Uluslararası Ayasofya Sempozyumu II; Kadim Bir Mabedin Tarihi 27-29 Mayıs 2022 | FSMVÜ Ayasofya Yerleşkesi (Ayasofya Medresesi), İSTANBUL

Ayasofya'nın Sesleri Zühre Sü Gül¹

ÖZET

Ayasofya bir başyapıt olarak pek çok araştırmaya ilham verdiği gibi, mimari form ve malzeme zenginliğiyle akustik bilimi için de her zaman bir merak konusu olmuştur. Bu amaçla farklı dönemlerde yürütülen saha akustik ölcümleri ile oda darbe yanıtları toplanmıştır. Oda darbe yanıtlarından temel nesnel akustik parametrelerin irdelenmesi mümkündür. Yapının önemi dolayısı ile içeride geçirilebilecek sınırlı süre ve fiziksel kısıtlar sebebi ile saha ölçümleri hacmin tümünde ses alanını algılamaya ve yansıtmaya veterli değildir. Özellikle, Avasofya'nın cok kubbeli üst örtüsü, kemerler arkasında bölünmüş çoklu alt hacimleri sesin yayılımında farklı etkilere sebep olmakta, standart metriklerin ötesinde ileri düzevde bilimsel bir arastırmaya gereksinim duyulmaktadır. Bu çalışmada, Ayasofya'nın saha ölçümleri ile akort edilmiş akustik modelleri, ışın izleme ve difüzyon denklemi yöntemleri ile benzetimlere sokulmus, hacmin yaklaşık 1000 farklı noktasında toplanan darbe yanıtları istatistiksel bir kestirim yöntemi ile ayrıntılı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Avasofva icerisinde farklı konumlarda standart hacimlerde gözlenen ve cınlama süresi gibi metriklerin hesaplandığı üssel/eksponansiyel ses enerjisi sönümleme eğrilerinden farklı olarak çoklu sönümleme eğrileri tespit edilmiştir. Bu ayrıcalıklı oluşumun Ayasofya'nın zengin mimari girdileri ile ilişkisi, difüzyon denklemi modelinin sonlu elemanlarda çözümlemesi ile elde edilen ses enerjisi akış eğrileri ve akış vektörleri üzerinden tartışılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Ayasofya, Kutsal Yapılar, Bağlaşık Akustik Alanlar, Akustik Ölçümler, Difüzyon Denklemi Modeli

THE SOUNDS OF HAGIA SOPHIA

ABSTRACT

With its architectonic and material richness Hagia Sophia, one of the world's architectural master pieces, has always been an inspiration for acoustics science and research. In different times of its lifespan, room acoustics tests were held within Hagia Sophia to collect room impulse responses (RIR), as it is possible to get room acoustics parameter values through the post-processing of RIRs. The time permitted for field tests within such historically significant spaces is always limited, for that reason it is not possible to gather data at every location within the space, which is only possible through acoustical simulations. Hagia Sophia's multi domed upper shelter and fragmented interior with various sized arches and sub-volumes cause the sound to flow in a different manner in comparison to classical single space volumes. Thus, standard single slope metrics are not enough to define and understand the particular interior sound field of Hagia Sophia. In this study, acoustical models of Hagia Sophia that are tuned according to the field test results are used in ray tracing simulations and diffusion equation model computations, and 1000 locations within the structure are analyzed using Bayesian decay parameter estimations. Accordingly, depending upon the source and receiver configuration, in different positions within Hagia Sophia's immense volume multi-slope sound energy decays are observed, as a result of room acoustic coupling of different sub-volumes. The results are further analyzed by diffusion equation model through sound energy flow decays and energy flow vectors in order to understand the architectural features that are in effect of this authentic interior soundscape.

Keywords: Hagia Sophia, Sacred Spaces, Room Acoustics Coupling, Acoustical Measurements, Diffusion Equation Model

¹ Bilkent Üniversitesi Mimarlık Bölümü, Ankara, Türkiye, e-posta: <u>zuhre@bilkent.edu.tr</u>, ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0002-3655-9282</u>

1. GİRİŞ

Tarihi ve kutsal yapıların akustik karakteristikleri öncelikle teşhis etmek ve daha sonra özgünü korumak amacıyla mimari akustik ve mimarlık tarihi alanlarında araştırmacıların her zaman merak konusu olmuştur (Cirillo ve Martellotta, 2005; Kleiner et al., 2010). Günümüze kadar kiliseler (Pedrero et al., 2014; Luigi ve Martellotta 2015; Giron et al., 2017), bazilikalar (Martellotta, 2009; Martellotta, 2016), katedraller (Suarez et al., 2015; Alvarez-Morales et al., 2016; Martellotta et al., 2018; Anderson ve Anderson, 2000), ve camilerin (Abdelazeez et al., 1991; Abdou, 2003; Suarez et al., 2018; Sü and Yılmazer, 2008; Sü Gül ve Çalışkan, 2013a, b; Sü Gül et al., 2014; Sü Gül et al., 2018) akustik özellikleri üzerine pek çok araştırma yürütülmüştür. Pek çok İslam ve Hristiyan ibadet yapısı, özellikle anıtsal ve tarihte iz bırakmış olanları çok büyük iç hacimlere sahiptirler. Öyle ki bir tek hacim değil üzeri küçük kubbe veya tonozlarla örtülü pek çok yan sahınlarla ana hacme bağlı bağlaşık mekanlardan oluşurlar. Bu durum anıtsal kutsal yapılarda çok özel ve yapıya özgü ses alanlarının oluşmasına sebep olur.

