



Geçmişten Günümüze Süleymaniye Camii Akustiği

On The Acoustics of Süleymaniye Mosque: From Past to Present

Zühre Sü GÜL¹, Mehmet ÇALIŞKAN², Ayşe TAVUKÇUOĞLU¹

ÖZET

Osmanlı tarihinin en büyük külliyesinin merkezinde yer alan Süleymaniye Camii'nin akustiği birçok araştırmacının ilgi odağı olmuş ve halen güncelliğini koruyan önemli bir araştırma konusudur. Bu çalışmada Süleymaniye Camii'nin mimari öğeleri ve iç mekan bitirme malzemeleri ile zaman içerisinde onarımlarla geçirdiği değişikliklerin mekanın akustiğine etkileri değerlendirilmektedir. Son dönem onarımlarını (2007-2011) takiben 2013 senesinde sahada akustik testler yürütülmüş; elde edilen veriler 1969 ve 1980 onarımlarının etkilerini yansıtan akustik veriler ile kıyaslanmıştır. Caminin tam kapasite kullanım halindeki akustik koşullarının uygunluğu, akustik benzetim analizleri ile incelenmiştir. Tüm ölçümlerde konuşmanın anlaşılabilirliğini bozacak düzeyde "uzun çınlama süreleri" tespit edilmiş; düşük frekanslarda bu sürelerin çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Caminin dolu hali boş haline kıyasla nispeten daha düşük çınlama sürelerine sahiptir. 2007-2011 onarımları kapsamında yapılmış müdahalelerin, özellikle orta frekanslarda akustik ortama olumlu etkileri berirlenmiş olsa da tüm frekanslarda değerlerin halen kabul edilebilir seviyelerin üzerinde olduğu gözlenmektedir. Camide, konuşmanın anlaşılabilirliğini bozan ikinci etkenin mekanik gürültü kaynaklı "yüksek arka plan ses düzeyleri" olduğu saptanmıştır. Akustik veriler ve caminin özgün akustik ortamına etki eden mimari ve malzeme özellikleri bir arada değerlendirildiğinde, yapının özgün akustik niteliklerine kavuşabilmesi için yapının özgün/tarihi sıvaları ile uyumlu onarım malzemeleri ve uygulamaları üzerine kapsamlı araştırmaların önemine dikkat çekilmiştir.

ABSTRACT

Süleymaniye Mosque, the central structure of one of the largest mosque complexes of the Ottoman Empire, has been and remains an inspirational edifice for many fields, including architectural acoustics and material science. Comprehensive studies are needed to assess the acoustic conditions of Süleymaniye Mosque in relation to its architectural elements, interior finish materials, and any changes which have occurred in acoustic comfort levels as a result of large-scale repairs the structure has been subjected to in its life time. In-situ acoustic tests were undertaken in 2013, immediately following final restoration work done between 2007-2011. These recent data were then compared to previously-published in-situ measurement data showing acoustic conditions in the Mosque after 1969 and 1980 restorations. Acoustic simulations were performed to represent and discuss activity patterns in the structure when full to capacity. As a result of architectural form-geometry and interior material factors, the acoustic field of the Mosque exhibited the presence of very high reverberation times in all field tests, especially at low frequencies. The Mosque was found to suffer from high background noise levels emanating from the mechanical systems introduced during the 2007-2011 restoration. This study also highlights the necessity for further investigations of the acoustic characteristics of burnt-clay pots and historical lime-based plasters. Both should be investigated further in order to scientifically prove their contribution to the acoustics of the Mosque and help to restore the structure's original acoustic comfort conditions.

¹Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, Ankara;

²Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara.

¹Department of Architecture, Middle East Technical University, Ankara, Turkey;

²Department of Mechanical Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.

Başvuru tarihi: 12 Mart 2014 (Article arrival date: March 12, 2014) - Kabul tarihi: 07 Ağustos 2014 (Accepted for publication: August 07, 2014)

İletişim (Correspondence): Zühre Sü Gül. **e-posta (e-mail):** zuhre@mezzostudyo.com

© 2014 Yıldız Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi - © 2014 Yıldız Technical University, Faculty of Architecture

Süleymaniye Camii ve Külliyesi (1550-1557), Kanuni Sultan Süleyman tarafından Mimar Sinan'a yaptırılan zamanın ileri teknolojisi ve fikirleriyle inşa edilmiş Türk Sanat tarihinin en değerli eserlerinden biridir. Osmanlı tarihinin en büyük külliyesinin merkezini oluşturan Süleymaniye Camii, mimari estetik, strüktür, akustik ve malzeme teknolojisi gibi pek çok alanda çalışmalara esin kaynağı olmuştur (Şekil 1). Özgün halinde Mimar Sinan camilerindeki hacim ve yapı akustiğinin üstünlüğü de yaygın bir inanıştır. Bu araştırmanın en önemli hedefi, Süleymaniye Camii'nin, özgün durumu ile zaman içerisinde geçirdiği onarımlar sonrasında akustik niteliklerinde oluşan farklılıkların yorumlanması ve bu yorumlara esas olan verilerin bir araya getirilip derlenmesidir.¹

Bu çalışma kapsamında, 2013 yılında sahada akustik testler yürütülmüş; elde edilen veriler, 1957-1969 ve 2007-2011 tarihlerinde yapılan onarımlar sonrasında yerinde yapılan akustik ölçümlerle birlikte değerlendirilmiştir. Tümü farklı üniversiteler ve tarihlerde gerçekleştirilen önceki ve son ölçümler makale içerisinde karşılaştırmalı analizlere kolaylık sağlaması açısından 'üniversite adı'-tarih' kısaltması ile ifade edilmiştir. Bu çalışmanın kapsamında yürütülmüş ölçümlerde ise ODTÜ-2013 ifadesi kullanılmıştır. Yine bu çalışma çerçevesinde akustik benzetim çalışmaları ayrı bir başlıkta sunulmuştur. Bu kapsamda caminin boş halindeki saha ölçüm verilerine dayanarak güncel durum akustik modeli üretilmiş; model üzerinden, bilgisayar benzetimleri ile caminin dolu halindeki akustik koşulları analiz edilmiştir.

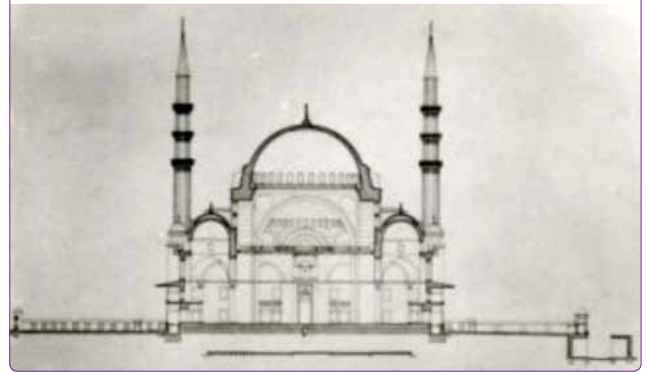
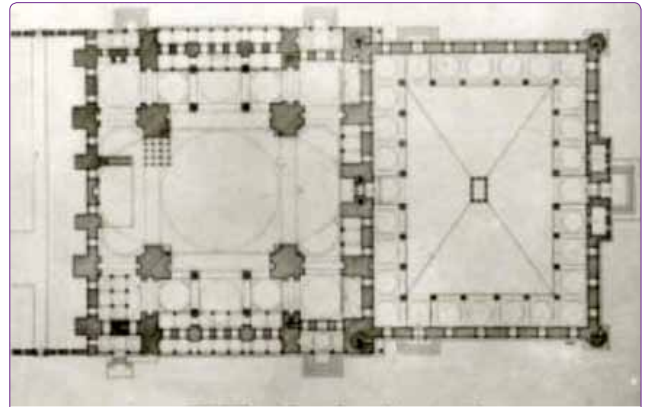
Süleymaniye Camii ve Onarımları

Süleymaniye Camii'nin silüetini temel yapı elemanlarından kubbe, kemer ve uçan payandalar oluşturur. Merkezi kubbe kible ekseninde iki yarım kubbeye, yarım kubbelerin etekleri birer ekseye beslenir ve yan sahninler beşer küçük kubbeye örtülerek caminin üst örtü sistemi oluşur. Cephede kubbeyi taşıyan birincil eleman olan kemer duvarları ve kubbe kasnağı çok sayıda pencere ile hafifletilmiştir. Cami, genişliği ve yüksekliği yaklaşık aynı olan bir gövdeye sahiptir (Şekil 2). Büyük kubbe, dış ölçüleri 70mx61m olan kitlenin ortasında, dört fil ayağı üstünde yükselir. Merkezi kubbenin çapı 26,20m, yüksekliği 49,50m'dir. Cami içerisinde kubbe, yan kubbe ve kemer bağlantıları pandantiflerle yumuşatılmıştır. Mukarnaslar yarım kubbe ve eteklerindeki kubbe geçişleri ve yan kısımlardaki kubbe geçişlerinde yer alır.²

Kullanım çeşitliliği, temin edildikleri farklı bölgeler



Şekil 1. Süleymaniye Camii'nin dış görünüşü (Vakıflar Genel Müdürlüğü Arşivi, 2011).



Şekil 2. Süleymaniye Camii'nin planı (üstte), mihraba bakan merkez aksı kesiti (altta), (Vakıflar Genel Müdürlüğü Arşivi, 2011).

ve yapı uygulama teknikleri ile Süleymaniye Camii'nin malzemeleri başlı başına bir araştırma konusudur. Özgün halinde cami içerisinde yapı ve bitirme malzemeleri, başlıca taş, tuğla, kiremit, sebu ve künk gibi pişmiş toprak malzemeler, harçlar, sıva ve boya katmanları, cam, ahşap ve halı olarak özetlenebilir. Cami içerisindeki taş yüzeylerin çoğu sıva ve bezemelerle kapatılmıştır. Mermer, granit, breş ve Hereke pudingi gibi çeşitli taşlar, yer yer sütun, duvar, söve ve döşeme kaplama malzemesi olarak kullanılmıştır. Sıvalar ve

¹ Cantay, 1989 ve Yılmaz, 2008.

² Mungan, 2007 ve Kuban, 2010.

harçlar kireç, horasan, ince kum, alçı, keten ve saman bileşenlerini kapsamaktadır. Keten, kubbe sıvalarında ve lökünde kullanılmıştır. Cami içinde taşıyıcı özelliği olmayan mukarnaslar, alçıdan yapılmıştır. Özgün halinde camide kullanılan halıların altına kamışlardan örülmüş hasırların serildiği belirtilmektedir.³ Kible duvarları çini ile, kubbeler ise altın varak ve kalem işi ile bezenmiştir.

