

BAĞLAŞIK SES ALANLARINDA ÇOKLU SÖNÜMLEME EĞRİLERİ ANALİZ YÖNTEMLERİ

Zühre Sü Gül¹

¹Bilkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye
Tel: 312 290 26 41, e-posta: zuhre@bilkent.edu.tr

ÖZET

Bağlaışık hacimler veya sıklıkla bilinen çınlama hücreleri özellikle konser salonu tasarımlarında akustik tasarımcıların uyguladığı yenilikçi özümlemlerden bir tanesidir. Bunun önemli bir sebebi bağlaışık hacimlerde çoklu ses enerjisi sönümlleme eğrilerinin oluştuğı durumda, normalde birbirine zıt gereksinimleri olan sübjektif çınlama ve berraklığın birlikte sağlanabilmesidir. Çoklu veya eksponansiyel (üssel) olmayan ses sönümlleme eğrileri bağlaışık hacimler dışında belirli kriterlerin sağlandığı durumlarda tek hacimli sistemlerde de gözlenebilir. Örnek olarak çok kubbeli büyük yapılarda alt hacimler birbirinden kesin sınırlarla bölünmese dahi hacim içerisinde düzensiz ses alanlarının oluşumu, ses enerjisinin yüksek olduğu bölgeden daha düşük olduğu bölgeye doğru akmasına sebebiyet verebilir. Oda akustiğinde bağlaışık ses alanlarının daha iyi anlaşılması ile tasarım veya bilimsel araştırmalarda kullanılabilmesi için güvenilir yöntemlerin uygulanması oldukça önemlidir. Bu çalışmada akustik oda (hacim) darbe yanıtı verilerinden, sönümlleme hızları, oranları ve sönümlleme sürelerini belirleyebilmek üzere kullanılan istatistiksel Bayesian kestirim yöntemi anlatılmaktadır. Örnek yapılarda ölçümler sonucu hesaplanan ses sönümlleme metriklerine göre çoklu eğriler tespit edilmiştir. Çalışmada bu oluşumun sebeplerini irdelemek ve mimari ile ilişkilendirebilmek üzere kullanılan, enerji akış eğrileri ve akış vektörlerinin hesaplanabildiğı bir yöntem olarak difüzyon denklemi modelinin sonlu elemanlarda özümlemesi tarif edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bağlaışık Akustik Alanlar, Difüzyon Denklemi Modeli

THE ANALYSIS METHODS OF MULTIPLE-DECAY RATES IN ROOM ACOUSTICS COUPLING

ABSTRACT

Architectural acousticians have been interested in halls that incorporate coupled-volume systems because of their potential for creating desirable effects in meeting conflicting requirements between clarity and reverberance. The particular sound field in coupled volume spaces is mainly due to the non-exponential sound energy decay. Multiple decay formation can also be observed within single volume spaces, if the sound field is not diffused and the virtual separation of energy zones can create energy flow from one location to another as in multi-domed superstructures. In order to further comprehend and utilize acoustical coupling it is highly important to apply reliable methods in both design and analysis of spaces that are either coupled or virtually fragmented. In this study initially the reliable methods and metrics in investigation of multiple sound energy decays are discussed by application of Bayesian inference for estimating decay parameters. Later, energy flow decay and flow vectors are examined over case structures by diffusion equation modelling (DEM) for highlighting the architectural parameters in effect of energy exchange mechanism in room acoustics coupling.

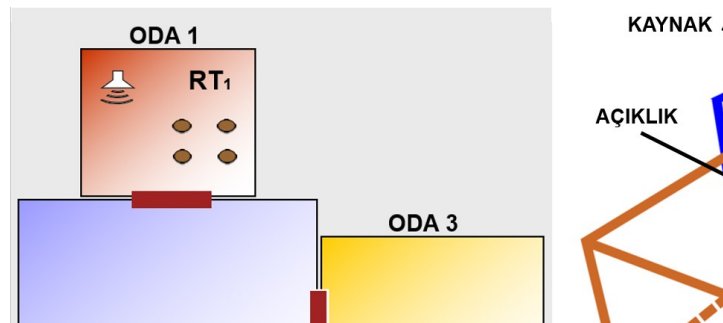
Keywords: Room Acoustics Coupling, Diffusion Equation Model

Bağlaışık hacimler içerdđđi özelliikli ses alanları ile son yıllarda mimari akustik tasarımıda bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Birbirine açıklıklarla bağlı iki veya daha fazla hacmin bir araya gelmesi ile oluşan ortak alanda ses enerjisi dağılımı tek hacimli mekanlardan farklı akustik karakterler sergileyebilmektedir. Tek hacimli mekanlarda objektif akustik metriklerin elde edildiđđi tekli enerji sönümleme eğrileri yerine bağlaışık hacimlerde iki, üç hatta daha fazla ses sönümleme eğrileri gözlenebilir. Çoklu ses sönümleme eğrileri örnek olarak konser salonları gibi akustik açıdan özel mekanlarda birbirine zıt gereksinimleri olan parametrelerin optimizasyonunda kullanılmaktadır. Bağlaışık hacimlerin ürünü olarak bağlaışık ses alanları mimari akustik tasarımıda değişken mimari programa göre uygun koşulları oluşturmak amacıyla birçok araştırmaya konu olmuştur. Bu araştırmalar sırasında çoklu ses alanlarının sadece birbirine bağlı çok hacimli mekanlarda değil aynı zamanda tek hacimli fakat dağınık olmayan ses alanına sahip sistemlerde de gözlenebildiği tespit edilmiştir [1-2]. Buna örnek olarak çok kubbeli büyük hacimli ibadet yapıları verilebilir. Bu çalışmada öncelikle oluşum sebepleri ile nesnel ve öznel sonuçları üzerine farklı araştırmaların devam ettiđđi bağlaışık ses alanları üzerine literatür (yazın) özetlenmektedir. Daha sonra bu alanda geçerliliğini kanıtlamış data toplama ve analiz yöntemleri tarif edilmektedir. Son olarak farklı vakalar üzerinden örnek bulguların sunumu ile sonuçlar değerlendirilmektedir.

