

10. ULUSAL AKUSTİK KONGRESİ
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ODİTORYUMU, İSTANBUL
16-17 Aralık 2013

2007-2011 ONARIMLARI SONRASI SÜLEYMANİYE CAMİİ'NİN
AKUSTİK ÖZELLİKLERİ: ÖLÇÜM VE DEĞERLENDİRMELER

Zühre SÜ GÜL¹, Mehmet ÇALIŞKAN², Ayşe TAVUKÇUOĞLU³

¹**Orta Doğu Teknik Üniversitesi; MEZZO Stüdyo Ltd, Ankara, Türkiye**

Tel: 312 210 14 26, e-posta: zuhre@mezzostudio.com

²**Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye**

Tel: 210 25 72, e-posta: caliskan@metu.edu.tr

³**Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye;**

Tel: 210 62 20, e-posta: tayse@metu.edu.tr

ÖZET

Osmanlı tarihinin en büyük külliyesinin merkezini oluşturan Süleymaniye Camii'nin akustik araştırmaları arşivine katkıda bulunmak ve güncel durum akustik niteliklerini irdeleyebilmek üzere 2011 senesinde tamamlanan onarımlarının ardından 23 Şubat 2013 tarihinde sahada ölçümler yapılmıştır. ISO 3382-2 standardına göre yürütülen saha ölçümlerinde *Mihrap* önü, *Müezzin Mahfili* üstü, yan köşe kubbe ve merkezi kubbe altı olmak üzere dört adet kaynak ve sekiz adet alıcı noktası için farklı konfigürasyonlarında darbe yanıtları toplanmıştır. Darbe yanıtları son işleminden geçirilerek öncelikle hacim akustiği parametrelerinden en önemlisi olan çınlama süreleri (T30) hesaplanmıştır. Çınlama süresi bulguları 2013 senesi öncesi gerçekleştirilmiş diğer saha ölçümleri ile ortak akustik parametre olarak karşılaştırmalı değerlendirmelere olanak sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Süleymaniye Camii, camii akustiği, akustik ölçümler, çınlama süresi

ACOUSTICAL CHARACTERISTICS OF SÜLEYMANİYE MOSQUE
AFTER 2007-2011 RENOVATIONS: MEASUREMENTS AND ANALYSIS

ABSTRACT

In order to support the literature on the acoustics of Süleymaniye Mosque, constituting the central structure of one of the biggest mosque complexes of the Ottoman Empire, and for interpreting its present acoustical conditions, in-situ acoustical tests are held in 23rd February 2013, right after the final restoration work performed during 2007-2011. The measurements are held at main prayer room in ground level, in accordance with ISO 3382-2. Impulse responses are collected for eight receiver and four source locations, including in front of Mihrap, on top of Mahfili, underneath side corner dome and underneath central main dome. Recorded data are post-processed for specifically calculating reverberation times (T30) as a common parameter assessed in previous field measurements. Those recent data are then compared with the previously-published in-situ measurement data.

Keywords: Süleymaniye Mosque, mosque acoustics, acoustic measurements, reverberation

