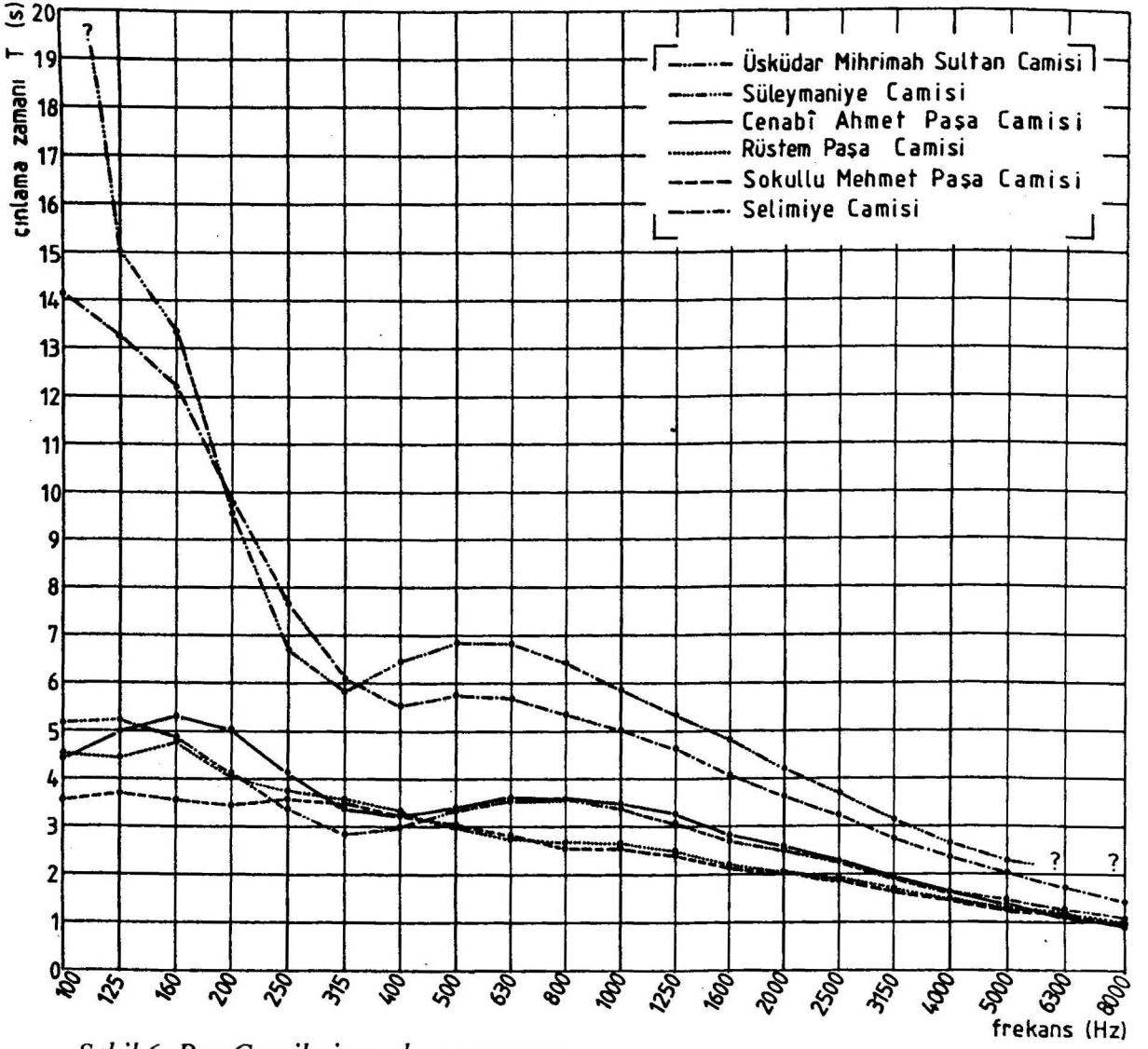




Şekil 4: Çeşitli hacimler için çınlama zamanı eğrileri. Hacim Büyüklüğü (m³)