Süleymaniye Camii'nin 19. yüzyılda sırasıyla 1840, 1844, 1845, 1847, 1870, 1873 yıllarında çeşitli onarımlar gördüğü kaynaklarda yer almaktadır.⁴ 19.yy ortalarında Süleymaniye Camii geçirdiği büyük onarımlar sonucu dönemin zevkini yansıtan farklı bir bezeme uygulamasına sahip olmuştur. Caminin 1958'den günümüze kadar geçirdiği onarımlar, Anıtlar Yüksek Kurulu'nun aldığı kararlar çerçevesinde yürütülmüştür. Yapı, 16. yüzyıldan bu zamana kadar önemli bir yapısal veya mekânsal değişikliğe uğramamış, çeşitli dönemlerde yapılmış bazı ekler dışında kütlele bütünlüğünü korumuştur.⁵

1830'lu ve 1880'li yıllarda, özellikle Fossati tarafından yapılan onarımlarda, kubbe sıvalarının alçı ile onarıldığı, kubbelerde bulunan küplerin (sebuların) kapatıldığı ve tezyinat için alçı macun çekildiği belirtilmektedir. 1959-1969 yıllarında yapılan onarımlar, fil ayakları üzerindeki yağlı boya'nın yenilenmesi, ahşap dolapların belli yerlerde kaldırılması, ahşap pencere ve kapı kasalarının boyanması, kubbe ve kemerler ile camideki bezemelerin bir bölümünün yenilenmesi olarak sıralanmaktadır. Bu yenileme sırasında 19. yüzyıl bezemelerinin kaldırılarak, eski bezemelerin kısmen ortaya çıkarıldığı ifade edilmektedir.⁶

2007-2011 onarımlarından önce caminin genelinde, özellikle taş ve ahşap bölümlerde, dış yan galerilerin tavanlarında ve kubbe içlerinde oluşan rutubet nedeniyle kalem işi yüzeylerde bozulmaların olduğu kayıtlara geçmiştir. Bu dönemde yapılan hasar tespitinde, çimentolu (sıva, harç ve derz dolguları) onarımlar gibi özgün malzemeyle uyumlu olmayan malzeme kullanımının verdiği zararlar ile binanın özgün mimarisine ve estetiğine verilen zararlar sıralanmaktadır. 2011 onarımları sırasında, kubbeden alınan özgün horasan harçlarının analiz edildiği, çimento katkılı sıva ve bezeme yüzeylerin temizlenerek özgün malzemelerle uyumlu harç ve bezemelerle onarım yapıldığı belirtilmektedir. Ayrıca caminin kubbesinde 15cm ağız genişliğinde 45cm uzunluğunda 256 adet küpün iç mekâna bakan ağızlarının açıldığı ifade edilmektedir. Camideki kalem

iş bezemelerinin bugünkü şeklini 1957-1959 ve 2007-2011 onarımları sonrasında aldığı anlaşılmaktadır.⁷

Cami Akustiğine Etki Eden Mimari ve Akustik Parametreler

Akustik açıdan camilerde üç tür etkinlik söz konusudur: Hutbe ve vaazlar, namaz kırdıran imam veya mukabelecinin komutları ve yüksek sesle okunan Kur'an, Mevlit ve ilahiler.⁸ Cami akustiğinden beklenen akustik nitelikler, aşağıda sıralanmıştır:

- verilen vaaz ve hutbelerin anlaşılabilirliğini sağlayacak orta ve yüksek frekanslarda (tiz seslerde) düşük çınlama süreleri,
- mevlit ve ilahilerin okunmasında uhrevi duyguyu geliştirmeyi sağlayacak düşük frekanslarda (bas seslerde) daha uzun çınlama süreleri,
- cami içindeki sesin yeterli düzeyde gürlüğü ya da yüksekliği,
- cami içinde farklı frekanslarda (oktav bantlarda) birbirine yakın ses yutma alanı değerleri,
- cami içindeki dinleyici konumlarında homojen/eşdeğer ses dağılımı,
- ses patlaması, yankı ve ölü noktalar gibi akustik sorunların en aza indirgenmesi,
- konuşmanın anlaşılabilirliğini bozmayacak düzeyde arka plan gürültüsü.

Oda akustiğinde konfor koşullarını etkileyen en belirleyici parametre "çınlama süresi"dir. Çınlama süresi, ses kaynağı kapatıldıktan sonra sönümlenen sesin başlangıçtaki enerjisinin milyonda biri kadar düşmesi (60dB'e eşdeğer) için geçen süre olarak tanımlanmaktadır. Çınlama süresi ne kadar yüksekse hacim içindeki ses alanı o kadar canlı, ne kadar düşüğe o kadar kuru ve ölü olacaktır. Çok uzun çınlama süreleri konuşmanın anlaşılabilirliğini olumsuz yönde etkilerken, çok kısa (düşük) çınlama süreleri, mekânın yeterli geri besleme ve sarma (zarflama) hissini azaltacaktır. "Çınlama süresi" ve "anlaşılabilirlik" arasında bir denge sağlanması için iki gereksinmeden de belli sınırlar içinde ödün verilmesi, güncel deyim ile optimizasyonu ya da eniyilenmesi, söz konusudur.⁹

Çınlama süresi mekânın hacmi ile doğru, mekân içindeki ses yutma alanı ile ters orantılıdır. Önceki araştırmalar, Süleymaniye Camii gibi büyük hacimli ibadet alanlarındaki çınlama sürelerinin mihraba ve minbere

³ Barkan, 1972 ve Çelik, 2009.

⁵ Kütükoğlu, 2000, Ersen vd., 2011 ve Cantay, 2011.

⁴ Vakıflar Genel Müdürlüğü Arşivi, 2011.

⁶ Eyüpgiller, 2007 ve Kayılı, 1988b.

⁷ Eyüpgiller, 2007, Ersen vd., 2011 ⁸ Acar, 2000 ve Karabiber, 1998. ve Cantay, 2011.

⁹ Çalışkan, 2013.

yakın konumlarda orta frekanslarda 4,6s'nin altında, uzak konumlarda ise 4s'nin altında olması gerektiğini ortaya koymuştur.¹⁰ 250Hz'ten düşük frekanslarda çınlama sürelerinde oktav başına 0,2s'lik bir artma ve 2000Hz'ten yüksek frekanslarda oktav başına 0,2s'lik bir azalma beklenmektedir.¹¹ Çınlama süresi frekansa bağlı bir parametre olduğu için malzeme ve hacmin nitelikleri oktav bantlarda farklı ses yutma alanları yaratabilir. Mekân içinde malzeme seçimi, farklı ses yutma alanlarının oluşturulmasında etkilidir. Camilerde ses yutma alanı, temel olarak orta-yüksek frekanslarda ses yutucu malzeme kategorisinde yer alan ve döşeme kaplama malzemesi olarak kullanılan halılar tarafından karşılanır. Buna ek olarak cemaatin yoğunluğu yine orta-yüksek frekanslarda ses yutma alanını arttıran bir etkidir. Dolu camide saflar arası mesafe de düşük frekanslarda ses yutumunu etkileyebilecek bir parametredir.

Malzemelerin ses yutma kapasitesi dışında, yüzeylerin form ve geometrisine bağlı ses saçınım nitelikleri, özellikle homojen ses alanı dağılımının elde edilmesi ve eko, ses patlaması, ikincil kaynaklar, ölü noktalar veya geç yansımalar gibi akustik kusurların önlenmesi açısından son derece önemlidir. Kubbeli cami mimarisinin mekân içi akustiğine olumsuz etkileri bilinmektedir. İç bükey kubbe geometrisi, gelen sesleri yansıtarak tek bir noktaya odaklama eğilimi göstereceğinden belli noktalarda ses patlamalarına yol açarken, başka alıcı konumlarında ölü noktalara sebebiyet verebilir. Bu durum cami içinde ses düzeyi dağılımlarında düzensizliğe yol açar. Kubbe merkezinin cemaatin kulak hizasına düştüğü nokta en kritik durum olarak nitelendirilmektedir. Araştırmalar, zemin ve tavan yüzeylerinin ses yansıtıcı olduğu durumda (kilise yapıları vb.) kubbe formunun, aynı hacme sahip düz tavana göre, özellikle düşük frekanslarda, daha fazla ses yutma alanı sağladığını ortaya koymaktadır.¹² Yansıtıcı ve birbirine paralel iç duvar yüzeyleri de, ses patlamaları ve ikincil kaynak oluşumuna sebep olabilir. Bu tür yüzeylerde hareketlilik sağlayacak mimari öğelerin kullanılmasına ihtiyaç duyulur.

Camilerde ses kaynağı ile dinleyicilerin aynı seviyede olması, sesin bir bölümünün dinleyici kitlesi tarafından yutulmasına neden olur. Elektro-akustik güçlendirmenin olmadığı dönemlerde, büyük camilerdeki ana kubbenin altına, namaz sırasında müezzinlerin oturması için "müezzin mahfili" denilen yerden yüksek bir platform yapılmıştır. Ses kaynağının dinleyici kitlesinden daha yukarı seviyelere taşınması, ses gücünün cami

içerisinde dengelenmesi açısından avantajlı bir durumdur. Günümüzde bu görev elektro-akustik sistemlere yüklenmiştir. Minber ya da vaiz kürsüsünün kullanıldığı hutbe ve vaizlerde ise, konuşmacının yüksekte bulunması olumlu etki yaratır.¹³

Camii içinde çınlama süresi ile birlikte anlaşılabilirliği etkileyen bir diğer parametre "arka plan gürültüsü"dür. Arka plan gürültüsü, bina çeperinden içeriye ulaşacak çevresel gürültü faktörleri ile birlikte mekân içerisinde var olabilecek insan sesi veya mekanik ekipman gürültüsü ile yakından ilgilidir. Camilerde çevresel gürültüyü en aza indirecek şekilde duvar, tavan, kubbe, cam, kapı gibi yapı elemanlarının ses yalıtım özellikleri çalışmalıdır. Diğer yandan mekanik teçhizatın caminin iç hacmine komşu olmayacak şekilde en uzak noktalarda konumlandırılması; havalandırma kanalları içinde ve menfez çıkışlarındaki hava akış hızlarının, arka plan gürültü sınır değerlerini aşmayacak şekilde tasarlanması gerekir. Uluslararası standartlarda konuşma ve/ya müzik aktivitelerinin gerçekleşeceği sese duyarlı mekanlar için havalandırma sistemi kaynaklı en yüksek gürültü düzeyleri 25-30dBA veya gürültü ölçütü cinsinden NC15-20 olarak tanımlanmıştır.¹⁴ Bu standart değerler, cami ve benzeri ibadet alanları için de geçerlidir.

Süleymaniye Camii'nde Yapılan Akustik Ölçümler – Yöntem Tarifleri

• 1988, 1996 ve 2000 Yılları Saha Ölçümleri

1959-1969 yılları onarımlarından sonraki ilk ölçümler 1988 senesinde Gazi Üniversitesi (GÜ-1988) tarafından yürütülmüştür.¹⁵ Bu ölçümlerde 100Hz ile 8000Hz frekans aralığında 1/3 oktav bant dizisi kullanılmıştır. Bir sonraki ölçümler 1996 senesinde Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ-1996) tarafından yürütülmüştür.¹⁶ Ölçümler, mihrap önü ve müezzin mahfilinde konumlanan iki kaynak ile altı alıcı noktadan oluşan bir düzencekle alınmıştır. Kaynaktan geniş bant ses/gürültü sinyali verilmiş, alıcı noktalarında bulunan mikrofon ile hacmin darbe yanıtı kaydedilmiştir. 1959-1969 yılları onarımlarından sonra basılı kaynaklarda yer alan son ölçümler 2000 senesinde "CAHRISMA - Sinan Camilerinin Akustik Yönden Tanımlanması ve Yeniden Canlandırılması Yoluyla Akustik Mirasın Korunması" adlı araştırma projesi kapsamında yürütülmüştür. Ferrara Üniversitesi (UNIFE-2000) ve Danimarka Teknik Üniversitesi (DTU-2000) tarafından yapılan akustik ölçümlerde, kaynaktan süpürme ses sinyali verilmiş, üç kaynak ve on alıcı noktası için farklı konfigürasyonlarda darbe

¹⁰ CAHRISMA, 2003.

¹¹ Orfali, 2007.