Özellikli bir iç mekân ses dokusuna sahip Ayasofya bu çalışmanın odak noktasıdır. Ayasofya bir başyapıt olarak pek çok araştırmaya ilham verdiği gibi, mimari form ve malzeme zenginliğiyle akustik bilimi için de her zaman bir merak konusu olmuştur. Bu çalışma kapsamında Aysofya'nın akustik özelliklerini inceleyebilmek üzere farklı dönemlerde yürütülen saha akustik ölçümleri ile oda darbe yanıtları toplanmıştır. Oda darbe yanıtlarından temel nesnel akustik parametrelerin irdelenmesi mümkündür. Yapının önemi dolayısı ile içeride geçirilebilecek sınırlı süre ve fiziksel kısıtlar sebebi ile saha ölcümleri hacmin tümünde ses alanını yansıtmaya yeterli değildir. Ayasofya'nın cok kubbeli üst örtüsü, kemerler arkasında bölünmüş çoklu alt hacimleri sesin yayılımında farklı etkilere sebep olmakta, standart metriklerin ötesinde ileri düzeyde bilimsel bir araştırmaya gereksinim duyulmaktadır. Bu çalışmada, Ayasofya'nın saha ölçümleri ile akort edilmiş akustik modelleri, ışın izleme ve difüzyon denklemi yöntemleri ile benzetimlere sokulmuş, hacmin yaklaşık 1000 farklı noktasında toplanan darbe yanıtları istatistiksel bir kestirim yöntemi ile ayrıntılı incelenmiştir. Elde edilen sonuclara göre Ayasofya icerisinde farklı konumlarda kapalı hacimlerde gözlenen ve cınlama süresi gibi metriklerin hesaplandığı eksponansiyel (üssel) ses enerjisi sönümleme eğrilerinden farklı olarak çoklu sönümleme eğrileri tespit edilmiştir. Bu ayrıcalıklı oluşumun Ayasofya'nın zengin mimari girdileri ile ilişkisi, difüzyon denklemi modelinin sonlu elemanlarda çözümlemesi ile elde edilen ses enerjisi akış eğrileri ve akış vektörleri üzerinden tartışılmaktadır.

2. AYASOFYA MİMARİSİNİN KISA TARİFİ

532-537 yılları arasında Bizans İmparatoru Jüstinyen'in emri ile inşa edilen Ayasofya tarihi boyunca gördüğü depremler ve yapısal bozulmalar sebebiyle pek çok kez restorasyon(onarım)dan geçmiştir. Diğer yandan kilise olarak başlayan hikayesi daha sonra cami (1453), müze (1932) ve son olarak yeniden cami olarak (2020) ibadete açılması ile sonlanmıştır. Bu sebeple yapı özellikle iç mekânda Hristiyan ve İslam mimarisine özgü ekleme veya çıkarmalarla değişikliğe uğramıştır. Hacimsel olarak temel bir değişikliğe uğramamış olsa da iç mekânda bitirme yüzeylerindeki değişiklikler, bu çalışmada değinileceği üzere mekân akustiğinde farklılıklar yaratmaktadır.

Mimari form tarifi olarak Ayasofya genişletilmiş kubbeli bir bazilika plan şemasına sahiptir. İki tarafta yarım kubbelerle desteklenmiş ana kubbe alttaki dikdörtgen plana rağmen merkezi bir plan şeması oluşturur. Dikdörtgenin planda orta sahında en uzun ölçüsü yaklaşık 92 metre iken diğer yönde 70 metreye kadar genişleyen bir iç hacme sahiptir. Merkezi kubbe yerden yaklaşık 55 metre yükselir. Kubbe bugün tam daire değildir ve kubbe çapı elips formunda 31.2 – 32.8 aralığında değişir (Oyhon and Etingü, 1999). Yan sahınlar merkezi ibadet alanından kolon ve kemerlerle ayrılır. Yan sahınların üstünde planda U-şeklinde yerleşmiş galeriler yer alır. Ayasofya'nın iç mekân akustiğini etkileyen en önemli faktörlerden biri yaklaşık 150,000 m³'lük görkemli akustik iç hacmi bir diğeri ise kemerler aracılığı ile birbirinden ayrılmış orta ve yan sahın ile zemin kat yan sahın ve galerilerde oluşan daha küçük hacimler arasındaki zamana yayılmış ses akışı biçimidir. Diğer yandan mimari malzeme

dokusundaki değişiklikler; özellikle kilise-camii-müze-camii dönüşümündeki mermer zemin yüzeyinin halı ile kaplanması akustik özelliklerini frekans bantlarında etkileyen, dolayısıyla iç hacim akustiğinde değişimlere sebep olan önemli bir diğer faktördür. Bir sonraki başlıkta bu araştırma kapsamında yapının iç mekân akustik özelliklerini öncelikle tespit etmek ve daha sonra analiz etmek üzere kullanılan teknik ve yöntemler sunulmaktadır.