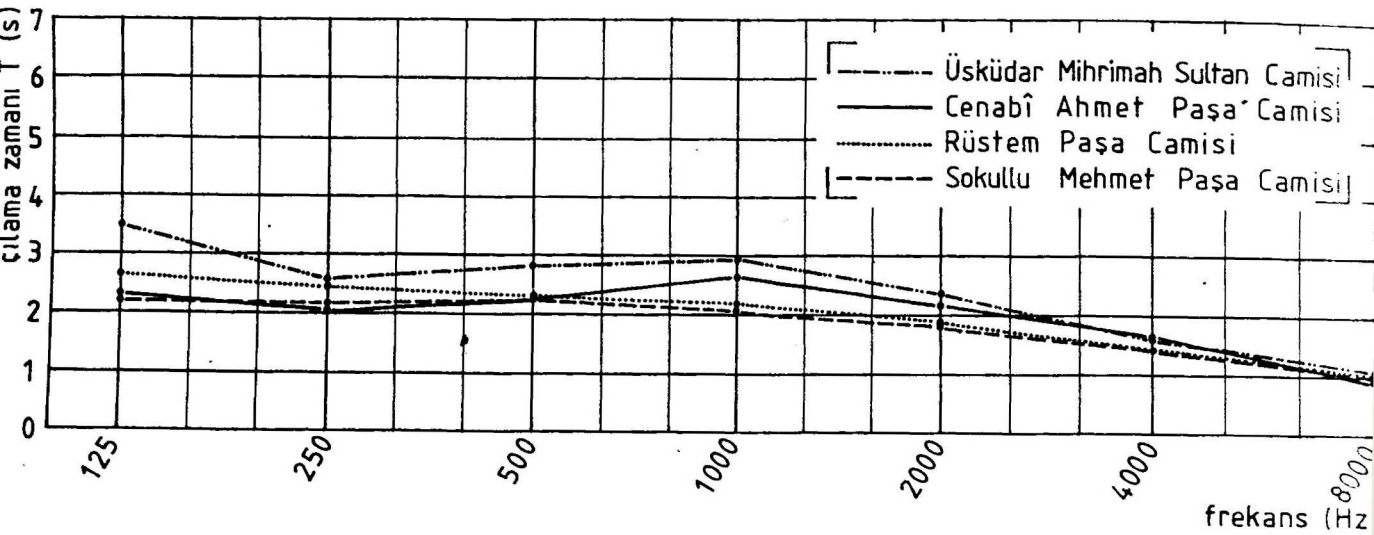
Şekil 5- Camiler için çınlama zamanı. Boş şekiller boş hacimde ölçü sonuçlarını, dolu şekiller dolu hacim için hesap sonuçlarını belirlemektedir. (0 500 Hz, 0 1000 Hz, 2000 Hz.)