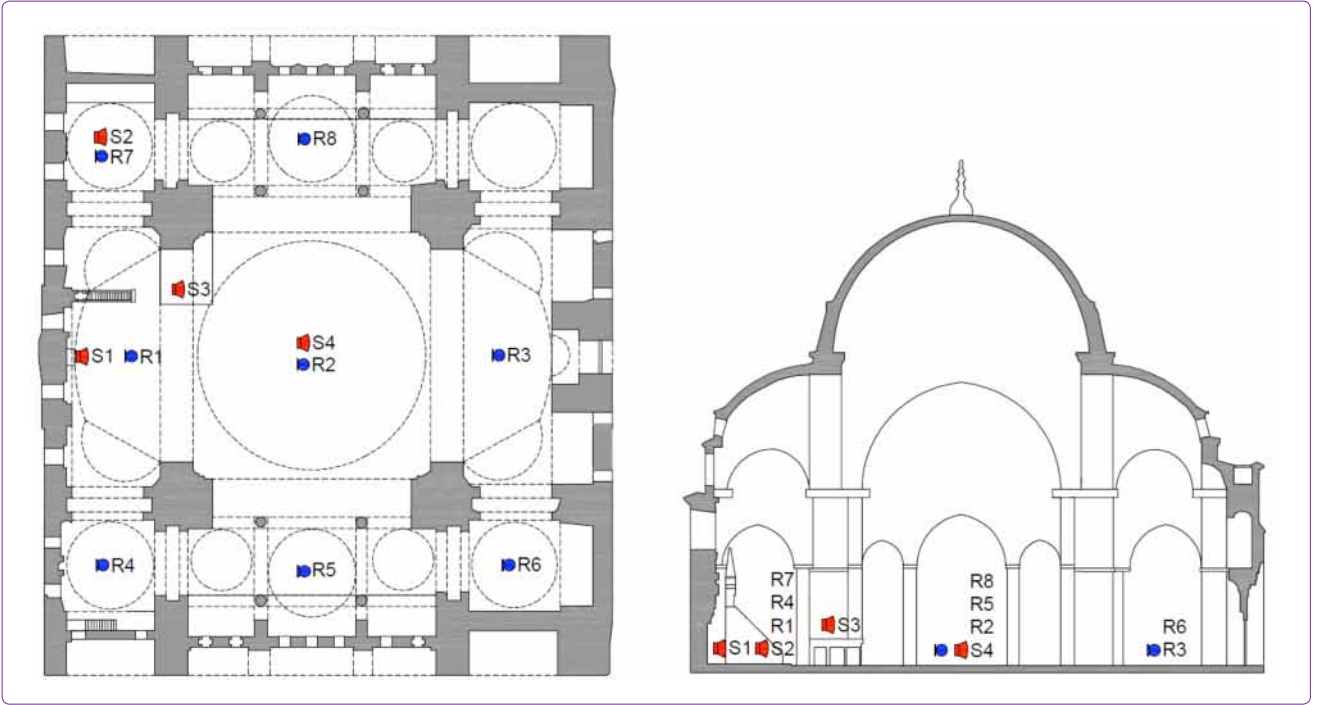
¹² CAHRISMA, 2003.

¹³ Acar, 2000 ve Karabiber, 1998.

¹⁵ Kayılı, 1988a.

¹⁴ ASHRAE, 1987.

¹⁶ Topaktaş, 2003.



Şekil 3. Süleymaniye Camii'nin ODTÜ-2013 yılı saha ölçümlerinde kullanılan düzenek: ses kaynağı (S) ve alıcı (R) noktalarının planda (solda) ve kesitteki (sağda) konumları.

yanıtları kaydedilmiştir. UNIFE 80-18000Hz frekans aralığındaki test sinyali, DTU 35-11500Hz frekans aralığındaki test sinyali 10s'lik darbe uzunluğunda kayıt için değerlendirmiştir.¹⁷

• 2013 Yılı Saha Ölçümleri

Süleymaniye Camii'nin 2011 senesinde tamamlanan onarımlarının ardından mevcut durumu değerlendirmek üzere 23 Şubat 2013 tarihinde ODTÜ tarafından sahada ölçümler (ODTÜ-2013) yürütülmüştür.¹⁸ Cami içindeki ses alanının ana özelliklerini yakalamak için darbe yanıtları toplanmış; ses kaynağından gelen, yansıyan, çevre geometrisi tarafından dağıtılan tüm ses ön dalgalarının geçişi kaydedilmiştir.¹⁹ Akustik parametreler darbe yanıtının logaritmik ifadesi olan "Schroeder Eğrisi"nden hesaplanır.²⁰ Arka plan gürültüsü yüksek olduğu takdirde, asıl sinyalde parametrelerin hesaplanacağı sönümlenme eğrisi aralığında bozulmalar oluşur. Bu sebeple ölçümlerde arka plan gürültüsünün en az 50dB üzerine çıkılarak (Darbe/Gürültü Oranı, INR>50dB) ses enerjisi sönümlenme eğrisinde analiz edilebilir ses alanı kaydetmek hedeflenmiş; her ölçüm noktasında en güvenilir darbe yanıtı elde edilene kadar ölçümler tekrarlanmıştır.

Süleymaniye Camii'nin akustik ölçümleri (ODTÜ-

2013) ISO3382-2:2008 standardına göre yapılmıştır.²¹ Saha ölçümleri, Camii'nin zemin kat ana ibadet alanında, mekân boş haldeyken ve arka plan gürültüsünün en az olduğu yatsı namazı sonrası 19.30 ve 03.00 saatleri arasında yürütülmüştür. Ölçümlerde akustik sinyal üretimi için "B&K-Type4292-L Standart dodec-çok yönlü ses kaynağı" ve "B&K-Type2734-A güç yükseltici" bir arada kullanılmıştır. Darbe yanıtı etkileri ölçüm noktalarında "B&K-Type2250-A el tipi akustik analizör" ve üzerindeki "B&K-Type 4190ZC-0032 mikrofon" ile kaydedilmiştir. 100Hz ile 8000Hz aralığında ilgili spektrumu kapsayan darbe yanıtının örnekleme frekansı 48kHz olarak belirlenmiştir. Süpürme sinyali kullanılarak elde edilen darbe yanıtının uzunluğu olası ikincil çınlamaları kaçırmamak üzere izin verilen en yüksek süre olarak 21,8s'de tutulmuştur. Sinyal üretimi ve son sinyal işleme için "DIRAC Hacim Akustiği-Type7841 v.4,1" yazılımı kullanılmıştır.

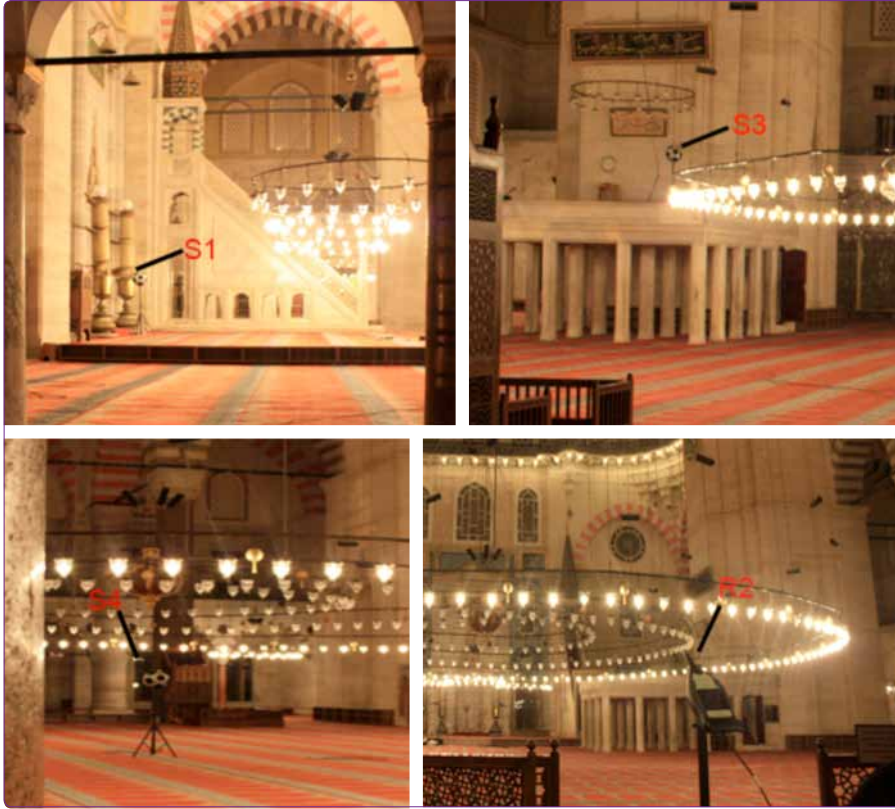
Mihrap önü, müezzin mahfili üstü, yan köşe kubbe ve merkezi kubbe altı olmak üzere dört adet ses kaynağı (S1-S4) ve sekiz adet alıcı (R1-R8) noktası için farklı konfigürasyonlarda ölçümler alınmıştır (Şekil 3 ve 4). Ses kaynakları yerden 1,50m, alıcı noktalarındaki mikrofonlar yerden 1,20m yüksekliklerinde konumlandırılmıştır. Darbe yanıtları son işleminden geçirilerek öncelikle hacim akustiği parametrelerinden "çınlama süresi

¹⁷ CAHRISMA, 2001 ve Karabiber, 2000. ¹⁹ Pompoli ve Prodi, 2000.

²⁰ Schroeder, 1965.

¹⁸ Sü-Gül vd., 2013.

²¹ ISO3382-2, 2008.



Şekil 4. Süleymaniye Camii'nin ODTÜ-2013 yılı saha ölçümlerinden görüntüler (sol üstte S1, sağ üstte S3, sol altta S4, sağ altta R2).

(T20, T30)", "erken sönümlenme süresi (EDT)" ve "beraklık (C80)" değerleri hesaplanmıştır.

2013 senesinde Süleymaniye Camii'nde bir diğer ölçüm Atılım Üniversitesi (AÜ-2013) tarafından yürütülmüştür.²² Bu ölçümlerde 1/3 oktav bant frekans dizisinde 100-8000Hz aralığında veri toplanmıştır.

Süleymaniye Camii Akustik Benzetim Çalışması

Sahada akustik ölçümler, cemaatin hareketliliği ve yaratacağı arka plan gürültüsü gibi pratik sebeplerden, çoğunlukla mekânlar boş halde iken yapılır. Şu ana kadar Süleymaniye Camii'nde yapılan tüm akustik ölçümler, ibadet alanı boşken yürütülmüştür. Mekânların dolu/kullanım hallerindeki akustik performansları, ancak bilgisayar benzetimleri ile analiz edilebilir.

Süleymaniye Camii'nin mevcut durumunu yansıtan üç boyutlu akustik modeli için Vakıflar Genel Müdürlüğü arşivinden²³ temin edilen röleve çizimleri esas alınmıştır. Model, SketchUp yazılımı ile oluşturulmuş; ODTÜ-2013 saha verileri dikkate alınarak mevcut akustik performansı temsil edebilecek niteliklere getirilmiştir. Cami ibadet alanının dolu/kullanım halindeki

akustik performansı "ODEON v.12.12 Oda Akustiği" yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Cami içerisindeki cemaatin ses yutma katsayıları önceki araştırmalardaki test sonuçlarından alınmıştır.²⁴ Kaynaktan yayılan ses ışınlarının hacim içerisinde izlediği patikalar kontrol edilmiş; modelin güvenilirliği, tanımlı kapalı alanın ses ışınlarını sızdırmazlığı ile test edilmiştir (Şekil 5). Model üzerinden caminin akustik etkileşimli iç hacmi, yaklaşık 129,000m³ olarak hesaplanmıştır (Şekil 6).

Bulgular ve Tartışma

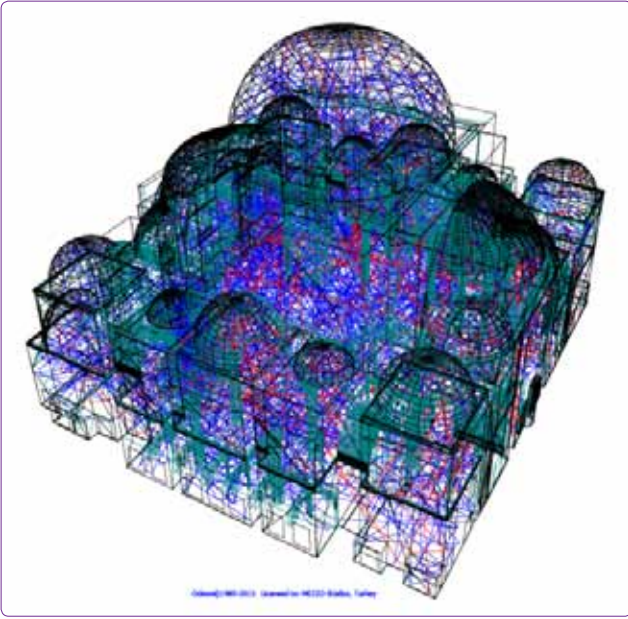
Onarımlar Sonrası Saha Ölçümlerinin Değerlendirmesi

ODTÜ-2013 saha ölçümlerinden elde edilen veriler, diğer araştırmacıların 1988, 1996, 2000 ve 2013 tarihlerindeki saha ölçümlerinden elde edilen verilerle bir arada değerlendirilmiş; yapılan onarımların, Süleymaniye Camii'nin akustiğine etkileri tartışılmıştır. Tüm ölçümlerde "çınlama süresi (T30)", ortak değerlendirme ölçütü olarak kullanılmıştır. ODTÜ-2013 ölçümlerinden 1/3 oktav bantlarında elde edilen veriler Tablo 1'de verilmiştir. GÜ-1988,²⁵ ODTÜ-1996,²⁶ UNIFE-2000, DTU-

²² Eröz, 2013.