3. YÖNTEMLER

3.1. Saha akustik ölçümleri

Hacim/oda akustiği araştırmalarında veri toplamada en güvenilir yöntem saha akustik ölçümleridir. Bu veriler daha sonra deneysel anlamda akustik benzetimlerde kullanılmak üzere geliştirilen akustik modelin akort edilmesinde kullanılabilir. Mevcut yapılarda saha ölçümleri ile öncelikle akustik oda darbe yanıtları toplanır. Bu çalışmada sunulan saha ölçümleri Ayasofya müze kullanımındayken 25 Ağustos 2014 tarihinde yürütülmüştür (Sü Gül et al., 2018). Mekân boş iken zemin katta orta ve yan sahınlarda gerçekleştirilen ölçümler ISO 3382-1:2009, standardına uygun yürütülmüştür. Ölçümlerde B&K (Type 4292-L) on iki yüzlü çok yönlü ses kaynağı ve B&K (Type 2734-A) güçlendiricisi, B&K (Type 4190ZC-0032) ve mikrofonu entegre (Type 2250-A) elde taşınabilen analizör kullanılmıştır. 100 ve 8000 Hz aralığında kaydedilen geniş tayflı darbenin örnekleme frekansı 48 kHz'dir. Farklı ses sinyalleri yaratmak üzere DIRAC hacim akustiği yazılımı (Type 7841 v.4.1) kullanılmıştır.

Tek hacimli kapalı hacimlerde çınlama süresi gibi bilinen objektif akustik metrikler ses enerjisi sönümleme eğrisinden hesaplanabilir. Bağlasık hacimlerde ses eneriisi sönümleme eğrileri lineer (doğrusal) tek bir eğimi değil çoklu eğimleri ve dolayısıyla çoklu doğal çınlama sürelerinin aynı hacim içerisinde birbiri ardına oluştuğunu gösterir. Bu sönümleme zamanlarını inceleyebilmek akustik ölçümlerde çok iyi düzeyde sinyal-gürültü oranını gerektirir. Diğer bir değişle arka plan gürültü düzeyinin, sinyalin üretildikten sonra mekân içi yansımaların kaydedildiği darbe yanıtı düzeyinden çok daha düşük olması gerekir. Zirve-sinyal-gürültü oranı (PSNR) olarak tariflediğimiz değer Ayasofya ölçümlerinde tüm frekans aralığında 45–50 dB olacak şekilde hedeflenmiştir. Bu sebeple farklı sinyaller ile ölçümler yürütülmüştür. Bu sinyal üretim denemeleri arasında E-sweep (ESS), MLS, MLS-pink, balon patlaması ve ahşap plaka çırpma/vurma yer alır. Üretilen sinyallerin hacim içini doldurması ve sonrasında yansıma örgüsünü içeren oda darbe yanıtlarında en iyi PSNR değerini ESS sinyali verdiği için analizlerde bu kayıtlar kullanılmıştır. Ölçümlerde darbe yanıtı uzunluğu 21.8 saniye olarak tutulmuştur. Üç kaynak (mahfil yanı, minber önü - S1; yan köşe sahın - S2, ve merkezi kubbe altı - S3) ve altı alıcı noktası değerlendirilmiştir. Ölçüm noktaları seçilirken sadece ibadet esnasındaki tip kaynak pozisyonları değil aynı zamanda bağlasık hacimlerin bir cıktısı olan coklu ses sönümleme eğrilerini Ayasofya'nın zengin mimarisi içerisinde anlamaya çalışmak amacıyla farklı konumlarda alıcı noktalarından da oda darbe yanıtları toplanmış ve analizlerde kullanılmıştır (Sekil 1).



Şekil 1. Ayasofya saha ölçüm noktaları (S-kaynak, R-alıcı) (solda) ve ölçüm fotoğrafları (sağda)

3.2. Geometrik akustik yöntemi ile benzetimler

Işın izleme ve görüntü-kaynak modelleri gibi geometrik akustik teorilerini temel alan benzetim araçları standart tek hacimli (tek eğrili) hacimlerde uzun yıllardır başarıyla kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında ışın izleme benzetimleri öncelikle saha testlerine gitmeden önce farklı alıcı konumlarında sesin davranışı ile ilgili bir öngörüye sahip olmak ve sınırlı sürede tamamlanması gereken saha ölçümlerini bu doğrultuda planlamak için kullanılmıştır. Saha ölçümleri sonrası elde edilen gerçek veriler ile benzetimlerde kullanılan akustik model malzemelerin ses yutma katsayıları üzerinden akort edilerek daha fazla kaynak alıcı konumunu incelemek amacıyla kullanılmıştır. Son olarak geometrik akustik benzetimler, müze ve ilk işleyişi olan kilise düzenindeki mermer zemin yüzeyi dijital/sanal olarak henüz ölçümü yapılmamış mevcut cami kullanımındaki halı ile değiştirilerek iç hacmin akustik özellikleri üzerinde kestirimlerde bulunmak amacıyla kullanılmıştır.