1. GİRİŞ

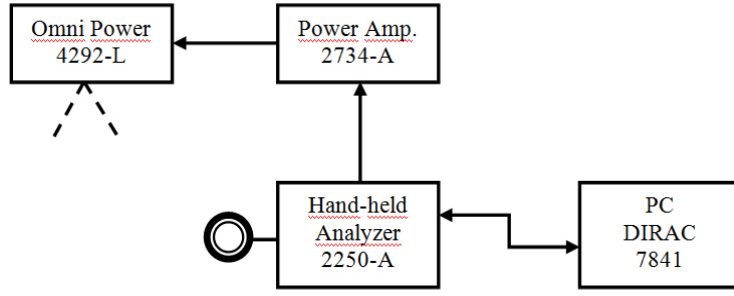
Süleymaniye Camii ve Külliyesi, Kanuni Sultan Süleyman tarafından Mimar Sinan'a yaptırılan zamanın ileri teknolojisi ve fikirleriyle inşa edilmiş Türk Sanat tarihinin en değerli eserlerinden biridir. Külliye yapımı esas olarak 1550-1557 tarihleri arasında sürdürülmüş, türbelerinin ince işleriyle birlikte tüm inşaat, 1568 yılında tamamlanmıştır [1]. İstanbul'un tarihi yarımadasında yer alan Külliye, 1540'da tamamen yanan Eski Saray'ın yangın arazisi üzerine kurulmuştur [2]. Külliye'nin vaziyet planı, arazinin topoğrafik durumuna göre düzenlenmiş olup bir avlu içerisinde değişik işlevli 22 yapıyı kapsamaktadır [3,4]. Osmanlı tarihinin en büyük külliyesinin merkezini oluşturan Süleymaniye Camii, mimari estetik, strüktür, akustik ve malzeme teknolojisi gibi pek çok alanda çalışmalara esin kaynağı olmuştur. Caminin akustiği bu kapsamda önemli bir araştırma konusudur. Özgün hallerinde Mimar Sinan camilerindeki hacim ve yapı akustiğinin üstünlüğü yaygın bir inanıştır. Dile getirilen bu inanişe dayanak sağlamak ve yapının zaman içerisinde geçirdiği onarımlar sonrası akustik koşullarını bilimsel bir çerçevede inceleyebilmek amacıyla Süleymaniye Camii'nin hacim akustiği üzerine ayrıntılı bir çalışma sürdürülmektedir. Bu çalışmanın ilk aşaması olarak, 2013 senesinde sahada akustik testler yürütülmüştür. Gerçekleştirilen son dönem saha testlerinin amacı hem güncel durumu değerlendirebilmek, hem de önceki onarımlar sonrası yürütülmüş saha testleri [5-7] ile mevcut araştırmalar arşivine yeni bulgular ekleyerek dönemsel kıyaslamalara olanak sağlamaktır.