²³ Vakıflar Genel Müdürlüğü Arşivi, 2011.

²⁴ Ahnert vd., 2013.

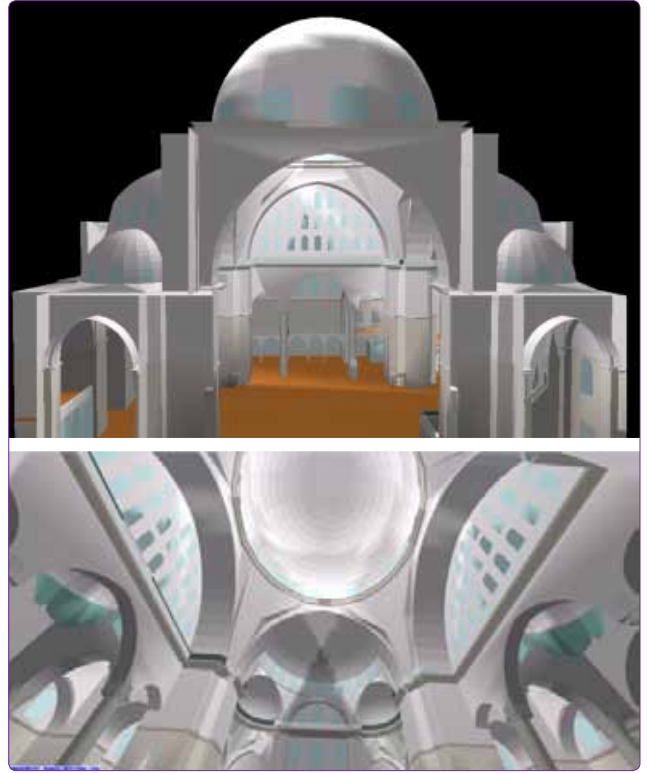


Şekil 5. Süleymaniye Camii'nin akustik modeli ışın izleme görünüşü.

2000,²⁷ ODTÜ-2013 ve AÜ-2013²⁸ ölçümlerinden elde edilen 1/1 oktav bant aralığındaki T30 verileri Şekil 7'de kıyaslanmaktadır.

Bu kıyaslamalar sayesinde 2007-2011 seneleri arasında yapılan son dönem onarımlarının camideki akustik ortama etkileri değerlendirilebilmiştir. Tüm ölçümlerde caminin boş halinde çok uzun çınlama süreleri gözlenmektedir. Konuşma frekanslarında (500Hz, 1000Hz, 2000Hz) camiler için tavsiye edilen 4,6s'lik veya daha geniş frekans spektrumunda ortalamasında 2,8s'lik üst sınır çınlama sürelerinin aşıldığı görülmektedir. Özellikle 125Hz olmak üzere düşük frekanslardaki çınlama süreleri, bu hacimden beklenen değerlerin oldukça üzerindedir. Düşük frekanslı seslerin elektroakustik olarak da güçlendirilmesi ile cami içindeki sesin algılanmasında sorunların artması muhtemeldir.

Camiinin akustik etkileşimli hacmi ve fonksiyonu düşünülüğünde çınlama süresi üst sınır hedef değerinin sağlandığı oktav bant aralığı tüm ölçümlerde geçerli olmak üzere 2000Hz ve üzeridir. Bunun en temel sebebi havanın 2000Hz ve üzerindeki oktav bantlarda ses yutma katsayısının (0.003-0.025) artarak dikkate alınır seviyelere ulaşmasıdır.²⁹ Havanın yüksek frekanslardaki ses alanına etkisi özellikle Süleymaniye Camii gibi büyük hacimli bir mekanda orta ve düşük frekanslara kıyasla önemli ve olumlu bir fark yaratmaktadır.



Şekil 6. Süleymaniye Camii'nin iç hacmi -ODEON 3D- OpenGL görünüşleri.

Tablo 1'deki değerlere göre cami içerisinde konumlar arası çınlama sürelerinde çok büyük farklılıklar gözlenmemektedir. Dolayısıyla çınlama süreleri yüksek dahi olsa ses dağılımı cami içerisinde eşdeğer niteliktedir. Bu durumda cami iç mekan geometrisi ve iç yüzey hareketliliklerinin ses saçınımına olumlu yönde etki ettiği söylenebilir. Ölçüm sistemi, kaydedilebilen en düşük ve en yüksek oktavlar ve ölçüm konumlarındaki ufak farklılıklar göz önünde bulundurulduğunda ODTÜ-2013 ve AÜ-2013 ölçüm sonuçlarının, 125Hz için hesaplanan çınlama süreleri dışında neredeyse eşdeğer ve birbirlerini destekler nitelikte olduğu söylenebilir. ODTÜ-2013 ölçümlerinde³⁰ 100Hz ve altındaki frekanslarda 20s'ye uzayan çınlama süreleri tespit edilmiştir. 125Hz'deki çınlama süreleri, 1/3 oktav bantlarından 100Hz, 125Hz ve 160Hz çınlama sürelerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır; 17.23s'lik çınlama süresi değeri elde edilmiştir. AÜ-2013 ölçümünde 100Hz'de kayıt alınmamıştır. GÜ-1988 ölçümlerinde de ortalamaya dahil edilmeyen ve en yüksek sapma olarak yer yer çınlama sürelerinde 20s'yi geçen değerler elde edildiği belirtilmektedir.³¹ ODTÜ-2013 ölçümlerinde elde

²⁵ Kayılı, 1988a.

²⁸ Eröz, 2013.

²⁶ Topaktaş, 2003.

²⁹ Mehta vd., 1999.

²⁷ CAHRISMA, 2001.

³⁰ Sü-Gül vd., 2013 kaynağında ölçüm verileri 1/1 oktav filtrelemesi ile sunulmuştur. Takip eden analizlerde 1/3 oktavda özellikle 200 ve 250 Hz arasındaki sıçrama

dikkate alınarak, bu çalışmada 1/1 oktav sonuçları için 1/3 oktavların ortalaması alınmıştır.

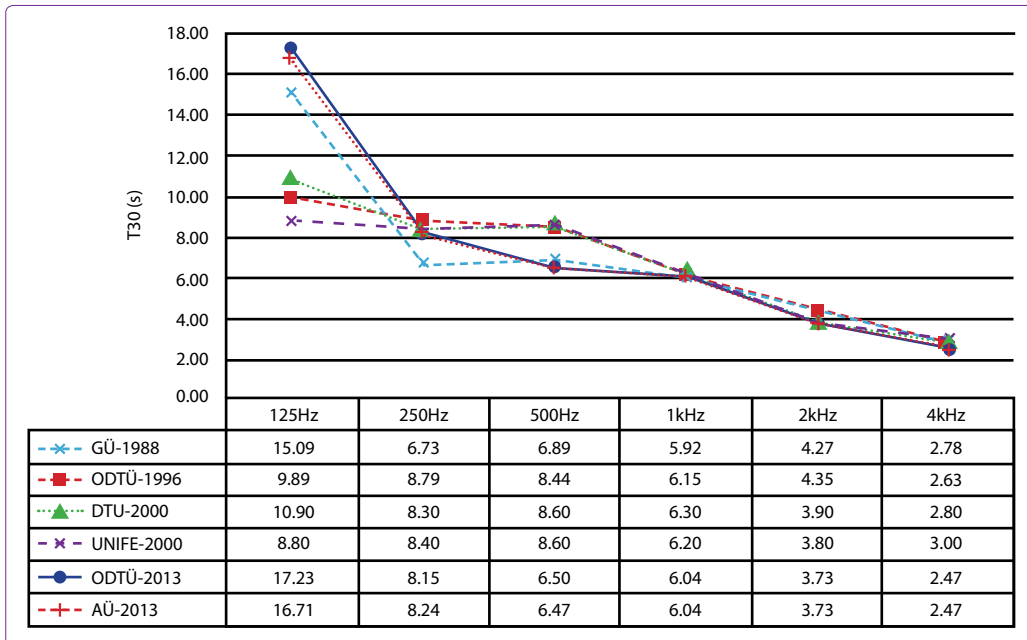
³¹ Kayılı, 1988a.

Tablo 1. ODTÜ-2013 saha ölçümlerinde elde edilen 1/3 oktav bantlarındaki T30(s) verileri

| Konum | Frekans(Hz) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 100 | 125 | 160 | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 | 4000 | 5000 |
| S1R1 | 19,3 | 17,0 | 14,7 | 11,2 | 6,8 | 4,9 | 5,7 | 6,6 | 6,5 | 6,3 | 5,9 | 5,1 | 4,3 | 3,7 | 3,0 | 2,7 | 2,2 | 1,6 |
| S1R2 | 20,1 | 17,3 | 14,6 | 11,3 | 6,9 | 4,8 | 5,8 | 6,5 | 6,7 | 6,4 | 6,0 | 5,1 | 4,4 | 3,8 | 3,2 | 2,7 | 2,2 | 1,8 |
| S1R3 | 19,7 | 17,1 | 15,1 | 11,9 | 7,1 | 4,5 | 6,2 | 6,9 | 6,9 | 6,6 | 6,1 | 5,1 | 4,4 | 3,8 | 3,2 | 2,7 | 2,3 | 1,8 |
| S1R4 | 20,0 | 17,6 | 15,0 | 12,2 | 8,2 | 4,8 | 6,0 | 6,7 | 7,0 | 6,4 | 5,9 | 4,9 | 4,4 | 3,6 | 3,2 | 2,7 | 2,2 | 1,6 |
| S1R5 | 20,0 | 17,3 | 15,3 | 11,8 | 7,5 | 4,7 | 6,2 | 6,7 | 6,6 | 6,4 | 5,9 | 5,1 | 4,5 | 3,8 | 3,2 | 2,8 | 2,3 | 1,8 |
| S1R6 | 19,2 | 17,2 | 14,3 | 12,6 | 8,1 | 4,8 | 6,1 | 6,3 | 6,9 | 6,4 | 6,0 | 5,1 | 4,5 | 3,8 | 3,3 | 2,8 | 2,3 | 1,8 |
| S2R1 | 20,3 | 17,6 | 14,6 | 11,7 | 8,0 | 4,8 | 6,3 | 6,8 | 6,5 | 6,5 | 5,8 | 5,2 | 4,5 | 3,8 | 3,2 | 2,6 | 2,2 | 1,7 |
| S2R2 | 20,0 | 17,6 | 15,4 | 11,9 | 8,5 | 5,0 | 6,3 | 6,3 | 6,9 | 6,5 | 6,0 | 5,1 | 4,5 | 3,8 | 3,2 | 2,7 | 2,3 | 1,8 |
| S2R4 | 19,8 | 16,9 | 14,8 | 10,4 | 8,5 | 4,6 | 5,8 | 6,9 | 6,6 | 6,5 | 5,9 | 5,0 | 4,4 | 3,8 | 3,2 | 2,7 | 2,2 | 1,8 |
| S2R6 | 20,5 | 16,8 | 14,7 | 11,9 | 8,6 | 4,9 | 6,3 | 6,7 | 7,1 | 6,6 | 6,0 | 5,1 | 4,4 | 3,8 | 3,3 | 2,8 | 2,4 | 1,8 |
| S2R8 | 19,8 | 14,8 | 14,1 | 11,5 | 8,4 | 4,5 | 6,0 | 6,6 | 6,8 | 6,4 | 5,7 | 4,8 | 4,2 | 3,6 | 3,0 | 2,5 | 2,0 | 1,6 |
| S3R2 | 20,2 | 17,2 | 14,7 | 11,2 | 7,7 | 4,9 | 6,0 | 6,6 | 6,6 | 6,6 | 5,9 | 5,1 | 4,5 | 3,7 | 3,2 | 2,7 | 2,2 | 1,7 |
| S3R5 | 20,7 | 17,6 | 14,1 | 11,5 | 8,7 | 4,8 | 6,1 | 6,7 | 6,9 | 6,6 | 6,1 | 5,2 | 4,5 | 3,7 | 3,3 | 2,7 | 2,3 | 1,8 |
| S3R7 | 19,8 | 18,6 | 15,2 | 12,1 | 8,1 | 4,9 | 6,2 | 6,8 | 6,7 | 6,5 | 6,0 | 5,2 | 4,4 | 3,7 | 3,1 | 2,7 | 2,3 | 1,8 |
| S4R3 | 20,2 | 16,0 | 14,4 | 11,1 | 8,1 | 4,9 | 5,9 | 6,8 | 6,8 | 6,4 | 5,9 | 4,9 | 4,5 | 3,8 | 3,2 | 2,7 | 2,2 | 1,7 |
| S4R5 | 19,7 | 17,6 | 14,3 | 11,9 | 8,1 | 4,8 | 6,2 | 6,8 | 6,9 | 6,7 | 5,8 | 5,1 | 4,4 | 3,8 | 3,2 | 2,6 | 2,2 | 1,8 |
| S4R6 | 19,6 | 15,3 | 14,9 | 11,7 | 8,8 | 5,0 | 6,0 | 6,8 | 6,7 | 6,7 | 5,8 | 5,1 | 4,5 | 3,8 | 3,2 | 2,7 | 2,2 | 1,8 |