2. BAĞLAŞIK SES ALANLARI

2.1. Bağlaşık hacim modelleri

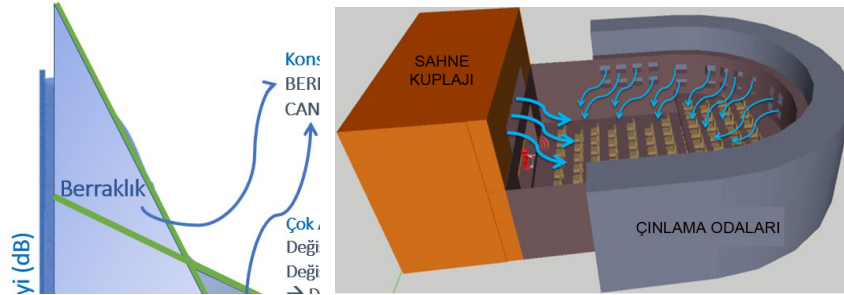
Cremer ve Müller'in [3] ilk tanımına göre bağlaşıklık hacimleri tek bir hava hacmini paylaşan fakat mimari olarak bölünmüş küçük hacimlerin bir araya gelmesiyle oluşan sistemlerdir. Akustik açıdan bağlaşıklık alanlarda çoklu ses sönümleme eğrilerinin gözlenebilmesi alıcı odasına diğer yan hacimlerden sonradan gelen enerji akışı ile mümkün olabilir. Şekil 1'de iki ve üç hacimli basit bağlaşıklık sistemlerin şematik gösterimine kaynak, alıcı ve açıklık konumları ile yer verilmektedir.



Şekil 1. Tipik üç (solda) ve iki (sağda) odalı bağlaşıklık hacimlerin şematik gösterimi

Burada önemli olan nokta bağlaşıklık hacimler arasında enerji akışı olması için kaynak ve alıcının bulunduğu ana hacimde yan veya bağlaşıklık hacimlere göre enerji yoğunluğunun daha az olması gereksinimidir. Diğer bir değişle sesin havada asılı kalma süresi veya çınlama süresi yan hacimlerden daha kısa olmalıdır. Buna göre yan odacıkların hacimleri ana hacme göre büyük ve yansıtıcı yüzeyleri baskın olabileceği gibi yan odalar hacimsel olarak küçük fakat ana oda ve yan odadaki malzeme dağılımlarına göre eşdeğer ses yutma alanının daha düşük olması da yeterlidir. Özetle enerji alışverişi ses sönümleme eğrileri eşit olmayan ve birbirinden yeterince ayrık iki hacim arasında gözlenebilir. Böylelikle enerjinin fazla olduğu hacimden az olduğu hacme doğru bir akış gözlenir. Tasarımcıların bağlaşıklık hacim yaklaşımına ilgisi özellikle konser salonu tasarımları ile ortaya çıkmış ve araştırmalar bu doğrultuda hız kazanmıştır. Müzik ve konuşmanın bir arada gerçekleştirildiği çok amaçlı salon kullanımlarında farklı akustik koşulları elde etmek üzere bağlaşıklık hacimlerden

yararlanan örnekler de mevcuttur [4]. Özellikle müzik içerikli aktivitelerin gerçekleştirileceği salonlarda ilk veya erken sönümlenen enerji eğrisi berraklık parametresine katkı sağlarken geç veya sonra gelen sönümlenme eğrileri sesin canlılığına veya öznel çınlama/çınlanıma katkı sağlamaktadır. Böylelikle birbirine zıt koşullar gerektiren bu iki parametre çoklu sönümlenme eğrileri ile birlikte sağlanmış olur.



Şekil 2. İki eğimli ses sönümlenme enerji eğrisi şematik gösterimi ve öznel etkileri (solda), Sahne kuplajı ve dağınık kuplajda çınlama odalarının şematik gösterimi (sağda)

Konser salonlarında iki tip bağlaşıklık hacim yaklaşımı mevcuttur. Birincisi dağıtılmış çınlama odaları/hücreleri diğeri ise sahne kulesi kuplajı. Şekil 2’de gösterildiği gibi sahnenin ana salona bir açıklık ve açılır kapanır kapı/kapaklar ile bağlanması yoluyla sahne içerisinde biriken enerji sahne kulesi üst kotundan salon üst koltuklarına ek enerjinin ulaşmasını sağlamada kullanılabilir. Buna örnek olarak Bass Performance Hall (Forth Worth, TX) ve Birmingham Symphony Hall (Londra, UK) verilebilir. Diğer tür ise dinleyici alanlarında eşdeğer ses alanı yaratabilmesi açısından daha çok tercih edilen ana salonun etrafını (duvarlar veya bazen tavan arası) saran çınlama odalarıdır. Bu ikinci tipte koltuk alanlarının etrafını saran çok sayıda kapı/kapağın belirli oranlarda açılıp kapatılmasıyla salonun akustik karakteri icra edilecek müziğin türüne göre en iyileştirilebilir. Eugene McDermott Concert Hall (Dallas, TX) ve KKL Luzern Konser Salonu (İsviçre) dağınık bağlaşıklık uygulamasına örnek olarak gösterilebilir.