2. ÖLÇÜMLER

2.1. Malzeme ve Yöntem

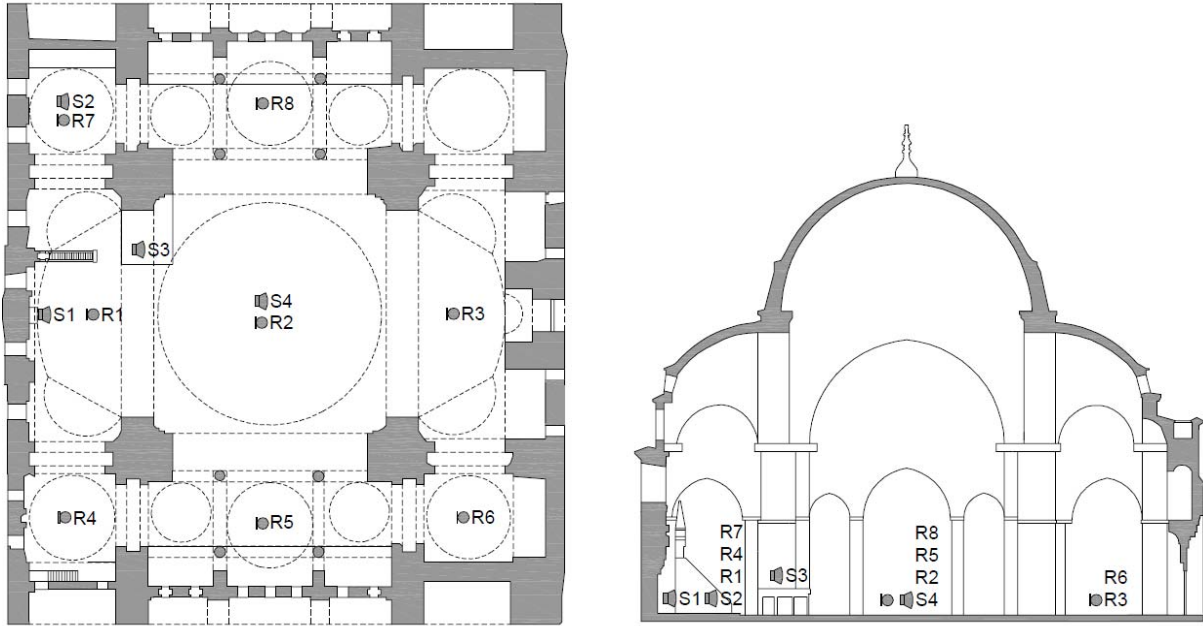
Süleymaniye Camii'nin 2011 senesinde tamamlanan onarımlarının ardından mevcut durumu değerlendirmek üzere 23 Şubat 2013 tarihinde sahada ölçümler yapılmıştır. Öncelikli olarak ses alanının temel özelliklerini yakalamak için darbe yanıtları toplanmıştır. Bu fonksiyon, ses kaynağından gelen, yansıyan ve çevre geometrisi tarafından dağıtılan tüm ses ön dalgalarının geçişini kaydetmektedir [8]. Diğer bir deyişle akustik sistemin dinamik davranışını ifade etmektedir. Akustik parametreler darbe yanıtından elde edilen "Schroeder eğrisi"nden hesaplanır [9]. Arka plan gürültüsü yüksek olduğu takdirde, asıl sinyalde parametrelerin hesaplanacağı sönümlenme eğrisi aralığında bozulmalar oluşur. Bu sebeple ölçümlerde arka plan gürültüsünün en az 50 dB üzerine çıkılarak (Darbe/Gürültü Oranı, $INR > 50dB$) ses enerjisi sönümlenme eğrisinde güvenilir ve analiz edilebilir ses alanı kaydetmek hedeflenmiş ve her ölçüm noktasında en güvenilir darbe yanıtı elde edilene kadar ölçümler tekrarlanmıştır.

Süleymaniye Camii'nin akustik ölçümleri ISO 3382-2 (2008) [10] standardına göre yapılmıştır. 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 arasındaki zaman diliminde yürütülmüştür. Ölçümlerde akustik sinyal üretimi için B&K (Type 4292-L) Standard dodec-çok yönlü ses kaynağı ve B&K (Type 2734-A) güç yükseltici bir arada kullanılmıştır. Darbe yanıtı etkileri ölçüm noktalarında B&K (Type 2250-A) el tipi akustik analizör ve üzerindeki B&K (Type 4190ZC-0032) mikrofon ile kaydedilmiştir. 100 Hz ile 8000 Hz aralığında ilgili spektrumu kapsayan darbe yanıtının örnekleme frekansı 48 kHz olarak belirlenmiştir. Süpürme sinyali kullanılarak elde edilen darbe yanıtının uzunluğu olası ikincil çınlamaları kaçırılmamak üzere izin verilen en yüksek süre olarak 21,8s'de tutulmuştur. Sinyal üretimi ve son sinyal işleme için DIRAC Hacim Akustiği (Type 7841 v.4.1) yazılımı kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Süleymaniye Camii'nin 2013 yılı saha ölçümlerinde kullanılan düzenek: donanım ve yazılım altyapısı

Mihrap önü, müezzin mahfili üstü, yan köşe kubbe ve merkezi kubbe altı olmak üzere dört adet kaynak (S1-S4) ve sekiz adet alıcı (R1-R8) noktası için farklı dizilimlerde ölçümler alınmıştır (Şekil 2 ve 3). 1,50 m olarak sabitlenen kaynak yüksekliğini ayarlamak üzere B&K (Type UA-0801) Tripod, 1,20 m olarak sabitlenen mikrofon yüksekliğini ayarlamak üzere B&K (Type UA 0801) Holder Tripod kullanılmıştır. Darbe yanıtları son işlemde geçirilerek hacim akustiği parametrelerinden en önemlisi olan “çınlama sürelerinin (T20, T30, RT)” yanı sıra “A-ağırlıklı ses düzeyleri (SPLA)”, “berraklık (C80)”, “erken sönümlenme süresi (EDT)”, “konuşmanın anlaşılabilirliği indisi (STI)” değerleri hesaplanmıştır.