edilen 125Hz'deki çınlama süresinin AÜ-2013 ve GÜ-1988 değerlerinden daha yüksek bulunması, yerinde ölçülen 1/3 oktav bandındaki 100Hz verisinin gerektiği üzere 1/1 oktav bandındaki hesaplamalara dahil edilmesinden kaynaklanmaktadır. 1996 ve 2000 ölçümlerinde 125Hz'te 9-11s mertebesinde tespit edilen

kıyasla düşük çınlama sürelerinin ölçüm sistemindeki farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Sayısal cihazlarla yapılan ölçümlerde kullanılan darbe yanıtı uzunluğunun beklenen çınlama süresinden daha kısa tutulması, sonuçların gerçekten daha düşük olmasına yol açacaktır. Örneğin DTU-2000 ölçümlerindeki mak-



Şekil 7. Saha ölçümlerinden elde edilen 125-4000Hz aralığında 1/1 oktav bantlarda T30 verilerinin kıyaslaması.

simum 10s'lik darbe yanıtı uzunluğunun daha yüksek çınlama sürelerinin tespit edilmesine engel teşkil etmesi mümkündür. Nitekim analog cihazlarla GÜ-1988 tarafından ve sayısal cihazlarla ODTÜ-2013 tarafından yürütülen ilk ve son Süleymaniye Camii akustik ölçümlerinde 125Hz'te 15-17s arasında çınlama süreleri ölçülmüştür. Değerlendirmeler, 125Hz'teki çınlama sürelerinde, 2007-2011 son dönem onarımlarından sonra kayda değer bir değişiklik olmadığını ve bu değerlerin cami mekanı için istenen kriterlerin çok üzerinde olduğunu göstermektedir.

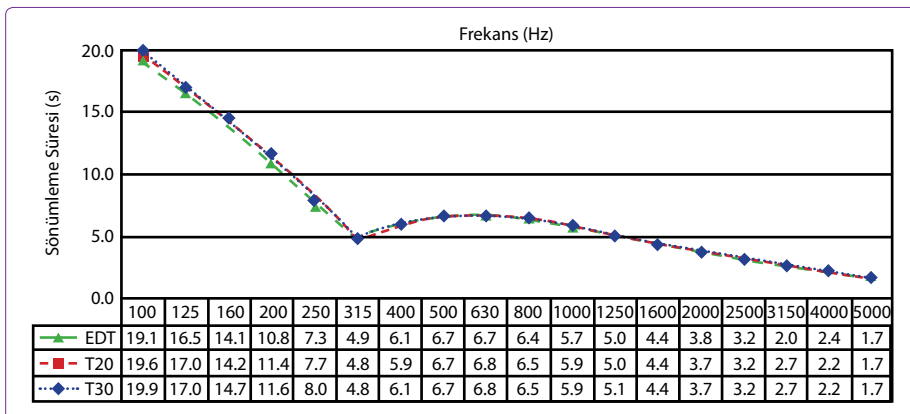
Genel olarak 250-4000Hz aralığındaki tüm oktav bantlarda 2013'te ölçülen çınlama sürelerinin önceki senelere göre belirli oranlarda düşük olduğu tespit edilmektedir. Özellikle 500Hz'te 2s'lik düşüş dikkat çekicidir. Benzer şekilde 2013 ölçümlerinde 4000Hz çınlama süresinde 0,20-0,50s mertebesinde bir azalma gözlenmektedir. 250Hz ve 500Hz'deki çınlama sürelerine bakıldığında, 1988 ölçümlerine göre 1996-2000 ölçümlerinde 1,5-2s mertebesinde bir yükselme göze çarpmaktadır. Açıklayamadığımız bu farklılığı yorumlayabilmek için mevcut basın ve literatürde yer almayan 1988-1996 yılları arasında cami içinde yapılmış olası dar kapsamlı tadilat ve malzeme değişikliklerinin bilinmesi ve izlenmesi gerekmektedir.

Karşılaştırmalı analiz sonuçlarına göre 2007-2011 son dönem onarımları 500Hz başta olmak üzere orta ve yüksek frekanslardaki çınlama sürelerinde faydalı düşüşler sağlamış olsa da tüm frekanslardaki çınlama süreleri halen hedef değerlerin çok üzerindedir. Son onarımlar kapsamında çimentolu sıvaların temizlenmesi ve özgün malzeme ile uyumlu oldukları ifade edilen sıvaların kullanımı caminin akustiğini iyileştirmeye yönelik olumlu müdahaleler olmakla beraber, caminin özellikle düşük frekanslardaki akustik sorunlarını çözmede yeterli olmamıştır. Ağızları alçı siva ile kapatılmış

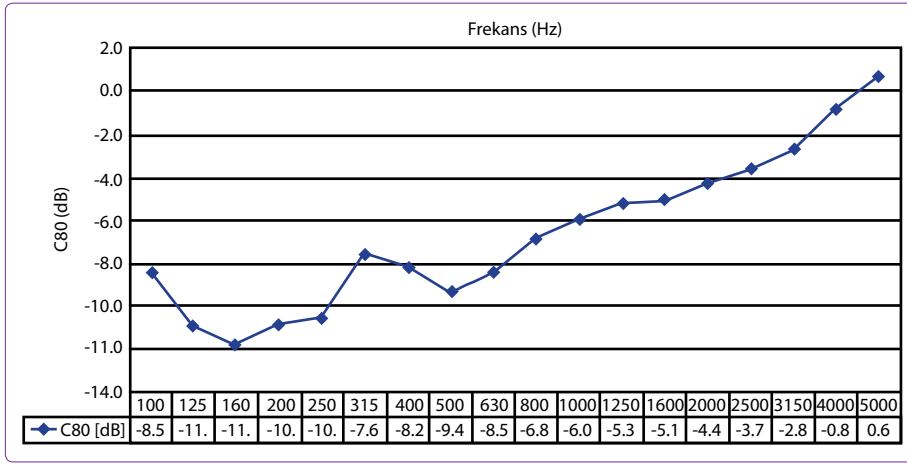
olan kubbedeki sebuların ağızlarının tekrar açılması ve onarılması gibi müdahalelerin akustik etkilerini bilimsel olarak açıklayabilmek ancak mevcut sebu boşluklarının boyut ve geometrik özelliklerinin yerinde tespiti ile mümkün olacaktır.

Bu bölümde saha ölçümlerinin tümünde ortak olarak hesaplanmış çınlama süresi değerleri kıyaslanmıştır. ODTÜ-2013 saha ölçümlerinde çınlama süresine ek olarak camii akustiği değerlendirmelerinde önem arz eden hacim akustiği parametrelerinden erken sönümlenme süresi (EDT) ve berraklık (C80) nesnel parametreleri hesaplanmıştır. Şekil 8'de EDT parametresinin çınlama süresini ifade eden diğer sönümlenme süreleri (T20; ilk 20dB'lik düşüşü dikkate alır, T30; ilk 30dB'lik düşüşü dikkate alır) ile kıyaslaması sunulmaktadır. Şekil 9'da ise ODTÜ-2013 ölçümlerinde hesaplanan berraklık (C80) değerlerine yer verilmektedir. Ses düzeyinin 10dB, 20dB ve 30dB düşüşlerindeki davranışına bağlı olan sırasıyla EDT, T20 ve T30 değerleri Süleymaniye Camii'nde birbirine oldukça yakın seyretmektedir. Bu durum sönümlenme eğrisinde alıcıya daha çok en yakın yüzeylerden yansarak gelen erken enerjinin ilk 30dB'lik ses enerjisi düşüşü sürecinde homojen bir davranış gösterdiğini ifade etmektedir. EDT'nin çınlama süresi indislerine yakın sonuçlar vermesi mekan içindeki dinleyiciye en yakın yüzeylerin konum, form ve saçınım etkilerinin olumlu bir sonucudur.

Diğer yandan erken enerjinin geç enerjiye oranı olarak ifade edilebilecek ve müzikte tınların birbirinden ayırımı ve konuşmada anlaşılabilirlik ile ilintili berraklık parametresi Süleymaniye Camii için hesaplandığında oldukça yüksek değerler gözlenmektedir. Bunun en temel sebebi ana mekan geometrisinin, özellikle merkezi kubbe boyut-hacim ve yüksekliği sebebi ile güçlü geç yansımaları sebebiyet vermesidir. Sönümlenme eğrisinde çınlama kuyruğunun oldukça uzun olması bekle-



Şekil 8. ODTÜ-2013 saha ölçümlerinde elde edilen 1/3 oktav bantlarda EDT, T20 ve T30 verilerinin kıyaslaması.

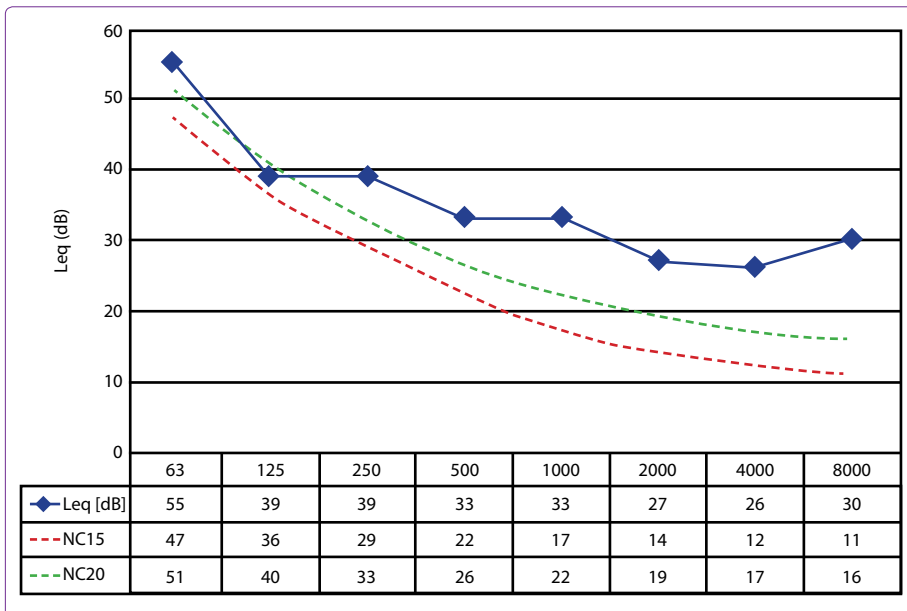


Şekil 9. ODTÜ-2013 saha ölçümlerinde elde edilen 1/3 oktav bantlarda C80 değerleri.