Çoklu sönümlenme eğrileri daha önce belirtildiği üzere sadece çok hacimli sistemlerde gözlenmez. Mekan içerisindeki ses alanının dağınık olmadığı diğer bir değişle ses enerjisi dağılımının hacim içerisinde farklı bölgelerde toplandığı ve hacimsel olarak eşdeğer olmadığı durumlarda da farklı kaynak ve alıcı konfigürasyonlarında erken ve geç çınlama veya sönümlenme oranından bahsedilebilir. Buna örnek olarak çok kubbeli anıtsal camii yapıları veya [1] bazilika ve katedraller verilebilir [5, 6]. Bu durum sonraki başlıklarda kısaca tartışıldığı üzere bitirme malzemelerinin ses yutma ve yansıtma özelliklerindeki konumsal ayrıma bağlı olarak merkezi hacim içerisinde gözlenebilir veya çok sayıda küçük hacmin ana hacme kemer benzeri açıklıklarla bağlandığı yan sahınlardaki kaynak ve alıcı konfigürasyonlarında ortaya çıkabilir. Tüm bu örneklerde gözlenebilen çoklu sönümlenme eğrilerinin ortaya çıkma sebeplerini daha iyi anlayabilmek, elde edilen sonuç verileri sayısal olarak değerlendirebilmek ve akustik bağlaşıklığın gücünü nesnel ve öznel olarak ifade edebilmek üzere bugüne kadar pek çok kuramsal (teorik) çalışma yürütülmüştür. Bir sonraki bölümde bu araştırma alanında literatürün kısa özetine yer verilmektedir.

2.2. Bağlaşıklık ses alanları üzerine kuramsal çalışmalar

Oda akustiğinde bağlaşıklık alan çalışmalarının ilki, Davis’in [7] istatistiksel akustik modeli ile iki komşu hacim arasındaki ortak duvar üzerinden ses geçişi sonucu oluşan hacimlerdeki ses sönümlenme karakteri üzerinedir. Diğer bir temel çalışma Eyring’in [8] istatistiksel teoriyi kıyaslamak üzere bağlaşıklık hacimlerde yürüttüğü ölçümleri kapsar. Eyring bu çalışmasında

açıklık oranı, ses yutma alanlarını, kaynak ve alıcı konumlarını ampirik bir formül ile değiştirerek farklı komplekslikteki hacimler üzerinde denemeler yapmıştır. Bağlaışık hacimler üzerine ilk dalga fiziğı teorisi, hacimleri sınır değeri problemi olarak ele aldığı çalışma ile Harris tarafından ortaya konmuştur [9]. Bu çalışma temel olarak istatistiksel teoreinin doğru sonuç vermediğı durumlarda açıklık/pencere konumuna uygun yaklaşık bir çözüm sunmaktadır. Sonraki yıllarda Lyle [10] çoklu sönümleme eğrilerinden çınlama süresi tahmini üzerinde yeni öneriler geliştirmiş, Thompson [11] ise istatistiksel teoreinin geçerli olmadığı dağınlık olmayan ses alanları ve düşük frekanslarda çalışmalar yürütmüştür.

2000'lerde konunun gerçek hayata uygulanmaya başlanması ile araştırmalar hız kazanır. Aynı zamanlarda ışın ve görüntü izleme modelleri gibi geometrik akustik teorilerini temel alan benzetim araçları standart tek hacimli (tek eğrili) hacimlerde başarıyla kullanılmaktadır. Nijss et al. [12] ilk olarak bilgisayar destekli ışın izleme modellerinin bağlaışık hacimlerde doğruluğunu ses yutucu yüzey uygulaması ile ortaya çıkan problemler üzerinden değerlendirmiştir. Summers araştırmalarında [13] çok hacimli sistemlerde istatistiksel teori ve geometrik akustik teorilerini karşılaştırmış daha sonra bağlaışık hacimlerin ortak açıklığındaki ses kırınım etkisini de dikkate alarak hibrit bir model geliştirmiştir. İyileştirilen son model geç yansımalarda hüzmekseni-izleme algoritmasını temel alır. Başka araştırmacılar mevcut model ve bu modelleri temel alan yazılımları kullanarak elde ettikleri akustik oda (hacim) darbe yanıtlarından çoklu ses sönümleme eğrilerinin mimari girdilerini oluşturan hacim/boyut, form, malzeme ses yutma/yansıma özellikleri, açıklık boyutu gibi parametreleri değiştirerek bağlaışık hacimlerde ses enerjisi sönümleme biçimlerini incelemektedir. Ses kaynağı ve göreceli alıcı konumu, açıklığa uzaklık, açıklık oranı/şekli, hacimlerin doğal çınlama süreleri ve bunların frekansa göre dağılımları ses alanında üssel olmayan eğriye sebebiyet veren ve incelenen diğeri değişkenlerdir [14].

Son yıllarda hacim 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 modelde 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. Sayısal uygulamalarda çözümlenebilen difüzyon denklemi sonraki başlıklarda ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Difüzyon denklemi modelinin oda akustiğinde tek hacimli ve tek sönümleme eğrili hacimlerde uygulanabilirliği kanıtlandıktan [15] sonra araştırmalar bağlaışık hacimler üzerine yoğunlaşmıştır.