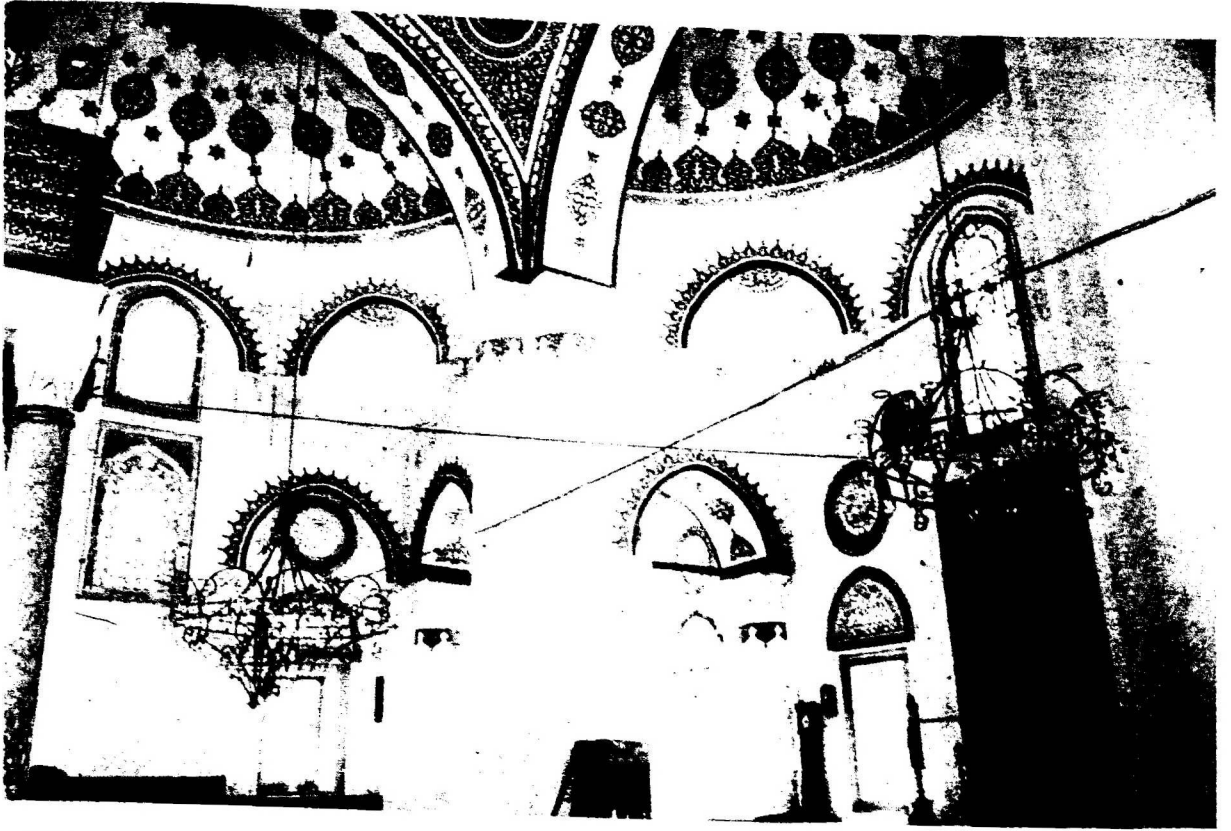




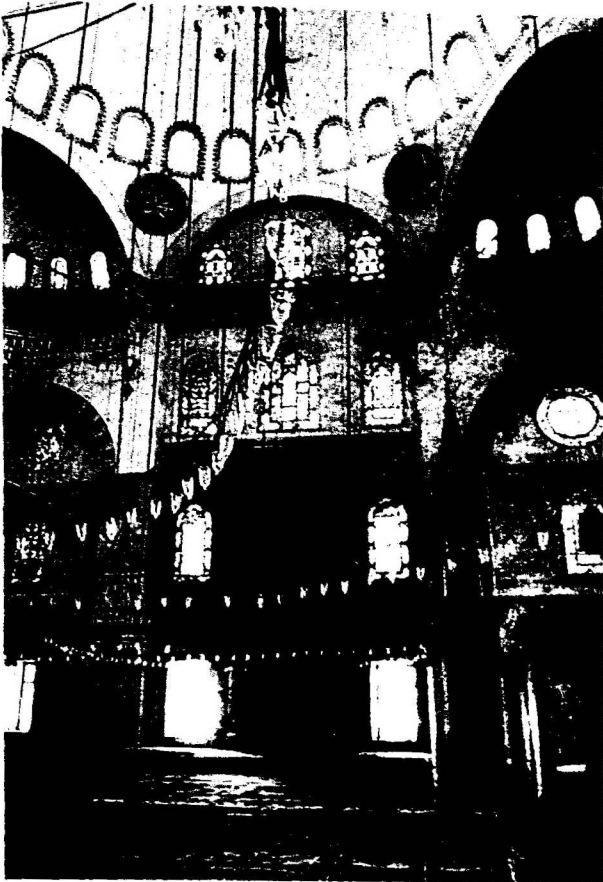
Şekil 6: Boş Camilerin çnlama zamanı.

Şekil 7: Dolu Câmilerin hesap yolu ile elde edilen çnlama zamanları.