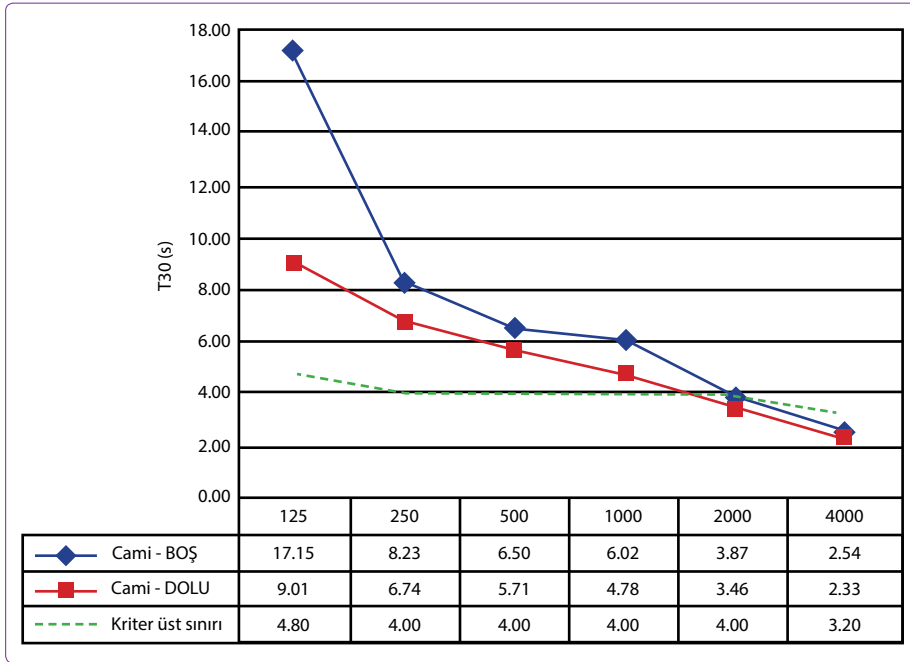
nildiği üzere birbirine zıt akustik parametreler olarak berraklık (C80) değerlerini düşürmektedir. İdeal olarak müzikte 0, -4dB aralığında, konuşmada ise -2, +2dB aralığında kabul edilebilen C80 değerleri Süleymaniye Camii'nde geniş bantta -12, 0dB aralığı ile ibadet alanı içerisinde özellikle konuşmanın anlaşılabilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir.

Sönümlenme oranı/süreleri ve ses sinyalinin gücü sesin anlaşılabilirliğini etkileyen parametrelerden bir bölümüdür. Çınlama süreleri istenilen aralıkta olsa dahi yüksek arka plan gürültüsü maskeleyen özelliği nedeniyle konuşmanın anlaşılabilirliğinde olumsuz bir etken olacaktır. Saha ölçümlerinde kaydedilen yüksek arka plan gürültüsü öznel (sübjektif) olarak konuşma-

ların anlaşılabilirliğini hissedilir düzeyde zayıflatmaktan sorumlu tutulur. "Arka plan gürültüsü" frekansa bağlı bir parametre olduğu için farklı gürültü kaynakları için spektrumu (tayfı) değişkenlik gösterecektir. Bu etkenin Süleymaniye Camii'nin akustiğine ne düzeyde tesir ettiğini değerlendirebilmek amacıyla, ODTÜ-2013 ölçümleri ile elde edilen arka plan gürültü düzeyleri (Leq) Şekil 10'da sunulmaktadır. Cami içinde tespit edilen gürültü düzeyleri, A-Ağırlıklı Ses Düzeyi (LAeq) olarak 39,3dBA'ya karşılık gelirken gürültü ölçütü olarak NC33'ü karşılamaktadır. Bu değer, literatürde camiler için önerilen 25-30dBA veya NC15-20 üst limitlerinin oldukça üzerindedir (Şekil 10). Cami'nin kullanıma kapatıldığı ve trafik gürültüsünün en az olduğu gece



Şekil 10. ODTÜ-2013 saha ölçümlerinde elde edilen 1/1 oktav bantlarda arka plan gürültüsü (L_{eq}) verileri ile NC15 ve NC20 gürültü eğrilerinin kıyaslaması.



Şekil 11. Benzetim analizlerine göre, Süleymaniye Camii'nin boş ve dolu hallerini temsil eden çınlama süreleri (T30) ile kriter üst sınır değerlerin kıyaslaması.

saatlerinde gerçekleştirilen ODTÜ-2013 ölçümlerinde belirlenen yüksek arka plan gürültüsünün, cami içerisinde mihrap duvarı karşısı üst kotta yer alan elektrik panoları soğutucu fanlarından kaynaklandığı anlaşılmıştır. Son restorasyon itibari ile Süleymaniye Camii akustiğinin bozulduğuna dair ifadelerin, bir diğer deyişle konuşmanın işitilmesi veya anlaşılabilirliğindeki sorunların, temel sebeplerinden birinin mevcut fan gürültüsü olduğu rahatlıkla söylenebilir. Kısacası, bu gürültü sorunu vaaz, hutbe gibi anlaşılabilirliği üst seviyede olması gereken ibadet etkinliklerini olumsuz yönde etkilemektedir.

• Akustik Benzetim Verilerinin Değerlendirilmesi

Süleymaniye Camii'nin mevcut durumunu yansıtan ve içerisinde cemaat varken (dolu) ve yokken ki (boş) hallerini temsil eden benzetim analizlerinin sonuçları Şekil 11'de sunulmaktadır. Caminin, Cuma Hutbesi gibi konuşmada anlaşılabilirliğin üst düzeyde olmasını gerektiren etkinlikler esnasında, düşük frekanslardaki çınlama sürelerinin, boş halindeki çok yüksek çınlama sürelerinin yarısına indiği tespit edilmiştir. Orta ve yüksek frekanslardaki çınlama sürelerinin de önerilen aralığa yakın değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, Süleymaniye Camii'nin tam dolu kullanım halinde oluşan akustik alanının, uygun ölçüt değerlere çok daha yakın olduğu gözlenmektedir.

Mevcut duruma yakınsanan akustik model üzerinden bir diğer benzetim, ön çalışma kapsamında fark-

lı sıvalar üzerinde yürütülmüştür. Buna göre mevcut durum sıva girdileri, Süleymaniye Camii ile aynı dönemlerde inşa edilmiş olan tarihi hamamların özgün iç mekan sıvalarına ait ses yutma katsayıları³² ile değiştirilmiştir. Yenilenen benzetim sonuçları ile aynı kullanım koşulları için özgün sıva örneği uygulamasında çınlama sürelerinin konuşma frekanslarında (vaiz için 250-2000Hz) ortalamada 2s bir düşüşe olanak sağlamıştır.

• Özgün Halinde Süleymaniye Camii Akustiği Değerlendirmeleri

Yıllar içinde bir dizi onarım görmüş Süleymaniye Camii'nin akustik özellikleri ölçümlerle belirlenmiş olsa da, bu ölçümlerden elde edilen akustik veriler, caminin özgün akustik niteliklerini yansıtmamaktadır. Bunun yanı sıra, caminin yapıldığı çağda kendisinden beklenen akustik özelliklerinin şimdiki akustik gereksinimlerle ne denli uyumlu olduğu konusu da tartışılmaktadır. Bu camilerin günümüz koşullarındaki kullanımı, hoparlör sistemi ve elektro-akustik güçlendirmeyi talep etmektedir. Doğal akustik koşullarda kullanımı için tasarlanmış olan bu yapıların, gerekli önlemler alınmadan elektro-akustik düzeneklerle donatılması durumunda önemli akustik sorunlarla karşılaşılması tabiidir.³³

Doğal sese yönelik hacim akustiğine doğrudan etkisi olan mimari parametrelerden en önemlileri, ana

³² Tavukçuoğlu vd., 2011 ve Aydın, 2008.

³³ Çalışkan, 2013.

mekân hacmi ve geometrisidir. Süleymaniye Camii'nin bugüne kadar ana mekân hacmi, geometrisi ve boyutlarında değişikliklere neden olacak müdahalelerin yapılmadığı bilinmektedir. Camideki en belirleyici form, merkezi kubbedir; bu form yanal ve yarım kubbelele tamamlanmaktadır. Kubbenin yol açabileceği "ses odaklaması" sorununun akustik ortama olumsuz etkilerini engellemek için kubbe çapı, odanın toplam yüksekliğinden daha fazla olmalıdır. Süleymaniye Camii'nde en büyük çaplı merkezi kubbede dahi kubbe ses etki alanı dinleyici konumlarından yaklaşık 20m yüksektedir. Bu durum, Süleymaniye Camii'ndeki kubbe akustiğinin, ana odaklama merkezlerini en aza indirecek hassasiyette tasarlandığını göstermektedir.

Buna rağmen geniş yüzeyleri ile kubbe formları, sesi odak noktalarında toplayarak cami içerisinde saçınma olumsuz yönde etki eder ve eşdeğer ses alanı yaratılmasına engel olur. Sinan, camilerindeki kubbelede geometrik simetrisinin beraberinde getireceği akustik olumsuzlukları kubbe mekânını genişletici ve akustik asimetriye olanak sağlayan sebu³⁴ uygulaması ile kırmaya çalışmıştır. Pişmiş kilden yapılmış sebu kısa bir boyundan sonra bir miktar genişleyen, dibe doğru tekrar daralan (ince-uzun amforalara benzer) bir forma sahiptir. Sebular aynı zamanda statik açıdan kubbe yükünü hafifletme görevini üstlenir. Akustikte sebular fiziksel formları neticesinde Helmholtz rezonatörü olarak tanımlanır. Bu elemanlar ses enerjisini dağıtarak yansıtma ve frekans spektrumu/tayfı üzerinde dar bantta düşük oktavlarda (63-250Hz) sesin bir bölümünü kendi içine hapsederek yutma işlevine sahiptir.³⁵

Süleymaniye Camii ve İmareti inşaatına ait muhasebe defterlerinin 88'incisinde (D.88. Yp. 19/a) tane si 2 akçeden 255 adet "Sebu" (Baha-i Sebu, beray-i kubbe-i cami-i şerif) satın alındığı yazılıdır.³⁶ Araştırmalara göre merkezi kubbeye bu testilerden bir daire üzerinde 64 tane yerleştirildiği ve uzunluklarının 50cm, ağız (boyun) çaplarının ise kullanıldıkları yere göre 2-6cm arasında değiştiği belirtilmektedir.³⁷ 2007-2011 onarımlarında Süleymaniye Camii'nin kubbesinde, ağızları iç mekâna bakan, 15cm ağız genişliği ve 45cm uzunluğuna sahip 256 adet küpün tespit edildiğinden bahsedilmektedir.³⁸ Helmholtz işlevindeki bu elemanların çok sayıda ve farklı boyutlarda kullanımı, etkili oldukları düşük frekanslarda bant aralıklarını genişletecektir. Saha ölçümlerinde tespit edilen bas seslerdeki uzun çınlama sürelerinin, caminin özgün

kullanım koşullarında sebu uygulaması ile belirli ölçüde iyileştirilmiş olması mümkündür. Sebu açıklıklarıyla beraber Süleymaniye Camii'nin plan ve kesit şemasında tasarlandığı şekilde hacimlerde karşılıklı düz yüzeylerin mahfil ve nişlerle bozulması, yapı öğelerine sesi dağıtarak yansıtacak mukarnas, künde kari, çini gibi öğelerle hareketli formlar verilmesi farklı frekans aralıklarında ses saçınımı/yayılmı ile homojen ses dağılımına katkı sağlayacaktır.