Benzetimler ODEON hacim akustiği yazılımı v.14.04 - v.17.00 (Odeon A/S, Lyngby, Denmark) (Naylor, 1993) ile yürütülmüştür. Yeterli ses enerjisinin tüm hacmi doldurduğuna emin olmak üzere 1,000,000 ışın kullanılmıştır. Yüzeylere ses yutma katsayıları malzeme farklılıklarına göre atanmış, malzemelerden özellikle üst yapı elemanlarında sıva ve boyalı yüzeylerin ses yutma katsayıları saha ölçümlerinden gelen verilere göre uyarlanmıştır. Şekil 2'de (solda) ışın izleme benzetimlerinde kullanılan akustik modele ait görsel sunulmaktadır.



Şekil 2. Ayasofya ışın izleme benzetimlerinde kullanılan akustik model (solda) ve farklı alt hacimlerin (domain) işaretli olduğu DEM benzetimlerinde kullanılan örgülenmiş katı model (sağda)

3.3. Difüzyon denklemi modeli ile analizler

Sonraki başlıklarda detayları açıklanan, Ayasofya içerisinde tespit edilen çoklu sönümleme eğrilerinin ortaya çıkma sebeplerini daha iyi anlayabilmek üzere çalışma kapsamında difüzyon denklemi modeli çözümlemesinden yararlanılmıştır. Son yıllarda hacim/oda akustiğinde kullanılmaya başlanan ve istatistiksel teori ve geometrik akustikte ışın izleme modellerine göre belirli durumlarda avantajları olan yeni bir yöntem olarak difüzyon denklemi teorisi üzerine çalışmalar dikkati çekmektedir. Bu modele esin kaynağı olan elektromanyetik yayılıma benzer olarak parçacıkların kapalı bir ortamda kaynaktan dağılımı sonrası tanımlı sınırlarda küresel saçıcılara çarparak yutum veya saçınımları ile enerjileri azalır ve enerjileri daha az olan bölgeye doğru akışları gerçekleşir. Difüzyon denklemi modelinin oda akustiğinde tek hacimli ve tek sönümleme eğrili hacimlerde uygulanabilirliği kanıtlandıktan (Valeau et. al, 2006) sonra araştırmalar bağlaşık hacimler üzerine yoğunlaşmıştır (Sü Gül et al., 2016; Sü Gül et al., 2017; Sü Gül 2019a,b).

Difüzyon denklemi yine geometrik akustik üst başlığı altına girer. Işın izlemeye göre önemli bir avantajı olarak sonlu eleman alt yapısında hacmin her bir noktası bu yöntemle çok daha kısa sürelerde çözümlenebilir. Elde edilen zamana göre hacimde enerji düzeyi dağılımından her konumda istenilen akustik metrikler hesaplanabilir. Ayrıca ışın izleme yöntemi ile hesaplanamayan enerji akış vektörleri ve enerji akış eğrileri, zamansal ve uzaysal olarak difüzyon denklemi çözümünden elde edilebilir. Bu yöntem özellikle çok sayıda farklı eğimli/eğrili ses enerjisi sönümleme oluşumunu anlamlandırmada veya akustik çıktıları mimari girdilerle ilişkilendirmede önemlidir.

Özet olarak difüzyon denkleminde çok yönlü bir ses kaynağının varlığında bir oda veya kapalı alan/hacim/domain (V) içerisinde zamana bağlı enerji yoğunluğu q(r,t), ses enerjisi yoğunluğu (*w*) bir nokta/konum (r) ve zamanda (t) aşağıdaki denklem ile ifade edilir (Valeau et. al, 2006);

$$\frac{\partial w(r,t)}{\partial t} - D\nabla^2 w(r,t) + cmw(r,t) = q(r,t), \in V,$$
⁽¹⁾

Denklem (1)'de ∇^2 Laplace işlem operatörünü, D difüzyon katsayısını, c sesin hızını, m ise hava ses yutma katsayısını ifade eder. Difüzyon katsayısı D, denklem (3)'te gösterildiği gibi odanın morfolojisini ortalama-serbest-patika (mean-free-path λ) üzerinden dikkate alır;

$$D = \frac{\lambda c}{3} = \frac{4Vc}{3S},\tag{2}$$

Denklem (2)'te λ ortalama-serbest-patika, V odanın hacmi, S ise toplam yüzey alanını ifade eder. Denklem (1)'de ifade edilen q(r,t) kaynağın olmadığı her noktada sıfırdır. Zamana bağlı bir çözümde, noktasal kaynak için akustik güç kaynakta darbe sesi olarak aşağıdaki şekilde modellenir; $q(r_s, t) = E_0 \delta(r - r_s) \delta(t - t_0)$, (3)

Denklem (3)'te δ Dirac-delta fonksiyonunu, r_s kaynağın koordinat eksenlerinde konumunu ifade eder. E_0 , r_s konumunda ve t_0 anında kaynağın ürettiği güçtür. Hacim içinde ses alanının ifade edilmesi için tanımlanmış denklemlerden sonraki önemli bir diğer konu sınır koşulların tanımlanmasıdır. Sınır koşullarda enerji alışverişini dikkate alan hacmi çevreleyen yüzeylerin denklemi aşağıdaki gibidir; $U(n, t) = m = -D \nabla w(n, t) = m = 4 V cm(n, t) = m C$

$$J(r,t) \cdot \boldsymbol{n} = -D\nabla w(r,t) \cdot \boldsymbol{n} = A_X cw(r,t), \text{ on } S,$$
(4)