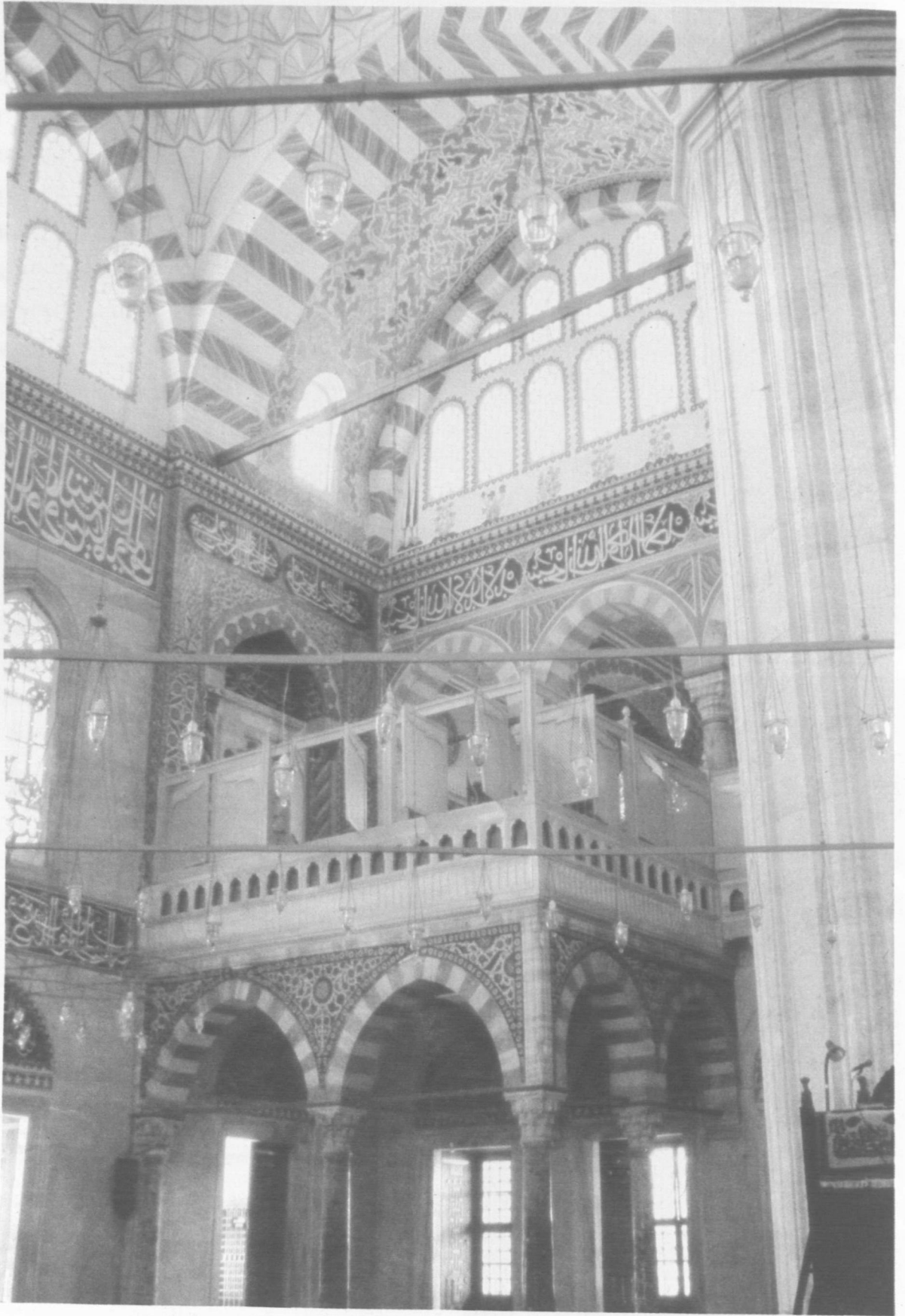