Süleymaniye Camii boyutlarındaki mekanlarda hacimden beklenen yüksek çınlama sürelerinin kontrol altına alınması gerekir. Mekanın hacmi dışında çınlama süresine etki eden bir diğer faktör yüzey bitirme malzemelerinin ses yutma alanlarıdır. Frekans bazında ses yutma alanı malzemenin yüzey alanı ile ses yutma katsayısının çarpımına eşittir. Ses yutma alanı arttıkça çınlama süresi düşer. Süleymaniye Camii'nde sıkı ve parlak dokulu taş duvar, kolon ve fil ayak kaplamaları yansıtıcı yüzey alanlarını oluşturur. Camii'nin iç mekânında kullanılan taşların akustik değerleri tahmin edilebilmektedir.³⁹ Bilinmeyenler ise bugüne kadar onarımlarla değişmiş kubbe, kemer ve duvar yüzeylerini kaplayan sıva ve bezemelerin akustik nitelikleridir. Geniş yüzey alanına sahip kubbe, kemer gibi yapılarda uygulanan sıvaların ses yutma kapasitelerinin mekânsal çınlamaya etkisi son derece önemlidir. Nitekim çok büyük hacme sahip Süleymaniye Camii gibi ibadet alanlarında halıya ek olarak ses yutucu farklı yüzeylere ihtiyaç duyulur.

Süleymaniye Camii ve İmareti inşaatına ait muhasebe defterlerinin 108'incisinde, kubbenin sıvanması için gerekli olan 134 kantar "keten" satın alındığı (Beray-i siva-i kubbeha-i cami-i şerif) kaydedilmiştir. Başka defterlerde de kutsal yapının sıvası için 524 kantar "keten" (Beray-i siva-i bina-i şerif) satın alındığı görülmektedir.⁴⁰ Süleymaniye Camii'nin iç yüzey sıvalarında keten kullanılması, akustik nitelikleri bakımından önemli bir veridir. Kubbe sıvasındaki keten kullanımının özellikle düşük-orta frekanslarda iyileştirici etki göstereceği söylenebilir. Keten aynı zamanda sıvayı esneklik modülü ve çekme direnci gibi mekanik özellikleri bakımından güçlendirici niteliktedir.⁴¹ Sinan'ın kubbe ve duvarların yansıtıcı yüzeylerini keten liflerini kullandığı sıvalarla gözenekli ve esnek hale getirmeye, bu sayede yeterli ses yutumu sağlayarak çınlama sürelerini kontrol altına almaya çalıştığı anlaşılmaktadır.

Bu değerlendirmeye destek sağlayacak dönemin yapılarında nitelikli sıva katmanlarından oluşan ve birçok işlevi yerine getirebilen çok katmanlı bir sıva teknoloji-

³⁴ Farsçada: testi

³⁵ Long, 2006, s.203.

³⁶ Barkan, 1972.

³⁷ Acar, 2000, Kayılı,1988b ve Kayılı, 2002.

³⁸ Radikal, 2010.

³⁹ CAHRISMA, 2003.

⁴⁰ Barkan, 1972.

⁴¹ Dalmay vd., 2010 ve Bos vd., 2002.

sinin var olduğu bilinmektedir.⁴² Sinan camileri üzerine yürütülmüş bir araştırmada kubbe ve duvar yüzeylerinin işlevlerine göre farklı özelliklere sahip daha çok ke-ten kırıntılı ve kırıkt bileşimli, gözenekli ve yumuşak dokulu horasan harçları ile sıvandığı tespit edilmiştir.⁴³ Düşük ve orta frekanslarda iyi birer ses yutucu malzeme olduğu belirtilen bu sıvaların yerine veya üzerine sert ve sıkı dokulu alçı sıvalar ile yapılan onarımların akustik ortama olumsuz etkilerinin olduğu, düşük ve orta frekanslarda mekânın çınlama sürelerinde dalgalanma ve artışa neden olduğu belirtilmektedir. Başka bir araştırmada Süleymaniye Camii ile aynı dönemlerde inşa edilmiş olan tarihi hamamların özgün iç mekan sıvalarına ait ses yutma katsayıları ölçülmüştür.⁴⁴ Bu araştırmaya göre tarihi Türk hamamlarında kullanılan çok katmanlı puzolanik katkılı kireç sıvaları, orta frekans aralığında (500-1000Hz) ve kuru ortamda, günümüz çimento sıvalarından sekiz buçuk kat daha fazla ses yutma kapasitesine sahiptirler. Bu tarihi sıvaların NRC (ses yutma katsayısının 250-500-1000-2000Hz oktav bantlarındaki ortalaması) değeri de, günümüz çimento sıvalarınıninkine göre yaklaşık 14 kat daha yüksektir.

Süleymaniye Cami içerisindeki mevcut sıvalı yüzeyler yaklaşık 19,188m² kadar büyük bir alanı kaplamaktadır. Geliştirilen akustik model üzerinden ön bir çalışma ile sıva yüzeyleri öncelikle çimento bazlı sıva ile benzetime sokulmuş, daha sonra tarihi hamam sıvalarının ses yutma katsayıları hesaba katılmıştır. Tarihi hamam sıvaları ile orta frekans aralığındaki çınlama sürelerinde 2s'lik bir düşüş hesaplanmıştır. Bu sayısal fark, ses yutma katsayısı yüksek olan tarihi sıvaların, yerinde korunabil-selerdi eğer, cami içerisindeki çınlama süresine ve do-layısıyla caminin akustiğine olumlu etkilerinin ne denli büyük olacağına işaret etmektedir. Son dönem onarımlarında, çimento bazlı sıvaların kaldırılıp, yerine horasan sıvalarıyla onarımların yapıldığı ifade edilmiş olsa da, 2013 saha ölçümlerinde yüksek çınlama sürelerinin ölçülmesi, mevcut sorunun devam ettiğini göstermektedir. Bu durum, Süleymaniye Camii'nin kubbelerinde kullanılan ve akustik açıdan iyi/özellikli niteliklere sahip olduğu düşünülen tarihi sıvaların gerçek akustik performansını araştırmaya değer kılmaktadır.

Çınlama süresinin frekansa göre fazla değişmemesi için, tüm frekanslardaki yutuculukların da dengeli olması gerekir. Halılar yüksek frekanslı seslerin yutulmasına olumlu etkilerinden dolayı, iç ortamdaki konuşmanın anlaşılabilirliği açısından kilise gibi diğer ibadet yapılarına kıyasla camilerde önemli bir avantaj sağlar.

Halı kaplaması yerden yükseltilmemişse, diğer bir de-yişle halının altında en az 5-10 cm yüksekliğinde bir platform bulunmuyor ise, daha çok orta ve yüksek frekanslarda (1000-8000Hz aralığında) etkilidir. Süleymaniye Camii'nin özgün halısı ve zemini ile ilgili kayıtlarda, bu tür bir platformun varlığından bahsedilmemektedir. Bu durumda özgün halının düşük frekanslardaki ses yutma kapasitesinin az ve mevcut halının performansı ile benzer olacağı tahmin edilebilmektedir.⁴⁵ Kaynaklarda, caminin özgün halinde halıların altına hasırların serildiği belirtilmektedir.⁴⁶ Bu uygulamanın, camii içerisinde özellikle orta frekanslardaki ses yutma alanına olumlu yönde katkı sağlamış olduğu söylenebilir. Bunların yanı sıra ibadet sırasında cemaatin varlığı, insan formu ve oturma sıklığı, ses saçını ve yutumunu artırıcı etkenlerdir.

Büyük bir külliyeinin merkezinde, geniş alanlı bir dış avlunun ortasında konumlanmış ve kalın/yoğun bir yapı örgüsü ile inşa edilmiş olmasından ötürü Süleymaniye Camii'nin özgün koşullarında çevre gürültüsünün yol açabileceği olumsuz etkileri en aza indirgeyebilecek ses yalıtımlı bir dış çepere sahip olduğu düşünülmektedir. Süleymaniye Camii'nin, trafik gibi çevresel gürültü faktörlerinin en az olduğu ve iç mekânda mekanik havalandırma sistemlerinin kullanılmadığı geçmiş dönemlerinde, mekândaki konuşmaların anlaşılabilirliğine olumsuz etki edebilecek yüksek düzeyde bir arka plan gürültü sorununun var olmadığı açıkça söylenebilir. Tüm bu değerlendirmeler, Mimar Sinan'ın Süleymaniye Camii'nde yapının konumu, hacmi, geometrisi, iç yüzey form ve malzemelerini bilinçli kullanarak akustik niteliklerini iyileştirici yönde pek çok önlem aldığı yönündedir.

Sonuç

Süleymaniye Camii ve Külliyesi, 450 yıllık geçmişle mimarlık sanatı ve yapı bilimi alanında Osmanlı İmparatorluğu'nun günümüze kadar varlığını sürdürmüş en önemli eserlerinden biridir. Caminin temel form ve hacim nitelikleri günümüze kadar korunmuş olsa da, bu araştırmaya temel oluşturan akustik niteliklerinin zaman içerisinde değişiklikler gösterdiği düşünülmektedir. Yapıldığı dönemden bu yana geçirdiği restorasyonlar kapsamında, iç mekân yeni malzemelerle onarılmış; mekanik ekipmanlar, elektro-akustik sistemler ve kontrol üniteleri gibi teçhizat ilaveleri yapılmıştır.

Son dönem onarımlarını takip eden 2013 ölçümleri -bu onarımlarla orta ve yüksek frekanslardaki çınlama sürelerinde bazı iyileşmeler sağlanmış olsa da- caminin, düşük frekanslarda kabul edilebilir seviyelerin çok

⁴² Esen vd., 2004.

⁴⁴ Tavukçuoğlu vd., 2011 ve Aydın, 2008.

⁴³ Kayılı, 1988a.

⁴⁵ Sü-Gül ve Çalışkan, 2013.

⁴⁶ Barkan, 1972 ve Çelik, 2009.

üzerinde (12-17s) ve orta yüksek frekanslarda anlaşılabilirliği bozacak nitelikte yüksek çınlama sürelerinden kaynaklanan önemli akustik sorunlarının devam ettiğini ortaya koymuştur. Caminin boş ve dolu halindeki akustik alanlarının karşılaştırıldığı benzetim analizlerinde, iç mekanın Cuma hutbesi gibi tam kapasite kullanıldığı koşullarda, düşük frekanslarda yarıya inen ve orta-yüksek frekanslarda nispeten düşük çınlama süreleri ile caminin boş haline kıyasla akustik konforun daha yüksek seviyede sağlandığı gözlenmektedir.

ODTÜ-2013 ölçümlerinde hesaplanan erken sönmüleme süresinin (EDT), T20 ve T30 gibi çınlama süresi göstergeleri ile uyumluluğu, dinleyici konumlarına yakın yüzeylerin olumlu etkisi olarak değerlendirilmiştir. Aynı ölçümlerde hesaplanan berraklık (C80) parametresinin düşük oluşu ana kubbe hacim, boyut ve konumu ile beraber mevcut halinde yüksek çınlama sürelerine bağlı olarak anlaşılabilirliği olumsuz yönde etkileyen nesnel akustik parametreler olarak ortaya çıkmaktadır.

Caminin ana ibadet alanında konuşmanın anlaşılabilirliğini bozan önemli bir diğer etken, ODTÜ-2013 saha ölçümlerinde tespit edilen NC33 değeri ile ibadet yapıları için yüksek olarak tanımlanabilecek iç mekân gürültü düzeyidir. Arka plan gürültüsüne sebep olan elektrik panosu ve soğutucularının cami içerisindeki konumları ve teknik özelliklerinin yeniden gözden geçirilmesi veya çıkardıkları gürültüyü en aza indirecek susturucu, oda içinde oda, kabin ve benzeri önlemlerin acilen alınması gerekmektedir.