Yukarıda bahsedilen farklı teori ve modellerin farklı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin, istatistiksel oda akustiğı teorisi odanın ses alanında ortalama özellikleri dikkate alır ve özellikle dağınlık olmayan koşullarda konuma bağılı geçerliliğini kaybeder. Diğeri bir deyişle eğer oda içerisinde ses alanı yeterince dağınlık ise (çınlama odaları örneğinde olduğu gibi) istatistiksel teori geçerli olabilir. İstatistiksel teori özellikle dalga fiziğı temelli teorilerin kullanılmadığı oda modlarının üst üste çakışıp ayrıştırılamadığı koşullarda ve çoğunlukla üssel eğrilerin gözlemlendiğı hacimlerde uygulanabilir. Geometrik hacim akustiğı yöntemleri ise oda boyutlarının veya oda içerisindeki yüzeylerin incelenen dalga boyuna oranla yeterince büyük olduğu durumlarda geçerlidir. Bir geometrik akustik yöntemi olan ışın izlemeye, ses dalgalarının düz çizgi doğrultusunda ilerlediğı kabul edilir. Özellikle bu sebeple bir dezavantaj olarak dalga fiziğinin bazı özellikleri olan girişim ve kırınım etkileri bugünkü mevcut bilgi düzeyinde geometrik akustik yaklaşımlarla incelenemez. Difüzyon denklemi yine geometrik akustik üst başlığı altına girer. Işın izlemeye göre önemli bir avantajı olarak

sonlu eleman çözümünde hacmin her bir noktası bu yöntemle çok daha kısa sürelerde çözümlenebilir olmasıdır. Elde edilen zamana göre 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. Difüzyon denkleminin bir dezavantajı doğrudan sesi ve çok erken yansımaları içeren kaynak kapatıldıktan sonraki ilk zaman aralığında geçerli olmamasıdır. Bu yaklaşık olarak doğrudan sestten sonraki 3 veya 4 ortalama serbest zamana denk gelir (mean-free-time MFT). Dalga fiziği teorisi ise sadece hacim içerisinde oluşan akustik titreşim biçimlerinin birbirinden yeterince ayrık olduğu düşük frekanslarda kullanılabilir. Düşük frekans tanımının hangi sınıra kadar geçerli olduğu Schroeder frekansından hesaplanabilir ve oda boyutuyla doğrudan ilişkilidir. Kayıt stüdyoları gibi küçük hacimlerde, oda boyutlarının incelenen dalga boyu ile karşılaştırılabilir olduğu durumlarda dalga fiziği teorisinin kullanımı elverişlidir. Sonuç olarak hangi yöntemin kullanılacağına sisteme özgü koşullara, hacim veya hacimlerin bir araya gelmesi ile oluşan yapıların farklı mimari özelliklerine göre karar verilmelidir.

Bu başlıkta özetlenen teorik çalışmalara ek olarak önemli bir başka konu olarak sayısal veya analitik benzetimler yoluyla veya bir sonraki başlıkta özetlenen gerçek verilerle elde edilen oda darbe yanıtlarının analiz yöntemleri ve akustik bağlaşıklığın derecesinin, gücünün veya hissedilebilirliğinin nicelik olarak ifade edilmesidir. Nitekim doğru metrikler üretmeden elde edilen sonuçların akustik bağlaşıklık işaret ettiğini ortaya koymak ve sonrasında bu verileri mimari veya öznel akustik parametrelerle ilişkilendirebilmek mümkün olmayacaktır. Akustik bağlaşıklığı derecelendirme üzerine çalışmalar öncelikle objektif göstergeler üzerinden ilerlemiştir. Üssel olmayan ses enerjisi sönümleme eğrileri üzerine görsel tanı koyma, logaritmik eğrinin farklı fragmanları üzerinde doğrusal-yerleştirme yöntemi ile elde edilen eğimlerin oranlanması yöntemleriyle farklı metrikler yıllar içinde akademik çalışmalarda sunulmuş fakat bunların bilimsel olarak geçerliliği desteklenmemiştir. Enerji sönümleme eğrisi üzerinde farklı bölümlerin oranlarına dayanan niceleyiciler ikiden fazla farklı eğimlerdeki eğrinin gözlemlendiği karmaşık yapılarda bulguyu tespit etme niteliğine sahip değildir. Schroeder ses sönümleme eğrisi üzerinden geliştirilen istatistiksel Bayesian kestirim yöntemi ile akustik oda darbe yanıtı verilerinden, sönümleme hızları, oranları ve sönümleme sürelerini belirlenebilmektedir. Bu doğrultuda Xiang et al. [16] tarafından yayınlanan parametrik model iki veya daha fazla ses sönümleme eğrisinin gözlemlendiği koşullarda akustik bağlaşıklığın derecelendirme metriklerini sunarak bu alanda bilimsel geçerliliğini ispatlamıştır. Yöntemin detayları 3.2.1. bölümünde sunulmaktadır.

3. YÖNTEMLER

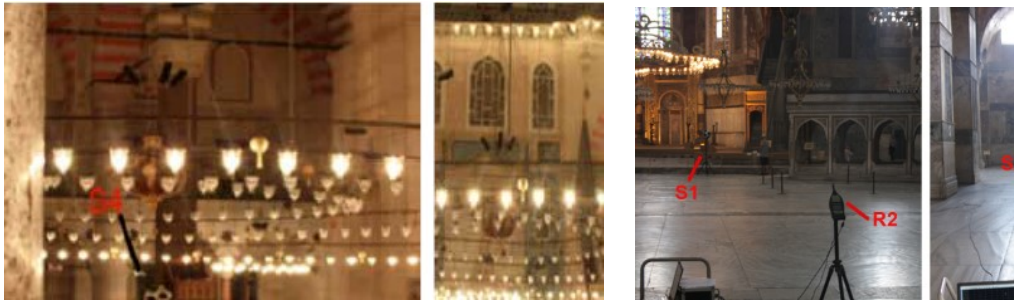
3.1. Veri toplama yöntemleri

Bağlaşıklık alanlar gerçek projelerin akustik tasarım süreçlerine daha çok dahil oldukça bu tip yapılardaki özel ses alanlarının oluşum gerekliliklerinin daha iyi anlaşılması zorunluğu ortaya çıkmaktadır. Bilimsel araştırmalar eş zamanlı devam ederken geliştirilen kuramsal modellere dayanak sağlayacak ve doğrulama aşamalarında yararlanılacak gerçek verilerin ihtiyacı artar. Önceki başlıklarda özetlenen teorik modeller benzetimler yoluyla ilk bulgularını ortaya koyar. Bu sanal bulgular ancak gerçek verilerle desteklenebilirse doğruluğunu ve geçerliliğini kanıtlayabilir.