Denklem (4)'te J(r,t) ses enerjisi akış vektörünü, c sesin hızını, A_X ise değişim katsayısını ifade eder. Bu ifade içeriğine malzemelerin ses yutma katsayısı bilgileri girilir. Değişim katsayısı ile ilgili farklı modeller üretilmiştir. Bunların içerisinde denklem (5)'de sunulan modifiyeli-karma sınır modeli (Xiang et al., 2011) dağınık ses alanları için geçerli olmakla beraber belirli yüzeyleri diğer alanlara göre kıyasla daha yutucu, dağınık olmayan ses alanlarına sahip hacimlerde de kullanılabilir. Denklem (4) ve (5)'in birleştirilmesiyle elde edilen sonuç sınır model denklemi, denklem (6) olarak sunulmaktadır.

$$A_X = \frac{\alpha}{2(2-\alpha)} \tag{5}$$

$$D\frac{\partial w(r,t)}{\partial n} = \frac{c\alpha}{2(2-\alpha)}w(r,t), on S.$$
(6)

Yukarıda tanımlanan hacim içi ve sınır denklemlerinin sonlu elemanlarda zamana bağlı sayısal çözümleri üretilen akustik modeller üzerinde işlenir. Şekil 2'de (sağda) Ayasofya için gösterildiği gibi işlem öncesi katı modelin örgülenmesi ve her bir örgünün en büyük boyutunun hacmin ortalamaserbest-patika (MFP) uzunluğundan küçük olması gerekliliği tüm frekanslar için gereken tek koşuldur.

3.4. Çoklu sönümleme eğrisi analiz yöntemleri

Ayasofya içerisinde oda darbe yanıtı verilerinin gerçek ölçümler ile veya bilgisayar benzetimlerinden elde edilmesinden sonra sönümleme süreleri ve derecelerini hesaplayabilmek ve bu verilerden akustik bağlaşıklığı derecelendirebilmek üzere güvenilir bir analiz yöntemi gerekmektedir. Nitekim standart üssel sönümleme eğrisi üzerinden elde edilen T20, T30 ve T60 metrikleri artık çoklu sönümleme eğrilerinde geçerliliğini kaybetmektedir. Bu çalışmada çoklu sönümleme eğrilerinin analizlerinde geçerliliği kabul edilmiş Bayesian kestirim yöntemi anlatılmaktadır. Bayesian olasılık teorisi olasılıkları ilişkilendirme ve işleme üzerine kurulu sayısal bir çıkarım teorisidir. Araştırmaya konu olan parametrelerin elde edileceği tüm ulaşılır bilgiyi birleştirme potansiyeline sahiptir. Ses enerjisi sönümleme eğrilerinde kullanımı Bayesian modele dayalı sönümleme analizi olarak tarif edilir. Bu analizde Schroeder integrali ile elde edilen gerçek data üzerinde bir veya birden çok eğim olasılığı farklı modeller için denenerek bir yaklaşım yapılır. Bu model seçim yönteminde önceden eğim sayısının bilinmesine ihtiyaç yoktur. En yüksek olasılığı veren model üzerinden eğim sayısı ve eğim profilinin diğer parametreleri hesaplanır (Xiang et al., 2011). Bayesian modeli genelleştirilmiş lineer

bir modeldir ve lineer olmayan veya üssel terimlerin lineer birleşimi ile oluşturulur. Schroeder sönümleme fonksiyonları ise Schroeder ters integrali ile elde edilir. 'S' adet üssel sönümleme teriminden oluşan genelleştirilmiş lineer bir parametrik modelde (H_s) Schroeder sönümleme fonksiyonunu ifade eder. Buna göre ilgili denklem aşağıda sunulmaktadır.

$$II_{S}(A, T, t_{i}) = A_{0}(t_{K} - t_{i}) + \sum_{j=1}^{3} A_{j} \left(e^{\frac{-13.8 \cdot t_{i}}{T_{j}}} - e^{\frac{-13.8 \cdot t_{K}}{T_{j}}} \right),$$
(7)

Denklem (7)'de indeks $0 \le i \le K - 1$ aralığında değişir. Sönümleme parametreleri Aj: A1, A2, A3... lineer genlik parametreleridir ve her bir ayrı üssel sönümleme teriminin logaritmik ifadesinde katkı düzeyini belirtir. Tj logaritmik sönümleme eğrilerinde, j = 1, 2, ..., S ile gösterilen her bir üssel sönümleme teriminin sönümleme süresini ifade eder. Sönümleme sırası olarak da tanımlanabilir.

 $A_0(t_K - t_i)$ gürültü teriminde t_K Schroeder integralinde üst limiti, alt indis K ise toplam data noktasını ifade eder. Bu çözümlemeyle toplam eğim sayısı, her bir eğimin sönümleme süresi ve sönümleme düzeyleri elde edilebilir. Bu yöntem ile Ayasofya içerisindeki farklı kaynak-alıcı eşleşmelerinde elde edilen oda darbe yanıtlarından tek veya çoklu sönümleme eğrisi oluşumuna göre sönümleme süreleri ve sönümleme düzeyleri hesaplanarak, akustik açıdan bağlaşıklığın mimari parametrelere göre değişimi irdelenmiştir.