Süleymaniye Camii'nin özgün akustik niteliklerine etki eden öğeler, esasen, yapının konumu, form ve geometrik boyutları, üst yapı geçiş elemanları, sebu ve başlıca sıvalar olmak üzere nitelikli bitirme malzeme kullanımınıdır. Bu kapsamdaki değerlendirmeler aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- Süleymaniye Camii'nin ana form ve yüzey hareketlilikleri, yüzyıllar boyunca halen özgün niteliklerini korumaktadır. Sinan, hacmin iç formundan ve mukarnas, kündekari gibi mimari elemanlardan yararlanarak yapı öğelerine, sesi homojen dağıtabilecek hareketli formlar vermiştir. Kare plan şemasının akustik açıdan olumsuz etkilerini yok etmek için karşılıklı düz yüzeylerden kaçınmış; bu tür düz yüzeyleri mahfil, niş ve taşıyıcı ayaklarla hareketlendirmiştir. Nitekim ODTÜ-2013 saha ölçümleri, iç mekandaki bu tür hareketliliklerin, farklı dinleyici/ibadet konumlarında birbirine eşdeğer ses alanı yaratılmasına katkı sağladığını göstermektedir.

- Yapının özgün halinde mevcut olduğu yazılı kaynaklarda belirtilmiş olan testi formundaki sebuların,

üst yapıda kubbe formunun neden olduğu odaklanma sorununu akustik asimetri ve saçınım ile önemi düzeyde iyileştirdiği düşünülmektedir. Yapının mevcut durumunda tespit edilen düşük frekanslardaki (125-250Hz) yüksek çınlama sürelerinin, yapının özgün halinde sebuların çoklu ve değişken kullanımı ile kontrol edilmiş olması mümkündür.

- Caminin özgün akustik niteliklerine etki eden önemli bir diğer bileşen ise nitelikli kubbe sıvalarıdır. Yazılı kaynaklardan keten içerikli olduğu anlaşılan horasan katkılı özgün kireç siva katmanlarının, caminin çınlama sürelerine olumlu etkileri olduğu düşünülmektedir. Sıvalar üzerine aynı dönemde inşa edilen Osmanlı hamamları ve diğer Sinan camilerinde yürütülmüş araştırmalar, bileşim özellikleri bakımından çeşitlilik gösteren ve çok katmanlı kullanılan özgün sıvaların, geniş frekans aralığında yüksek ses yutma özelliklerine sahip olduğuna işaret etmektedir. Günümüz onarımlarında kullanılan çimento esaslı sıvaların ses yutma özelliklerinin, özgün sıvalara kıyasla çok düşük olduğu açıktır.

Yapının geçmişte sahip olduğu özgün koşulların, mekân içerisindeki konuşmaların anlaşılabilirliğine olumlu katkısı dikkat çekicidir. Hacim akustiği ve gürültü kontrol önlemlerinin, akustik parametrelerin ve standart değerlerin henüz tanımlanmadığı bir dönemde, Süleymaniye Camii'nin akustik tasarımına bu denli isabetli ve bilinçli bir yaklaşım, o dönemin olanakları dahilinde malzeme teknolojileri ve mekân akustiğine verilen önemi ortaya koymaktadır.

Bilgisayar, programlama algoritmaları ve ses ölçüm ekipmanlarının henüz var olmadığı 16. yüzyılda Mimar Sinan'ın çıplak kulakla camii akustiği üzerine testleri, çağın ötesindeki fikir ve takip eden somut çözümleri, araştırılmaya devam edilmesi gereken konulardır. Sinan çok basit yöntemlerle son derece önemli akustik problemlere çözüm bulmuştur. Günümüzün daha yetkin teknolojik kaynaklarıyla Sinan dönemi eserlerindeki özgün nitelikli akustik koşulları yakalamak, ancak bilimsel çalışmalarla mümkün olabilir. Bu sebeplerle, özgün siva ile uyumlu onarım malzemelerin geliştirilmesi ve uygulamaları ile düşük frekanslardaki yüksek çınlama sürelerinin kontrol altına alınması teknikleri üzerine kapsamlı araştırmalar teşvik edilmelidir. Ancak bu tür çalışmalar doğrultusunda Süleymaniye Camii, özgününde sahip olduğu akustik konfor koşullarına yeniden kavuşabilir.

Kaynaklar

1. Acar, S. (2000) "Süleymaniye'nin Düşündürdükleri", Tasarım, Sayı 102, s.108-117.
2. Ahnert, W., Feistal, S. ve Behrens, T. (2013) "Speech In-

- telligibility Prediction in very Large Sacral Venues”, International Congress on Acoustics (ICA), 2-7 Haziran 2013, Montreal, Kanada.
3. ASHRAE (1987) 1987 ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Applications, Atlanta, GA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
 4. Aydın, A. (2008) “Acoustical Characteristics of Historical Turkish Baths”, Basılmamış Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi.
 5. Barkan, O.L. (1972) Süleymaniye Camii ve İmareti İnşaatı (1550-1557), Cilt 1-2, Ankara, Türk Tarih Kurumu Yayınları.
 6. Bos, H.L., Van Den Oever, M.J.A. ve Peters, O.C.J.J. (2002) “Tensile and Compressive Properties of Flax Fibres for Natural Fibre Reinforced Composites”, Journal of Materials Science, Sayı 37, s. 1683-1692.
 7. CAHRISMA (2003) Acoustical Properties of Domed Spaces and Optimum Acoustical Conditions for Domed Mosques, Combined Deliverable (D29-D34-D35), Project Number: ICA3-CT-1999-00007, İstanbul, Yıldız Teknik Üniversitesi.
 8. CAHRISMA (2001) Acoustical Properties of Domed Spaces and Optimum Acoustical Conditions for Domed Mosques, First Annual Report, INCO-MED: International Cooperation with Mediterranean Partners Countries, Contract Number: ICA3-1999-00007, İstanbul, Yıldız Teknik Üniversitesi.
 9. Cantay, G. (2011) “Süleymaniye Camii 2007-2011 Onarımlarında Bezeme Programıyla ilgili Çalışmalar”, Restorasyon, Sayı 3, s.80-111.
 10. Cantay, T. (1989) Süleymaniye Camii, İstanbul, EREN Yayıncılık.
 11. Çalışkan, M. (2013) “Diyadin İslami Başkanlığı Camii Akustik Tasarımı”, Ahmet Hamdi Akseki Camii, baskıda.
 12. Çelik, S. (2009) Süleymaniye Külliyesi Malzeme Teknik ve Süreç, Ankara, Atatürk Kültür Merkezi.
 13. Dalmay, P., Smith, A., Chotard, T., Sahay-Turner, P., Gloaguen, V. ve Krausz, P. (2010) “Properties of Cellulosic Fibre Reinforced Plaster: Influence of Hemp or Flax Fibres on the Properties of Set Gypsum”, Journal of Materials Science, Sayı45, s. 793-803.
 14. Eröz, F. (2013). “Sinan ve Mimari Akustik”, 10. Ulusal Akustik Kongresi, 16-17 Aralık 2013, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, s.11-20.
 15. Ersen, A., Nilgün, O., Akbulut, S.S. ve Yıldırım, B.Ş. (2011) “Süleymaniye Camii 2007-2010 Yılları Restorasyonu ve Restorasyon Kararları”, Restorasyon, Sayı 3, s. 6-27.
 16. Esen, S., Tunç, N., Telatar, S., Tavukçuoğlu, A., Caner-Saltık E. N. Ve Demirci, Ş. (2004) “Manisa Çukur Hamam’ın Onarımına Yönelik Malzeme Çalışmaları”, 2. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi, 6-8 Ekim 2004, İstanbul, s. 494-505.
 17. Eypgiller, K. (2007) “Restitüsyon ve Renovasyon”, Ed.:S. Mülayim (editör) Bir Şaheser Süleymaniye Külliyesi, Ankara, T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, s. 193-232.
 18. ISO 3382-2 (2008) Acoustics-Measurement of Reverberation Time of Rooms with Reference to other Acoustical Parameters, International Organization for Standardization.
 19. Karabiber, Z. (1998) “Camilerde Akustik Sorunlar”, 4.Ulusal Akustik Kongresi, 29-31 Ekim 1998, Kaş, Antalya.
 20. Karabiber, Z. (2000) “Avrupa Birliği 5. Çerçeve Programı kapsamında Sinan Camileri üzerine bir araştırma: CAHRISMA projesi”, Tasarım, Sayı 102, s.74-83.
 21. Kayılı, M. (1988a) “Mimar Sinan’ın Camilerindeki Akustik Verilerin Değerlendirilmesi”, Mimarbaşı Koca Sinan: Yaşadığı Çağ ve Eserleri, İstanbul, T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü, s. 545-555.
 22. Kayılı, M. (1988b) “Sinan ve Boşluklu Rezonatörler”, Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, Sayı 3:1-2, s.1-17.
 23. Kayılı, M. (2002) “Evolution of Acoustics and Effect of Worship Buildings on It”, Proceedings of the 3rd European Congress on Forum Acousticum, 16-20 Eylül 2002, Sevilla, İspanya.
 24. Kuban, D. (2010) “A Symbol of Ottoman Architecture: The Süleymaniye”, Ottoman Architecture, Suffolk, Antique Collectors’ Club, s. 277-294.
 25. Kütükoğlu, M.S. (2000) XX. Asra Erişen İstanbul Medreseleri, Ankara, Türk Tarih Kurumu.
 26. Long, M. (2006) Architectural Acoustics, London, Elsevier.
 27. Mungan, I. (2007) “Strüktür Çözümü”, Ed.:S. Mülayim (editör) Bir Şaheser Süleymaniye Külliyesi, Ankara, T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, s. 75-102.
 28. Mehta, M., Johnson, J. ve Rocafort, J. (1999) Architectural Acoustics, New Jersey, Prentice-Hall.
 29. Orfali, W.A. (2007) “Sound Parameters in Mosques”, 153rd Meeting of ASA, 4-8 Haziran 2007, Salt Lake City, UT.
 30. Pompoli, R. ve Prodi, N. (2000) “Ses Ölçümü ve Üretimi Teknolojileri Yoluyla Akustik Mirasın Değerlendirilmesi”, Tasarım, Sayı102, s. 146-149.
 31. Schroeder, M.R. (1965) “New Method of Measuring Reverberation Time”, Journal of Acoustical Society of America, Sayı 37, s. 409-412.
 32. Sü Gül, Z. ve Çalışkan, M. (2013) “Acoustical Design of Turkish Religious Affairs Mosque”, The 21st International Congress on Acoustics (ICA), 2-7 Haziran 2013, Montreal, Kanada.
 33. Sü Gül, Z., Çalışkan, M. ve Tavukçuoğlu, A. (2013) “2007-2011 Onarımları Sonrası Süleymaniye Camii’nin Akustik Özellikleri: Ölçüm ve Değerlendirmeler”, 10. Ulusal Akustik Kongresi, 16-17 Aralık 2013, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul; s.21-28.
 34. Tavukçuoğlu, A., Aydın, A. ve Çalışkan, M. (2011) “Tarihi Türk Hamamlarının Akustik Nitelikleri: Özgün Hali ve Bugünkü Durumu”, TAKDER 9.Ulusal Akustik Kongresi, 26-27 Mayıs 2011, Ankara.
 35. Topaktaş, I.L. (2003) “Acoustical Properties of Classical Ottoman Mosques Simulation and Measurements”, Basılmamış Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi.
 36. Vakıflar Genel Müdürlüğü Arşivi (2011), Süleymaniye Camii Belgeleri, Ankara, T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü.

37. Yılmaz, Y. (2008), Kanuni Vakfiyesi Süleymaniye Külliyesi, Ankara, Vakıflar Genel Müdürlüğü.

İnternet Kaynakları

1. http://www.radikal.com.tr/turkiye/256_bos_kupun_sirri-1028387 [Erişim tarihi 17 Temmuz 2013]

Anahtar sözcükler: Akustik ölçümler; cami akustiği; çınlama süresi; onarım; Süleymaniye Camii.

Key words: Acoustical measurements; mosque acoustics; reverberation time; restoration; Süleymaniye Mosque.