Şekil 3. Ölçekli iki odanın birbirine bir açıklık vasıtasıyla bağlanması ile oluşan test düzeneği

Gerçek veri toplamada iki temel yöntem vardır. İlki ve en ideali mevcut yapılarda saha ölçümleri ile akustik oda darbe yanıtlarının toplanmasıdır. Fakat bağlaşıklık hacimler karmaşık yapılar olduğu için her zaman modeli deneyecek bir örnek bulunmayabilir. Bu durumda araştırmacıların başvurduğu diğer yöntem ölçekli modellerdir. Daha çok basitleştirilmiş bir veya daha çok kutunun bir araya getirilmesi ile oluşturulan bu sistemler üzerinde farklı parametrelerin etkileri değerlendirilebilir. Özellikle kaynak ve alıcı konumlarının birbirine göre ilişkisi, açıklık şekli, boyutu, konumu ile bağlanan hacimlerin birbirine kıyasla ses yutma alanları veya doğal çınlama süreleri arasındaki farkların sönümlene eğrisine etkileri deneysel olarak incelenen parametreler arasındadır. Bulgularda yer verilen örneklerden ilki ölçekli iki odanın birbirine ortak bir açıklık ile bağlanması ile oluşan bağlaşıklık hacim sisteminden elde edilmiştir (Şekil 3). Bu çalışmada %5'ten %40'a kadar değişen açıklık oranlarında kare ve dikdörtgen açıklıkların etkileri farklı kaynak ve alıcı konumları için -kaynak ve alıcı doğal çınlama süresi daha düşük olan odacıkta yer almak şartıyla- test edilmiştir [14].



Şekil 4. Süleymaniye Camii (solda) ve Ayasofya Müzesi (sağda) saha ölçüm görselleri

Çoklu ses sönümlene eğrilerinin kesin bir açıklık/kapı/kapak ile ayrılmış iki veya daha fazla hacmin bir araya gelmesiyle oluşan sistemlerde gözlenmesinin yanı sıra dağınık olmayan ses alanlarını sağlayan tek hacimli yapılarda da gözlenebildiği önceki başlıklarda vurgulanmıştı. Örnek bulgularda ele alınan diğer bir konu ise saha ölçümleri gerçekleştirilerek gerçek veri olarak oda darbe yanıtları üzerinden analizlerinin yürütüldüğü çok kubbeli anıtsal yapılarıdır. Ölçümler ISO3382-2:2008 standardına göre farklı zamanlarda Süleymaniye Camii ve Ayasofya Müzesi'nde yürütülmüştür (Şekil 4).

3.2. Çoklu sönümlene eğrisi analiz yöntemleri

3.2.1. Bayesian istatistiksel kestirim yöntemi

Akustik oda darbe yanıtı verilerinin gerçek ölçümler ile veya bilgisayar benzetimlerinden elde edilmesinden sonra sönümlene süreleri ve derecelerini hesaplayabilmek ve bu verilerden akustik bağlaşıklık derecelendirebilmek üzere güvenilir bir analiz yöntemi gerekmektedir. Nitekim standart üssel sönümlene eğrisi üzerinden elde edilen T20, T30 ve T60 metrikleri artık çoklu sönümlene eğrilerinde geçerliliğini kaybetmektedir. Bu çalışmada çoklu sönümlene 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 [16]. 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.

$$H_s(A, T, t_i) = A_0(t_K - t_i) + \sum_{j=1}^S A_j \left(e^{\frac{-13.8 \cdot t_i}{T_j}} - e^{\frac{-13.8 \cdot t_K}{T_j}} \right), \quad (1)$$

Denklem (1)’de indeks $0 \leq i \leq K - 1$ aralığında değişir. Sönümleme parametreleri A_j : $A_1, A_2, A_3 \dots$ lineer genlik parametreleridir ve her bir ayrı üssel sönümleme teriminin logaritmik ifadesinde katkı düzeyini belirtir. T_j logaritmik sönümleme eğrilerinde, $j = 1, 2, \dots, S$ 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, altındis K ise toplam data noktasını ifade eder [16]. Bu çözümlemeyle toplam eğim sayısı, her bir eğimin sönümleme süresi ve sönümleme düzeyleri elde edilebilir.

3.2.2 Difüzyon denklemi modeli

Çoklu sönümleme eğrilerinin gözlemlendiği yapılarda bir sonraki analiz aşaması bu oluşumu bilimsel bir tabanda anlamlandırabilmek üzere sebeplerini araştırmaktır. Ses enerjisinin birden fazla hacim arasında veya tek bir hacim içerisindeki farklı alanlar üzerinde akışını gözlemleyebilmek üzere yararlanılan ve kuramsal çalışmalarda özetlenen difüzyon denkleminin algoritmaları bu başlıkta sunulmaktadır. 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 [15];

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

Denklem (2)’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;

$$D = \frac{\lambda c}{3} = \frac{4Vc}{3S}, \quad (3)$$

Denklem (3)’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 kaynağında darbe sesi olarak aşağıdaki şekilde modellenir;

$$q(r_s, t) = E_0 \delta(r - r_s) \delta(t - t_0), \quad (4)$$

Denklem (4)’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 içi denklemlerden sonraki önemli bir diğer konu sınır koşulların tanımlanmasıdır. Sınır koşullarda enerji alışverişini dikkate alan hacmi çevreleyen yüzeylerin denklemi aşağıdaki gibidir;