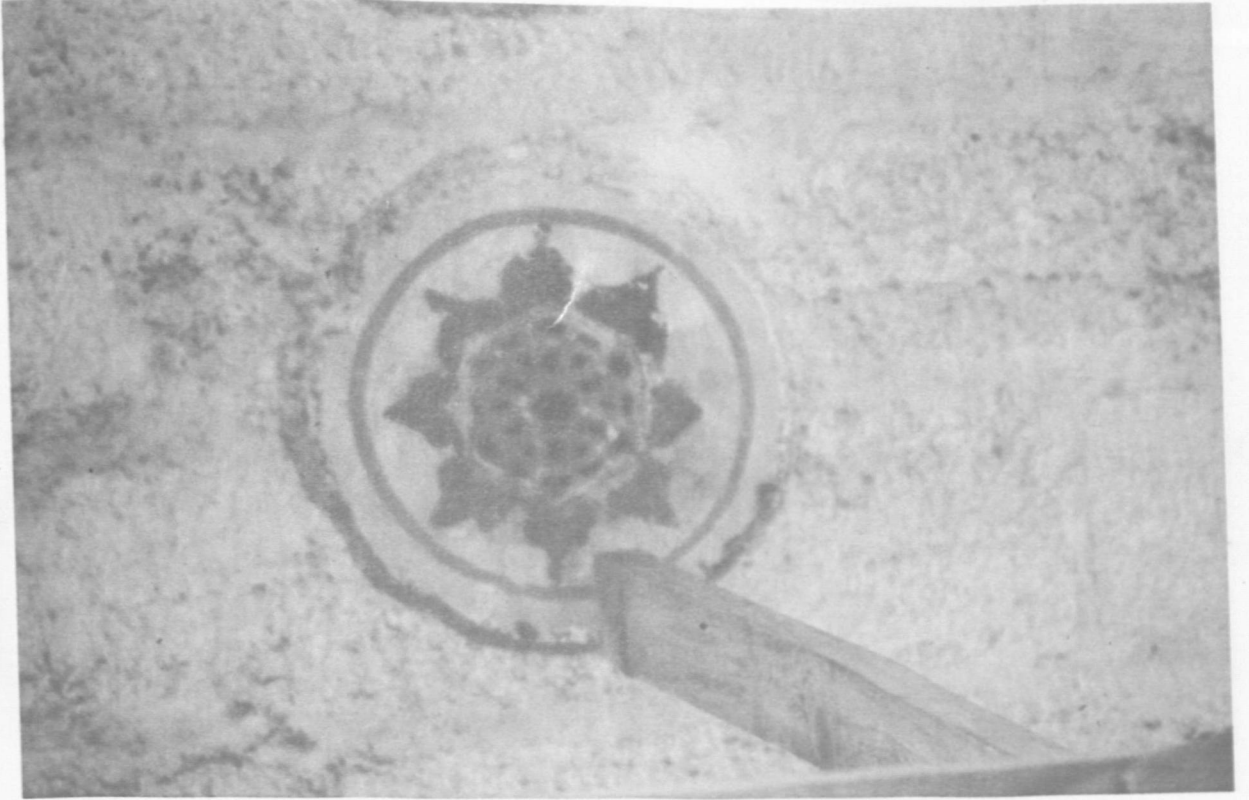
2- Mihrimah Sultan Camii'nin iç görünüşü