4. BULGULAR

Bu araştırmada ilk olarak saha ölçüm noktalarında enerji sönümleme eğrileri Bayesian kestirim yöntemi ile hesaplanmış ve ölçüm noktalarında tekil veya çoklu (iki, üç... sonümleme eğrisi) sönümleme sürelerinin oluşumu konuma göre oktav bantlarında elde edilen sonuçların ortalaması alınarak plan üzerine Şekil 3'te gösterildiği şekilde plana harita olarak işlenmiştir (Sü Gül et al., 2018). Dağılım haritasında gözlendiği üzere açık gri ile ifade edilen ölçüm noktalarında standart tekil çınlama süreleri tespit edilmiş, renk koyulaştıkça bu tek çınlama süresinin yerini çoğul sönümleme sürelerine veya çoklu çınlama sürelerine bıraktığı gözlenmiştir. Bu durum özellikle yan sahınlara merkezi ibadet alanından / ana hacimden bir geriye dönük ses akışı olduğunu ve bunun fark edilir düzeyde bir ikincil ve gecikerek gelen yansımalar örgüsü yarattığını göstermektedir. Benzer durum kaynağa çok yakın merkezi kubbe altındaki ibadet alanı içerisindeki alıcı noktalarında da gözlenmektedir. Ana aksta kaynaktan uzaklaştıkça bu oluşum azalmaktadır.



Şekil 3. Ayasofya içerisindeki ölçüm noktalarında tespit edilen ortalama ses sönümleme eğrisi sayıları dağılım haritası

Bu araştırmanın ikinci fazında gerçek ölçümlerde tespit edilen çoklu sönümleme eğrilerinin mimari ile ilişkili olabilecek sebepleri akış vektörleri üzerinden görselleştirilerek DEM yöntemi ile incelenmiştir. Bu yöntemle sadece ölçüm noktaları değerlendirilmemiş, pratikte sahada ölçülemeyecek plan ve kesit düzleminde hacim içerisine dağıtılmış yaklaşık 1000 alıcı noktası için analizler yinelenmiştir (Sü Gül, 2021). Şekil 4'te zamana göre çözümlenmiş model üstünde örnek iki zaman anı ve 1 kHz oktav bandı için ses enerjisi akışının yönünün gözlenebileceği iki ayrı doğrultuda kesit ve plan üzerindeki akış vektörleri ifade edilmektedir. Hacimsel enerji dağılımı ve akış vektörlerinden kubbede biriken akustik enerjinin daha sonra merkezi ibadet alanına ve yan sahınlara akışı gözlenebilmektedir. Ses akış vektörlerinde aynı konumda tam bir dönüş iki eğimin kesiştiği anı ifade etmektedir (Sü Gül, 2019a). Ayasofya içerisinde her bir alıcı noktasında bu tam dönüş gerçekleşmez ve akışın aynı yönde olduğu noktalar tek çınlama süresinin ölçüldüğü lineer/üssel sönümleme eğrilerini ifade eder.



Şekil 4. Ayasofya Müzesi difüzyon denklemi model çözümlemesi, 1 kHz, 150 ve 900 ms, kaynak (mavi ile gösterilmiş), alıcı (magenta ile gösterilmiş)

Bu çalışmayı bir adım ileri taşımak üzere Ayasofya'nın zengin mimarisinden yararlanılmış, farklı boyutlarda kemer kubbe, tonoz elemanları ile birbirine bağlanan alt hacimler bağlaşık hacim analiz geleneğinde sorgulanmıştır. Akış vektörlerinin enerji sönümleme eğrisine dönüşmüş hali olarak ifadesi enerji akış eğrisi üzerindeki çukurlar Bayesian kestiriminde dönüş noktası olarak ifade edilen erken eğimin geç sönümle eğrisiyle kesiştiği anda oluşur. Bağlaşıklık ne kadar güçlüyse eğim üzerindeki çukur o kadar derindir. Buna örnek olarak Şekil 5'te farklı alıcı noktaları için enerji akış sönümleme eğrileri sunulmaktadır. Ses enerjisi akış sönümleme eğrisinde çukur yok ve lineer bir düşüş gözleniyorsa bu, alıcı noktalarında tekil çınlama süreleri gözlendiğini ifade eder. Şekil 6'da ise hacmin tümü için yapılan çalışmanın özeti iki ayrı kaynak noktasına göre tek veya çift sönümleme süreleri tespiti olarak görselleştirilmiştir (Sü Gül, 2021).