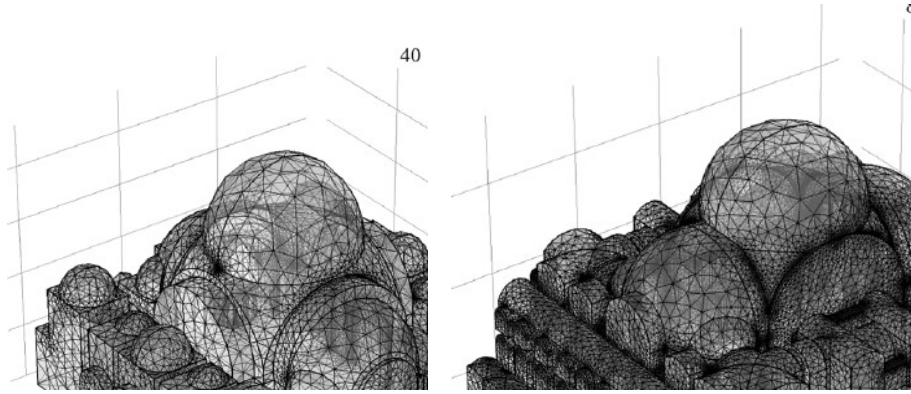
$$I(r, t) \cdot \mathbf{n} = -D \nabla w(r, t) \cdot \mathbf{n} = A_X c w(r, t), \text{ on } S, \quad (5)$$

Denklem (5)'te $I(r, t)$ 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 (6)'da sunulan modifiyeli-karma sınır modeli [17] dağınık ses alanları için geçerli olmakla beraber belirli yüzeyleri diğer alanlara göre kıyasla daha yutucu, dağınık olmayan ses alanlarına sahip hacimlerde de kullanılabilir. Denklem (5) ve (6)'nın birleştirilmesiyle elde edilen sonuç sınır model denklemi, denklem (7) olarak sunulmaktadır.

$$A_X = \frac{\alpha}{2(2 - \alpha)} \quad (6)$$

$$-D \frac{\partial w(r, t)}{\partial n} = \frac{c\alpha}{2(2 - \alpha)} w(r, t), \text{ on } S. \quad (7)$$

Yukarıda tanımlanan hacim içi ve sınır denklemlerinin sonlu elemanlarda zamana bağlı sayısal çözümleri üretilen akustik modeller üzerinde işlenir. Katı modellerin işlem öncesi örgülenmesi ve her bir örgünün en büyük boyutunun hacmin ortalama-serbest-patika (MFP) uzunluğundan küçük olması gerekliliği tüm frekanslar için gereken tek koşuldur. Bir sonraki başlıkta sunulan bulguların bir bölümünde yararlanılan örnek yapıların örgülenmiş-modelleri Şekil 5'te sunulmaktadır.

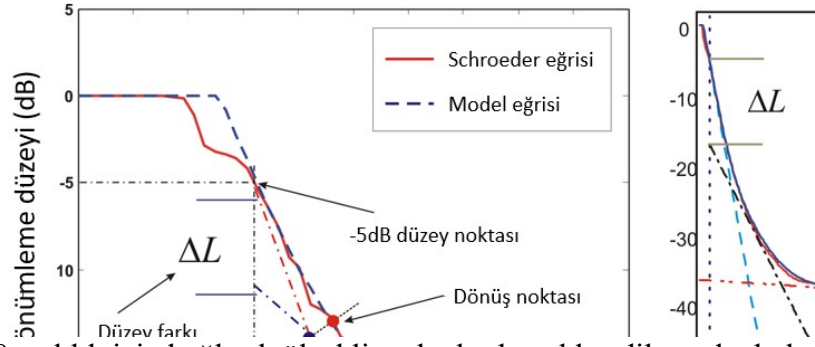


Şekil 5. Süleymaniye Camii (solda) ve Ayasofya Müzesi (sağda) örgülenmiş katı modelleri

4. ÖRNEK BULGULAR

Bu bölümde önceki başlıklarda anlatılan ölçekli model ve saha ölçümleri ile akustik modelleri uyumlanmış gerçek yapılar üzerine yürütülen analizlerden bazı örnekler sunulmaktadır. Şekil 6'da ölçekli bağlaşıklık model/maketten elde edilmiş tipik bir çift eğimli enerji sönümlleme eğrisi gösterilmektedir [14]. Bayesian kestirim yöntemi ile 1. ve 2. Sönümlleme eğrileri hesaplanmış bunların kesiştiği noktanın düşeyde denk geldiği düzey iki eğim arasındaki düzey farkı (ΔL) olarak ifade edilmiştir. Düzey farkı ne kadar yüksekse akustik bağlaşıklık o kadar güçlüdür. Diğer bir değişle erken ve geç çınlamalar (sönümlleme oranları) daha fark edilir hale gelir. Tablo 1'de, Şekil 6'da grafiği verilen örnek oda darbe yanıtı için sönümlleme parametreleri aynı noktada farklı oktav bantlarda sunulmaktadır. T_1 ve T_2 daha önce açıklandığı üzere her bir eğimden elde edilen sönümlleme süreleridir. Çoklu sönümlleme eğrileri aynı noktada her oktav bantta gözlenmeyebilir. Bu ise olgunun frekansa bağlı değişebileceğini gösterir. Şekil 7'de ise Bayesian kestirim yöntemi ile pek çok noktada iki hatta üç eğimin gözlemlendiği Süleymaniye Camii'nde [1-2] bu durumu açıklayabilmek üzere geliştirilen difüzyon denklem çözümü (DEM) sunulmaktadır [18]. Hacimsel enerji dağılımı ve akış vektörlerinden kubbede biriken sesin daha sonra merkezi ibadet alanına ve yan sahnalara akışı gözlenebilmektedir. DEM'in bir diğer avantajı zamana bağlı enerji akış hareketini takip edebilme olanağı sunmasıdır. Örneğin, Şekil 8'de Ayasofya Müzesi modelinin çözümünde kaynağın kapatılmasını takip eden farklı anlarda vektörlerin hareketi ve