1- Süleymaniye Camii'nin iç görünüşü

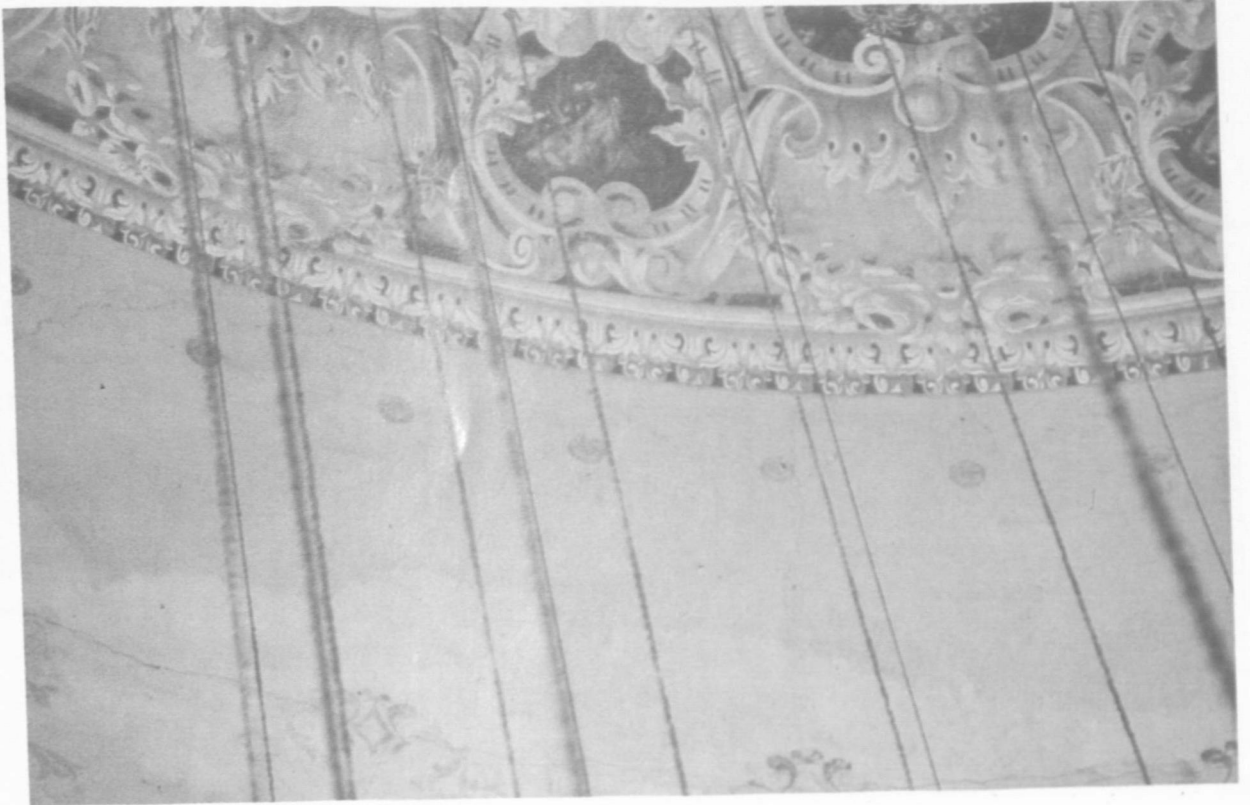


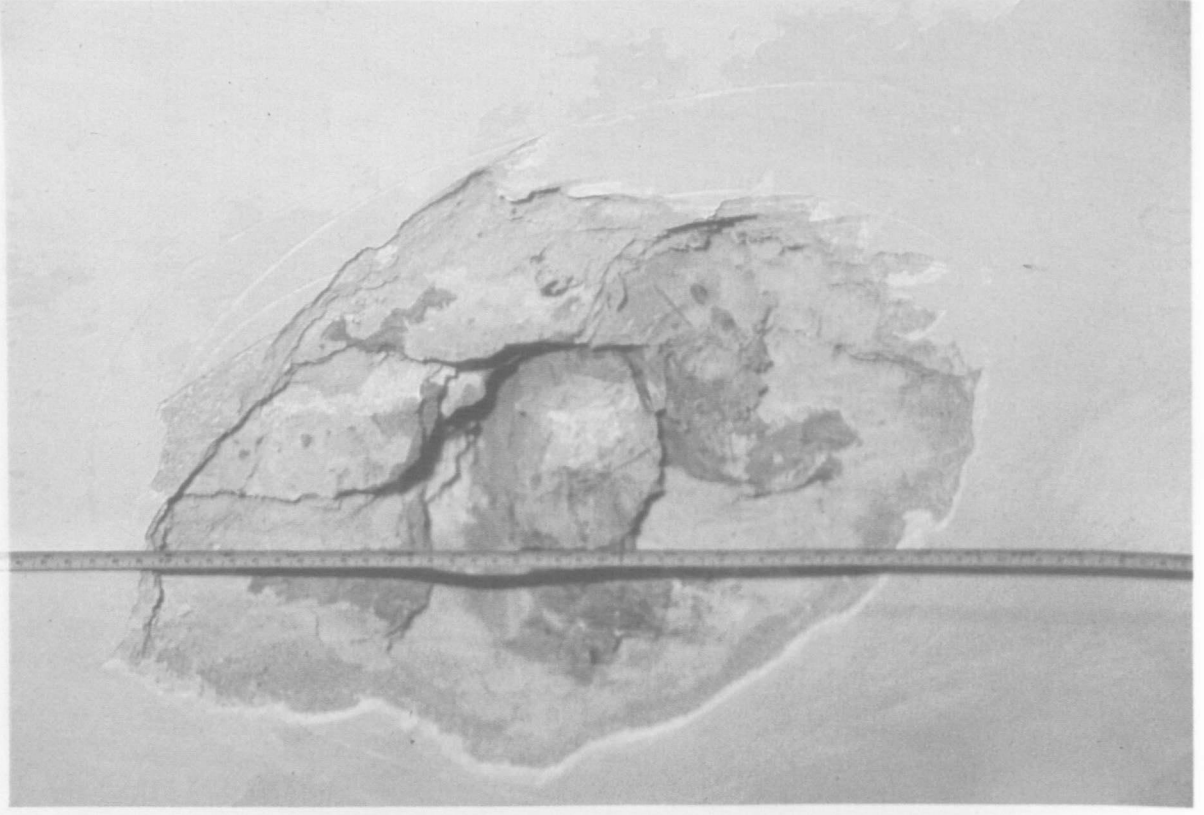
3- Selimiye Camii, hünkar mahfili



4- Şehzade Camii'nin duvarlarındaki rezonatör ağızlarından biri

5- Süleymaniye Camii'nin kubbesinde rezonatörler

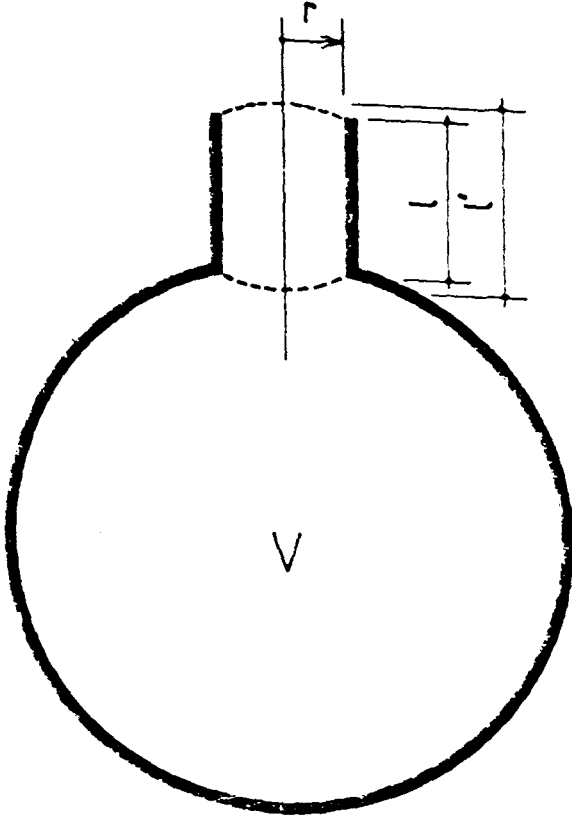




6- Sultan Ahmed Camii'nin kubbesinde ağız takoz çakılarak kapatılmış rezonatör

7- Sultan Ahmed Camii'nin kubbesinde düzeltilmiş rezonatör ağız (orjinal durumu bilinmiyor)





$$\omega_0 = c \sqrt{\frac{S}{l'V}}$$

$$Q = \frac{1}{\theta} \sqrt{\frac{Sl'}{V}} = \frac{k_0 l'}{\theta}$$

burada;