Şekil 5. Ayasofya içerisinde farklı yüksekliklerde ve farklı alt hacimlerde DEM yöntemi ile elde edilen örnek ses enerjisi akış düşüşü eğrileri, S1 kaynak noktası ve 1 kHz için elde edilen sonuçlar



Şekil 6. Ayasofya içerisine dağıtılmış 1000 alıcı noktasının iki ayrı kaynak noktası için yürütülen DEM çözümlemesi, ışın izleme modeli analizleri ve Bayesian istatistiksel kestirimi ile tespit edilen tekil ve çoklu ses enerjisi eğimi dağılımları

Şekil 6 incelendiğinde çoklu çınlama sürelerinin daha çok yan sahınlarda özellikle kaynağın küçük köşe alt hacimde konumlandığı durumda gözlendiği söylenebilir. Fakat benzer bir ses alanı orta aksta mahfil yanı kaynak konumunda, ana kubbe altında ve kaynağa yakın alıcı noktalarında da gözlenmiştir. Kaynaktan uzaklaştıkça ve kaynak zeminde alıcı noktaları ise galeri alanlarında iken çoğunlukla tekil bir çınlama süresi elde edilmiştir. Kaynak ve alıcı konumuna bağlı olarak, Ayasofya'nın tek bir çınlama süresi ile ifade edilemeyecek zenginlikte ve değişkenlikte bir ses alanı ve ses akışı barındırdığı söylenebilir.

Her ne kadar T30 gibi tekil çınlama süresi ifadeleri Ayasofya gibi bağlaşık ses alanlarına sahip bir yapıda asıl incelenmesi gereken parametre olmasa da kimi zaman farklı araştırma ekiplerinin değişik dönemlere ait ölçüm sonuçlarını karşılaştırmak veya mevcut durumdaki halı ve mermer dokusunun yarattığı fark hakkında fikir sahibi olmak adına bu parametreden yararlanılabilir. Bu sebeple son olarak bu çalışmada ışın izleme modeli ile Ayasofya'nın mevcut durumunu yansıtır halı zemin kaplaması ile çınlama süreleri değerlendirilmiştir. Şekil 7'de oktav bantlarda çınlama süreleri, saha ölçümlerini yansıtan eski müze hali, bu duruma göre akort edilmiş akustik benzetim sonuçları ve güncel cami yapısı koşulunda halı ile birlikte değerlendirilmiş akustik benzetim sonuçları karşılaştırılmaktadır. Şekil 7'deki T30 karşılaştırması incelendiğinde halının orta ve yüksek frekanslarda hacim içerisindeki ses yutma alanına katkısıyla çınlama sürelerinde yapının müze kullanıma kıyasla 2 ile 4 saniye arasında düşüşler yarattığı gözlenmektedir. Bu durum cami içerisinde konuşmanın anlaşılabilirliğinin müze kullanımına göre daha iyi bir düzeyde olacağı anlamına gelmektedir. Ses alanının cami kullanımına uygun bir başka katkısı ise düşük frekanslı sesleri orta frekanslı seslere oranı olarak bilinen bas oranının müze veya kilise kullanımına göre çok daha yüksek olmasıdır. Bu durumda erkek sesini daha çok güçlendiren bir akustik peyzaj ortaya çıkmaktadır. Diğer

yandan özgün kilise ve sonrasında müze halinde Ayasofya iç hacim ses alanında tespit edilen çoklu sönümleme eğrilerinde cami kullanımında kayıplar gözlenmiştir.



Şekil 7. Ayasofya içerisinde ölçüm noktaları için ortalama T30 karşılaştırması; saha ölçüm sonucu (müze; mermer zemin kaplaması), müze kullanımına göre akort edilmiş ışın izleme benzetimleri (mermer zemin kaplaması) ve cami kullanımı için ışın izleme benzetimleri (halı zemin kaplaması)

5. SONUÇ

Bu çalışmada zengin mimari diliyle Ayasofya'nın hacim akustiği en güncel teknik ve yöntemlerle sorgulanmıştır. Yapının çoklu üst örtüsü ve altında kalan alt hacimleri, yan sahın ve galeri alanlarının birbiri ile ve merkezi sahınla bağlantısı, kemer ve kubbe boyutları mekân içerisinde özellikli bir ses alanı yaratmaktadır. Alt hacimlerin birbiri arasındaki ses enerjisi akışları yapının klasik akustik parametrelerle tariflenmesinin yeterli olmadığını göstermektedir. Bağlaşık hacim geleneğinde çoklu ses enerjisi sönümleme eğrilerinin incelenebileceği difüzyon denklemi ve Bayesian istatistiksel kestirimi gibi akustik biliminin son gelişimleri doğrultusunda yapıyı anlamaya çalışmak, içerideki ses alanının zenginliğini mimari ile ilişkilendirebilmek adına gereklidir. Muhakkak ki bu özellikli ses alanının yapının ilahi hissine duyumsal olarak bir katkısı olmuştur. İlerleyen süreçte Ayasofya gibi anıtsal dini yapılarda gözlenebilen ve nesnel olarak bu çalışmada olduğu gibi tarif edilen çoklu ses sönümleme eğrilerinin cemaat üzerindeki öznel (sübjektif) etkileri üzerine araştırmalar bilimsel yöntemlerle devam etmelidir.

5. KAYNAKLAR

Abdelazeez, K., Hammad, R.N. ve Mustafa, A.A. "Acoustics of King Abdullah Mosque," J. Acoust. Soc. Am., 90.3, 1441-1445, 1991.

Abdou, A.A. "Measurement of acoustical characteristics of mosques in Saudi Arabia," J. Acoust. Soc. Am., 113.3, 1505-1517, 2003.

Anderson, J.S. ve Anderson, M.B. "Acoustic coupling effects in St Paul's Cathedral, London," J. Sound and Vib., 236.2, 209-225, 2000.