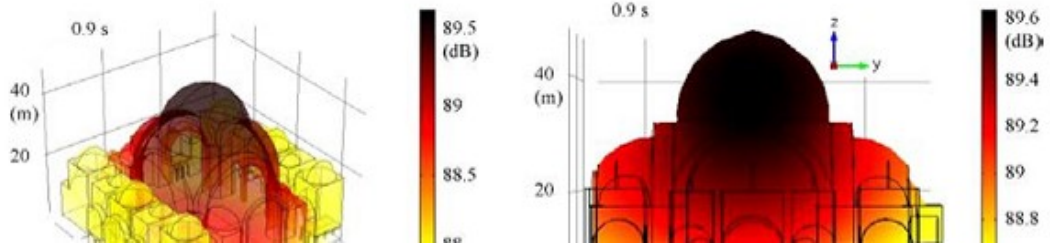
dönüşleri izlenebilir. Ses akış vektörlerinde aynı konumda tam bir dönüş iki eğimin kesiştiği anı ifade etmektedir [19].



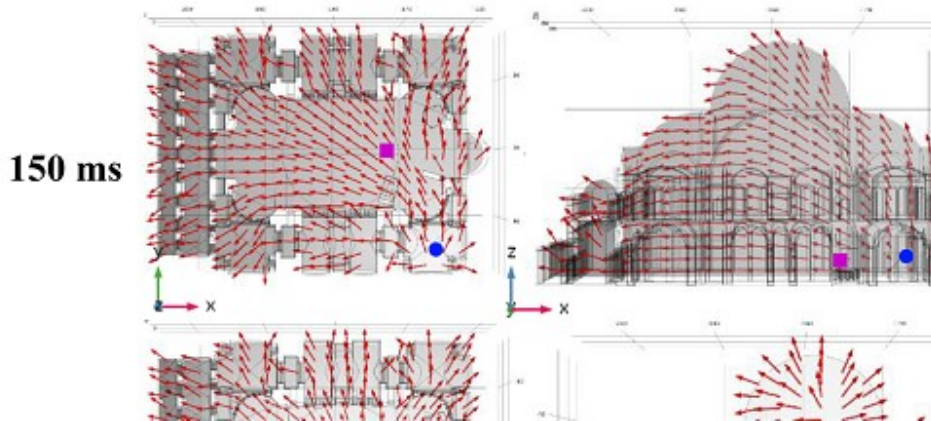
Şekil 6. %20 açıklık için bağlaşıklık ölçekli maketlerden elde edilen oda darbe yanıtının iki eğimli Schroeder eğrisi ve model çözümü

Tablo 1. %20 açıklık için bağlaşıklık ölçekli modelden elde edilen örnek bir konumda frekansa göre sönümlenme metriklerinin dağılımı

Kare Açıklık: 20% – Pozisyon A2						
(Hz)	T1 (s)	T2 (s)	Std1	Std2	ΔL (dB)	Eğim
125	0.28	-	3.18 E-3	-	-	Tek
250	0.23	0.76	2.89 E-3	5.78 E-2	7.74	Çift
500	0.24	0.87	1.73 E-3	4.03 E-2	8.69	Çift
1000	0.54	-	1.14 E-3	-	-	Tek
2000	0.26	0.54	2.56 E-3	5.21 E-2	7.74	Çift



Şekil 7. Süleymaniye Camii, difüzyon denklemi model çözümü, 1 kHz, 0.9 s



Şekil 8. Ayasofya Müzesi difüzyon denklemi model çözümü, 1 kHz, 150 ve 900 ms, kaynak (mavi ile gösterilmiş), alıcı (magenta ile gösterilmiş)

5. SONUÇ

Bu çalışmada bağlaşıklık alan modelleri ve çoklu ses sönümlleme eğrileri analiz yöntemleri sunulmuştur. Örnek olarak ele alınan iki anıtsal yapıda çoklu sönümlleme eğrileri tespit edilmiş ve bu oluşumun sebeplerini araştırmak üzere difüzyon denklemi çözümlemesi ile akış vektörleri incelenmiştir. Süleymaniye Camii'nde ana hacmi yan sahnınlardan ayıran kemerlerin boyutları Ayasofya Müzesi ve katedraller gibi diğer benzer yapılarıdaki açıklık boyutlarına kıyasla oldukça büyüktür. Süleymaniye Camii bu sebeple tek hacimli sistemlere daha yakın bir geometrik konfigürasyona sahip olmasına rağmen çoklu sönümlleme eğrilerinin gözlenmesi yansıtıcı üst yapı ile halı ile kaplı yutucu zemininin sebep olduğu dağınık olmayan ses alanından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Zamana dayalı difüzyon denklemi çözümlemesinde akış vektörleri, ses enerjisinin kubbede birikip daha sonra zemini geri beslediğini göstermektedir. Diğer bir değışle bu yapıda geç enerji yan sahnınlardan değıl kubbeden gelmektedir. Nitekim, aynı modelde halı kaplaması mermer ile değıştirildiğinde çoklu sönümlleme eğrileri gözlenmemiştir.