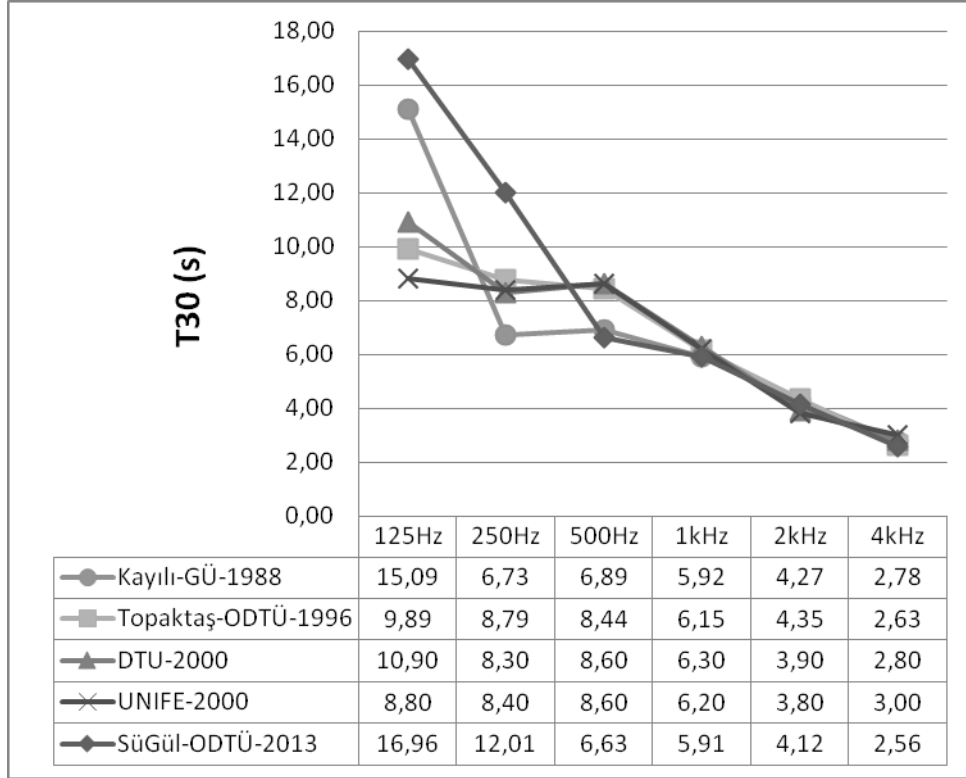
Şekil 2. Süleymaniye Camii'nin 2013 yılı saha ölçümlerinde kullanılan düzenek: ses kaynağı (S) ve alıcı (R) noktalarının planda (solda) ve kesitteki (sağda) konumları



Şekil 3. Süleymaniye Camii'nin 2013 yılı saha ölçümlerinden görüntüler (sol üstte S1, sağ üstte S3, sol altta S4, sağ altta R2)

2.2. Bulgular ve Kıyaslamalı Değerlendirmesi

Bu bölümde 2013 tarihindeki saha ölçümlerinden elde edilen veriler 1988, 1996, 2000 ölçümleri ile bir arada sunulmaktadır. Tüm ölçümlerde çınlama süresi (T30), ortak akustik parametre olarak değerlendirilmiştir. 1988 yılında Kayılı'nın (Kayılı-GAZİ-1988), 1996 yılında Topaktaş'ın (Topaktaş-ODTÜ-1996), 2000 yılında UNIFE ve DTU'nun (UNIFE-2000, DTU-2000) ve 2013 yılında Sü Gül'ün (SüGül-ODTÜ-2013) saha ölçümlerinden elde edilen T30 verileri Şekil 4'te özetlenmektedir.