ω_0 : açısal rezonans frekans (rad./s),

c : sesin havadaki hızı (m/s),

S : rezonatör boyunun kesit alanı (m²)
= πr^2 ,

l : boyunun uzunluğu (m),

l' : etkin boyun uzunluğu (m),

V : boşluk hacmi (m³),

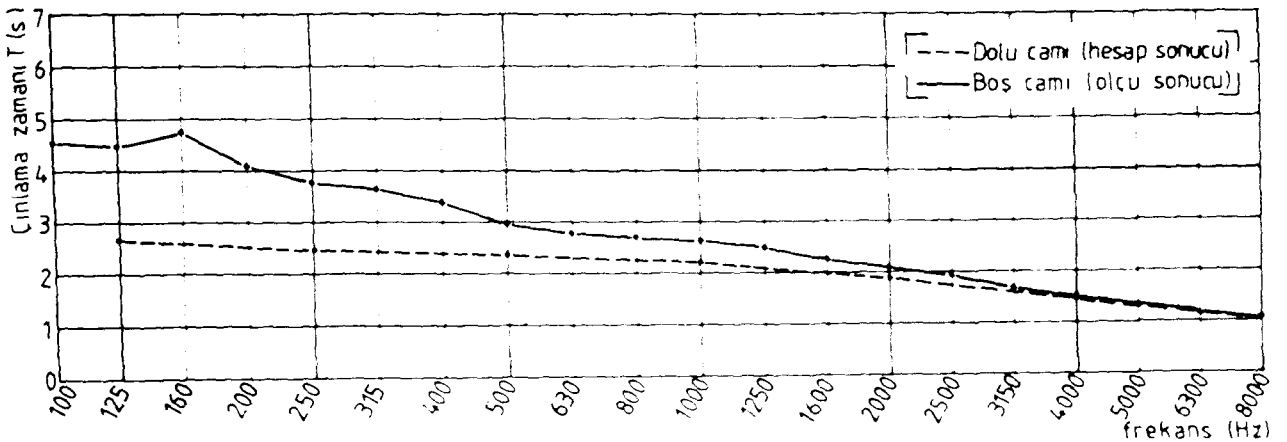
Q : kalite faktörü (birimsiz),

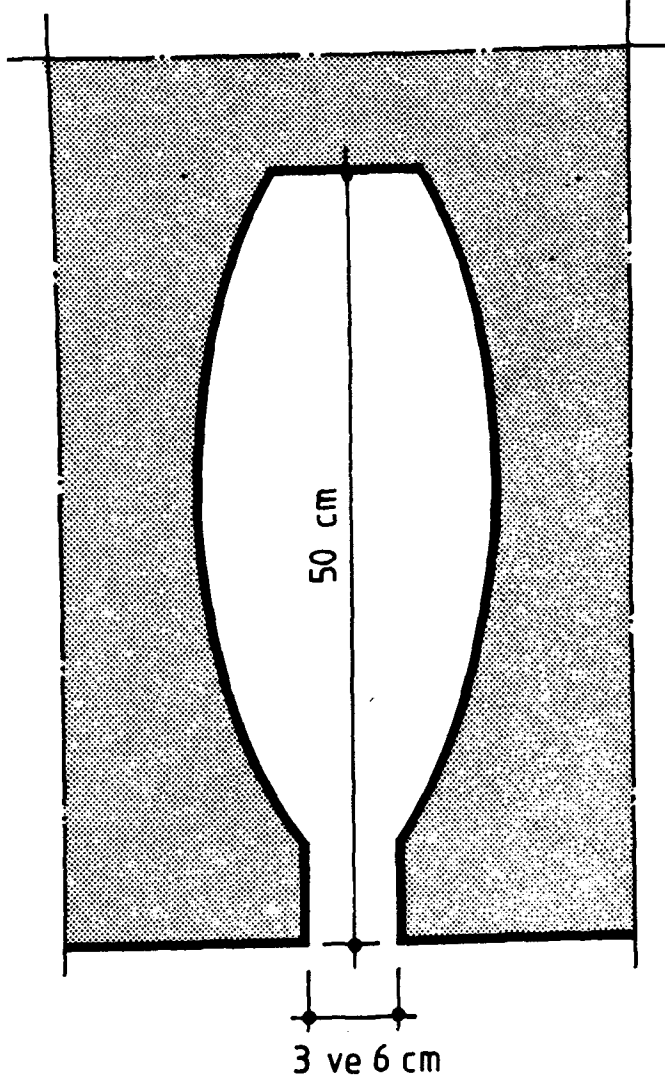
θ : toplam direnç oranı (birimsiz),

k_0 : rezonans frekansta dalga sayısı (m⁻¹)

Şekil 8: Boşluklu rezonatör.

Şekil 10: Rüstem Paşa Camii'nin çınlama zamanı eğrileri.





Şekil 9: Sultan Ahmed Camii'nin kubbesindeki rezonatörlerin kesiti.

Şekil 11: Sokollu Mehmed Paşa Camii'nin çınlama zamanı eğrileri.