Ayasofya Müzesi'nde yan sahnınlardan ve üst balkonun merkezi hacimden ayrımı fiziksel olarak daha kesin, kemer boyutları Süleymaniye Camii'ne oranla daha küçüktür. Bu yapıda çoklu sönümlleme eğrileri daha çok ve daha güçlü olarak kaynakla alıcıların birlikte yan sahnınlarda konumlandığı koşulda gözlenmiştir. Bu tipik bir bağlaşıklık hacim konfigürasyonudur ve enerji akış vektörlerinden de izlenebileceğı gibi yan sahnın içerisindeki ilk sönümllemeyi takip eden belirli bir zaman dilimi sonrası merkezi hacimden gelen gecikmeli ses enerjisi ikinci ve hatta üçüncü sönümlleme eğrilerine sebebiyet vermektedir. İki eğrinin kesiştiğı noktada enerji akış vektörlerinde tam bir dönüş gerçekleşmektedir. Enerji akışlarındaki bu dönüşler kaynağın ve alıcının birlikte merkezi hacimde konumlandığı koşulda daha az ve zayıf olarak gözlenmiştir. Tümöyle yansıtıcı yüzeylere sahip Ayasofya Müzesi merkezi hacminde ses alanı dağınık ve herhangi bir fiziksel bölüntöye sahip olmadığı için Süleymaniye Camii merkezi hacmi gibi çoklu sönümlleme eğrileri ile sonuçlanan bağlaşıklık bir ses alanı oluşturmamaktadır.

Özetle, hala üzerine bilimsel araştırmaların devam ettiğı bağlaşıklık alanların çıktısı olarak çoklu sönümlleme eğrilerinin sebep ve sonuçları, ancak bilimsel veri toplama ve analiz yöntemleri ile anlaşılabilir. Ancak bu sayede bağlaşıklık hacimler gerçek uygulamalara doğru bir tasarım aracı olarak entegre edilebilir. Son olarak belirtilmelidir ki, nicel/objektif metriklere destek olarak akustik bağlaşıklığın öznel (sübjektif) etkileri üzerine araştırmaların artırılması bu alanda önemli bir gereksinimdir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Sü Gül, Z., Xiang, N., Çalışkan, M. Investigations on Sound Energy Decays and Flows in a Monumental Mosque. J. Acoust. Soc. Am. 140.1, pp.344-355, 2016.
- [2] Sü Gül, Z., Çalışkan, M., Tavukçuoğlu, A., Xiang, N. Assessment of Acoustical Indicators in Multi-Domed Historic Structures by Non-exponential Energy Decay Analysis. Acoust. Australia 46, pp. 181-192, 2018.
- [3] Cremer, L., Muller, H.A., Schultz, T.J. "Principles and Applications of Room Acoustics" Vol.1, pp.189-292, (Applied Science, NY, 1982).
- [4] Sü Gül, Z., Çalışkan, M. Acoustical Considerations in the Design of Heydar Aliyev Center Auditorium." ISRA 2010, Melbourne, Avustralya, 29-31 Ağustos 2010.
- [5] Martellotta, F. Identifying Acoustical Coupling by Measurements and Prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome. J. Acoust. Soc. Am. 126.3, pp.1175-1186, 2009.
- [6] Sü Gül, Z. Acoustical Impact of Architectonics and Material Features in the Lifespan of Two Monumental Sacred Structures. Acoustics 1, pp. 493-516, 2019.
- [7] Davis, A.H. Reverberation Equations for Two Adjacent Rooms Connected by an

- Incompletely Sound-proof Partition. *Phil. Mag.* 50, pp. 75-80, 1925.
- [8] Eyring, C.F. Reverberation Time Measurements in Coupled Rooms. *J. Acoust. Soc. Am.* 3, pp.181-206, 1931.
 - [9] Harris, C.M., Feshbach, H. On the Acoustics of Coupled Rooms,” *J. Acoust. Soc. Am.* 22.5, pp. 572-578, 1950.
 - [10] Lyle, C.D. Recommendations for Estimating Reverberation Times in Coupled Spaces. *Acoustics Letters* 5.2, pp.35-38, 1981.
 - [11] Thompson, C. On the Acoustics of a Coupled Space,” *J. Acoust. Soc. Am.* 75.3, pp. 707-714, 1984.
 - [12] Nijs, L., Jansens, G., Vermeir, G., Voorden, M.V. Absorbing Surfaces in Ray-tracing Programs for Coupled Spaces. *Appl. Acoust.* 63, pp. 611-626, 2002.
 - [13] J. E. Summers, R. R. Torres and Y. Shimuzu, “Adapting a randomized beam-axis-tracing algorithm to modeling of coupled rooms via late-part ray tracing,” *J. Acoust. Soc. Am.* 118, 1491-1502 (2005).
 - [14] Sü, Z. Systematic Investigations on Energy Decays in Acoustically Coupled Spaces using Scale-model Technique. MSc Tezi, Rensselaer Polytechnic Institute (RPI), NY, 2006.
 - [15] Valeau, V., Picaud, J., Hodgson, M. On the Use of a Diffusion Equation for Room-Acoustic Prediction,” *J. Acoust. Soc. Am.* 119, pp. 1504-1513, 2006.
 - [16] Xiang, N., Goggans, P.M., Jasa, T., Robinson, P. Bayesian Characterization of Multiple-Slope Sound Energy Decays in Coupled-volume Systems,” *J. Acoust. Soc. Am.* 129, pp. 741-752, 2011.
 - [17] Jing, Y., Xiang, N. On Boundary Conditions for the Diffusion Equation in Room Acoustic Prediction: Theory, Simulations, and Experiments,” *J. Acoust. Soc. Am.* 123, pp. 145-153, 2008.
 - [18] Sü Gül, Z., Xiang, N., Çalışkan, M. Diffusion Equation based Finite Element Modeling of a Monumental Worship Space. *J. Comput. Acoust.* 25.4, pp. 1-16, 2017.
 - [19] Sü Gül, Z., Odabaş E., Xiang N., Çalışkan M. Diffusion Equation Modeling for Sound Energy Flow Analysis in Multi Domain Structures. *J. Acoust. Soc. Am.* 145.4, pp. 2703-2717, 2019.