Şekil 4. Saha ölçümlerinden elde edilen 125 Hz - 4000 Hz aralığındaki T30 verileri

Şekil 4'teki grafik verilerine göre 1969 restorasyonları sonrası caminin ana ibadet alanında çok uzun çınlama süreleri gözlenmektedir. Teknik yazında camiler için tavsiye edilen konuşma frekanslarında (500 Hz-1000 Hz-2000 Hz) en yüksek sınır değer olan 4,6 s'lik [11] veya daha geniş bant ortalaması olarak maksimum sınır olarak belirlenen 2,8 s'lik [12] çınlama sürelerinin aşıldığı gözlenmektedir. Özellikle düşük frekanslardaki çınlama süreleri, fonksiyona göre bu hacimdeki mekândan beklenen değerlerin oldukça üzerindedir. Bu durumda özellikle 125 Hz mertebesindeki düşük frekanslı seslerin elektro-akustik olarak güçlendirilmesi camii içindeki sesin algılanmasında sorunlar oluşturacaktır.

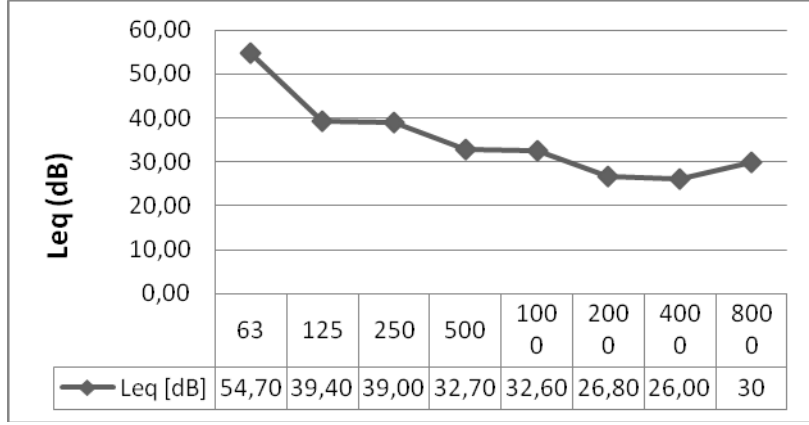
Düşük frekanslarda gözlenen farklılık sadece restorasyonlar sonucu iç mimari değişikliklere bağlı tutulmamalıdır. Sayısal cihazlarla yapılan ölçümler sırasında kullanılan darbe yanıtı uzunluğunun beklenen çınlama süresinden kısa tutulması sonuçların gerçekten daha düşük olmasına yol açacaktır. Örneğin DTU-2000 ölçümlerindeki maksimum 10 s'lik darbe yanıtı uzunluğunun daha yüksek çınlama sürelerinin gözlenmesine engel teşkil etmesi mümkündür. Nitekim analog cihazlarla 1988 yılında Kayılı tarafından ve sayısal cihazlarla 2013 yılında Sü Gül tarafından yürütülen ilk ve son Süleymaniye Camii akustik ölçümlerinde 125 Hz'te 15 s - 17 s arasında çınlama süreleri ölçülmüştür. Ayrıca Kayılı-1988 ölçümlerinde ortalamaya dahil edilmeyen en yüksek sapma olarak yer yer çınlama sürelerinde 20 s'yi geçen değerler elde edilmiştir [5]. Diğer yandan DTU tarafından yürütülen akustik simülasyon analizlerinde, çınlama süreleri, 250 Hz'te 13,2 s ve 125 Hz'te 15,9 s olarak hesaplanmıştır [13]. Tüm bu veriler 2007-2011 öncesi ve sonrası onarımlarında, düşük frekanslarda yüksek çınlama sürelerinin olduğunu göstermektedir.