Alvarez-Morales, L., Giron, S., Galindo, M. ve Zamarreno, T. (2016). "Acoustic environment of Andalusian cathedrals," Build. Environ., 103,182-192.

Cirillo, E. ve Martellotta, F. "Sound propagation and energy relations in churches," J. Acoust. Soc. Am., 118, 232-48, 2005.

Giron, S., Alvarez-Morales, L. ve Zamarreno, T. "Church acoustics: A state-of-the-art review after several decades of research," J. Sound Vib., 411, 378-408, 2017.

Kleiner, M., Klepper, D.L. ve Torres, R.R. Worship Space Acoustics. (J. Ross Publishing, Fort Lauderdale), 2010.

Luigi, E. ve Martellotta, F. "Acoustics as a cultural heritage: the case of Orthodox churches and of the Russian church in Bari," J. Cult. Heritage., 16, 912-917, 2015.

Martellotta, F. "Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome," J. Acoust. Soc. Am., 126, 1175-1186, 2009.

Martellotta, F. "Understanding the acoustics of Papal basilicas in Rome by means of a coupled-volumes approach," J. Sound Vib., 382, 413-427, 2016.

Martellotta, F., Alvarez-Morales, L., Giron, S. ve Zamarreno, T. "An investigation of multi-rate sound decay under strongly non-diffuse conditions: The Crypt of the Cathedral of Cadiz," J. Sound Vib., 421, 261-274, 2018.

Naylor, G.M. "ODEON-another hybrid room acoustical model," Appl. Acoust. 38, 131-143, 1993.

Oyhon, E. ve Etingü, B. Hagia Sophia, Church of Divine Wisdom. Churches in İstanbul. (YKY, İstanbul), pp. 39-41, 1999.

Pedrero, A., Ruiz, R., Díaz-Chyla, A. ve Díaz, C. "Acoustical study of Toledo Cathedral according to its liturgical uses," Appl. Acoust. 85, 3-33, 2014.

Suárez, R., Alonso, A. ve Sendra, J. J. "Intangible cultural heritage: the sound of the Romanesque Cathedral of Santiago de Compostela," J. Cult. Herit., 16.2, 239-243, 2015.

Suárez, R., Alonso, A. ve Sendra, J.J. "Virtual acoustic environment reconstruction of the hypostyle mosque of Cordoba," Appl. Acoust. 140, 214-224, 2018.

Sü, Z. ve Yılmazer, S. (2008). "The acoustical characteristics of the Kocatepe Mosque in Ankara, Turkey," Arch. Sci. Rev., 51, 21-30.

Sü Gül, Z.S. ve Çalışkan, M. "Impact of design decisions on acoustical comfort parameters: case study of Dogramacızade Ali Paşa Mosque," App. Acoust. 74, 834-844, 2013a.

Sü Gül, Z. ve Çalışkan, M. "Acoustical design of Turkish Religious Affairs Mosque," in 21st International Congress on Acoustics (ICA) Proceedings, Montreal, Canada, 2-7 June 2013b.

Sü Gül, Z., Çalışkan, M. ve Tavukçuoğlu, A. "Geçmişten günümüze Süleymaniye Camii akustiği," Megaron, 9.3, 201-216, 2014.

Sü Gül, Z., Xiang, N. ve Çalışkan, M. "Investigations on sound energy decays and flows in a monumental mosque," J. Acoust. Soc. Am., 140.1, pp.344-355, 2016.

Sü Gül, Z., Xiang, N. ve Çalışkan, M. "Diffusion equation based finite element modeling of a monumental worship space." J. Comput. Acoust. 25.4, pp. 1-16, 2017.

Sü Gül, Z., Çalışkan, M., Tavukçuoğlu ve A., Xiang, N. "Assessment of acoustical indicators in multidomed historic structures by non-exponential energy decay analysis," Acoust. Australia, 46, pp. 181-192, 2018.

Sü Gül, Z. "Acoustical impact of architectonics and material features in the lifespan of two monumental sacred structures," Acoustics, 1, pp. 493-516, 2019a.

Sü Gül, Z. "Bağlaşık ses alanlarında çoklu sönümleme eğrileri analiz yöntemleri," Proceedings of 13th

National Acoustics Congress (TAKDER), Diyarbakır, Turkey, 17-18 October 2019b, pp. 67-80.

Sü Gül, Z., Odabaş E., Xiang N. ve Çalışkan M. "Diffusion equation modeling for sound energy flow analysis in multi domain structures," J. Acoust. Soc. Am., 145.4, pp. 2703-2717, 2019.

Sü Gül, Z. "Exploration of room acoustics coupling in Hagia Sophia of İstanbul for its different states," J. Acoust. Soc. Am., 149.1, 320-339, 2021.

Valeau, V., Picaut, J. ve Hodgson, M. "On the use of a diffusion equation for room-acoustic prediction," J. Acoust. Soc. Am., 119, pp. 1504-1513, 2006.

Xiang, N., Goggans, P.M., Jasa, T. ve Robinson, P. "Bayesian characterization of multiple-slope sound energy decays in coupled-volume systems," J. Acoust. Soc. Am., 129, pp. 741-752, 2011.