2007-2011 onarımları sonucunda 125 Hz'te çınlama sürelerinde kayda değer bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Ancak 250 Hz ve 500 Hz'te çınlama süreleri cinsinden ölçüm

sonuçları farklılıklar sergilemektedir. Son dönem onarımları öncesi 6,7 s - 8,8 s aralığında değişen 250 Hz'teki çınlama süresi bu onarımlardan sonra %50 mertebesinde artarak 12 s'ye yükselmiştir. Öznel (sübjektif) olarak dile getirilen akustik ile ilgili şikayetlerin kaynağının bu artış olduğu düşünülmektedir. Orta frekans olarak nitelendirilen 500 Hz'te son dönem onarımı öncesi Kayılı-1988 ölçümleri ile son dönem onarımı sonrası SüGül-2013 ölçümlerinin uyum içinde olduğu anlaşılmalı birlikte bu onarım öncesinde yapılan diğer ölçümlerde daha yüksek çınlama süresi ölçülmesinin nedenleri bilinmemektedir. Bu konuda sağlıklı yorum yapabilmek için 1988-2007 yılları arasında cami içinde yapılmış olan olası dar kapsamlı tadilat ve malzeme değişikliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Birbirleriyle uyumlu olan Kayılı-1988 ve Sügöl-2013 ölçüm sonuçlarına göre 500 Hz'te restorasyon sonrasında 1988 öncesine dönmüş olduğunu söylemek mümkündür. Özet olarak, 2007-2013 onarımlarının 125 Hz ve 500 Hz'te caminin 1988 öncesi çınlama karakteristiğini geri kazandırdığı, 250 Hz'te ise uzun çınlama sürelerine sebep olduğu anlaşılmaktadır. Diğer frekanslarda ise restorasyon öncesi ve sonrasında kayda değer bir değişiklik olmadığı belirlenmiştir.

Yerinde alınan akustik ölçümler teknik açıdan yeterli olduğu sürece, akustik değerlendirmeler için esas kabul edilir; akustik simülasyon çalışmaları bu değerlendirmelerde ikinci planda kalır. Bu sebeple, onarımlar sonrası akustik koşulları karşılaştırma çalışmasında, sahada yapılan testler esas alınmış, akustik simülasyon verileri, karşılaştırma çalışmasına dahil edilmemiştir. Diğer taraftan, eski ölçümlerdeki teknik kurulumun, özellikle düşük frekanslarda yetersiz kalabileceğine dair şüpheler oluşmuştur. Örneğin, DTU-2000 ve UNIFE-2000 saha verilerine kıyasla, o dönemde elde ettikleri simülasyon verilerinin, SüGül-2013 saha verilerine daha yakın olması düşündürücüdür. Bu durumda, düşük frekanslardaki DTU-2000 ve UNIFE-2000 çınlama süresi verilerinin bu dönem öncesi ve sonrasındaki çınlama süresi verilerine göre farklılık göstermesi, bu ölçümlerdeki teknik kurulumunun yetersizliğinden de kaynaklanmış olabilir. Özgün durumdaki akustiği halen çok net bilinmeyen Süleymaniye Camii'nin, geçirdiği onarımlar sonrasında oda akustiğinin temel değerlendirme parametresi olan çınlama süresi verilerine göre olumsuz konfor koşullarına sahip olduğu, iç mekandaki konuşmaların anlaşılabilirlik düzeyinin cemaatin kulak hizasında belirgin ölçüde azaldığı anlaşılmaktadır.

Arka plan gürültüsü frekansa bağlı olduğu için farklı gürültü kaynakları için spektrumu değişkenlik gösterecektir. Çınlama süreleri istenilen aralıkta olsa dahi yüksek fon gürültüsü konuşmanın anlaşılabilirliğinde olumsuz bir etken olacaktır. Bu etkenin Süleymaniye Camii'nin akustiğine ne düzeyde tesir ettiğini değerlendirebilmek amacıyla, SüGül-2013 ölçümleri sırasında arka plan gürültü düzeyleri (Leq) kaydedilmiştir. Ölçüm sonuçları Şekil 5'te sunulmaktadır. Mevcut halde cami içi Leq değerlerinin tespiti aynı zamanda, darbe-gürültü oranını (INR), en az 50-55 dB aralığında tutulmasını sağlamak üzere SüGül-2013 ölçüm ayarlarına referans olmuştur. Bu sayede, Süleymaniye Camii ölçüm verileri ile geniş kapsamlı ileriki araştırmalar için gerek duyulan analiz edilebilir enerji sönümlenme alanı yaratılmıştır.



Şekil 5. Saha ölçümlerinden elde edilen arka plan gürültüsü (Leq) verileri

Saha ölçümlerinde kaydedilen yüksek arka plan gürültüsü öznel (sübjektif) olarak konuşmaların anlaşılabilirliğini hissedilir düzeyde zayıflatmasından sorumlu tutulur. Şekil 5'te sunulan gürültü düzeyleri A-Ağırlıklı Ses Düzeyi (LAeq) 39,3 dBA'ye karşılık gelirken gürültü ölçütü olarak NC33'ü karşılamaktadır. Bu değer, literatürde camiler için önerilen 25-30dBA veya NC15-20 üst limitlerinin oldukça üzerindedir [11]. Cami'nin kullanıma kapatıldığı ve trafik gürültüsünün en az olduğu gece saatlerinde gerçekleştirilen SüGül-2013 ölçümlerinde belirlenen yüksek arka plan gürültüsünün, cami içerisinde mihrap duvarı karşısı üst kotta yer alan elektrik panoları soğutucu fanlarından kaynaklandığı anlaşılmıştır. Son restorasyonlarla birlikte Süleymaniye Camii akustiğinin bozulduğuna dair ifadelerin, bir diğer deyişle konuşmanın işitilmesi veya anlaşılabilirliğindeki sorunların, öncelikle mevcut fan gürültüsünden kaynaklandığı rahatlıkla söylenebilir. Kısacası, bu gürültü sorunu vaaz, hutbe gibi anlaşılabilirliğinin üst seviyede olması gereken ibadet etkinliklerini olumsuz yönde etkilemektedir.

SONUÇ

Süleymaniye Camii ve Külliyesi, 450 yıllık geçmişiyle mimarlık sanatı ve yapı bilimi alanında Osmanlı İmparatorluğunun günümüze kadar varlığını sürdürebilmiş en önemli eserlerinden biridir. Caminin temel form ve hacim nitelikleri günümüze kadar korunmuş olsa da, bu araştırmaya temel oluşturan akustik nitelikleri zaman içerisinde değişiklikler göstermiştir. Yapıldığı dönemden bu yana geçirdiği restorasyonlar kapsamında iç mekân, yeni malzemelerle onarılmış; elektrik panoları ve soğutucu grupları, elektro-akustik sistemler ve kontrol üniteleri gibi mekanik/elektronik teçhizat ilaveleri yapılmıştır. Son dönem onarımlarının sebep olduğu ve anlaşılabilirliği ciddi ölçüde olumsuz yönde etkileyen sorunlar, özellikle düşük frekanslarda, kabul edilebilir seviyelerin çok üzerinde 12 s ile 17 s değerlerine ulaşan uzun çınlama süreleri ve NC 33 değerine yükselen iç mekân gürültü seviyelerinden kaynaklanmaktadır. SüGül-2013 ölçümlerinde tespit edilen ve yüksek seviyedeki arka plan gürültüsüne sebep olan soğutucuların cami içerisindeki konumları ve teknik özelliklerinin yeniden gözden geçirilmesi veya çıkardıkları gürültüyü en aza indirecek susturucu, oda içinde oda veya kabin ve benzeri önlemlerin alınması gerekmektedir.

Hacim/yapı akustiği odaklı bu çalışmada elektro-akustik sistemler değerlendirme dışında tutulmuştur. Nitekim mimari akustik öncelikli olarak mekânın yapı, geometri, hacim ve malzeme form, ses yutma-yansıtma-saçma gibi fiziksel niteliklerini esas alır. Bu sayede

yapının özgün (yapıldığı zaman) haliyle, elektro-akustik güçlendirme olmaksızın, mekânın mimari nitelikleri ile doğal akustik konfor koşullarının sağlanmasını hedefler. Günümüz teknolojisi ve kullanım anlayışının beraberinde getirdiği elektro-akustik sistem tasarımı mekânın işlevselliği açısından son derece önemlidir. Doğal ses için akustiği iyi tasarlanmış olan müzik veya ses üretilen mekânlarda, aynı zamanda güçlendirmeli ses sistemleri için gerekli ideal iç hacim koşulları yaratılmış olur. Oysa ki özgün koşullarında doğal ses için tasarlanmış Süleymaniye Camii gibi mekânlardaki akustik niteliklerin, kötü tasarlanmış bir elektro-akustik sistemin performansı üzerinden değerlendirilmesi ve bu tür sistemlerin mevcudiyetinden kaynaklanan akustik sorunlara sebep olarak mimari tasarımın sorumlu tutulması yanıltıcı ve yanlış bir yaklaşımdır.

KAYNAKLAR

- [1] Cantay, G., Süleymaniye Camii 2007-2011 Onarımlarında Bezeme Programıyla ilgili Çalışmalar, Restorasyon (3), pp.80-111, 2011.
- [2] Saatçi, S., Temelden Aleme İnşaat Sureci, Bir Şaheser Süleymaniye Külliyesi, Ed. S. Mülayim, T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, Ankara, pp.57-74, 2007.
- [3] Vakıflar Genel Müdürlüğü Arşivi, Süleymaniye Camii Belgeleri, T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü, Ankara, 2011.
- [4] Yılmaz, Y., Kanuni Vakfiyesi Süleymaniye Külliyesi, Vakıflar Genel Müdürlüğü, Ankara, 2008.
- [5] Kayılı, M., Mimar Sinan'ın Camilerindeki Akustik Verilerin Değerlendirilmesi, Mimarbaşı Koca Sinan: Yaşadığı Çağ ve Eserleri, T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü, İstanbul, pp.545-555, 1988.
- [6] CAHRISMA, 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, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2001.
- [7] Topaktaş, I. L., Acoustical Properties of Classical Ottoman Mosques Simulation and Measurements, yayınlanmamış Doktora Tezi, Mimarlık Bölümü, ODTÜ, Ankara.
- [8] Pompoli, R. and Prodi, N., (2000) Ses Ölçümü ve Üretimi Teknolojileri Yoluyla Akustik Mirasın Değerlendirilmesi, Tasarım (102), pp.146-149, 2003.
- [9] Schroeder, M. R., New Method of Measuring Reverberation Time, Journal of Acoustical Society of America (37), pp.409-412, 1965.
- [10] ISO 3382-2, Acoustics - Measurement of Reverberation Time of Rooms with Reference to other Acoustical Parameters, International Organization for Standardization, 2008.
- [11] Karabiber, Z., Avrupa Birliği 5. Çerçeve Programı kapsamında Sinan Camileri üzerine bir araştırma: CAHRISMA projesi, Tasarım (102), pp.74-83, 2000.
- [12] Orfali, W. A., Pound Parameters in Mosques. 153rd Meeting of ASA, Salt Lake City, UT, 2007.
- [13] CAHRISMA, Acoustical Properties of Domed Spaces and Optimum Acoustical Conditions for Domed Mosques, Combined Deliverable (D29-D34-D35), Project Number: ICA3-CT-1999-00007, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2003.