



# MİMARİ TASARIMDA AKUSTİK MODELLEME UYGULAMALARI VE ÖRNEK İNCELEMELER

*Acoustic Modeling In Architectural Design And Case Studies*

**Ezgi TÜRK GÜRKAN**

## ÖZET

Kapalı ortamlarda, mekânın işlevlerine uygun akustik koşulların sağlanması, o mekânlardaki etkinliklerin sağlıklı bir şekilde icra edilmesi ve kullanıcı konforunun elde edilmesi açısından son derece önem taşır. Hacim akustiği ihtiyaçlarının endüstriyel ve mimari tasarım sürecinde dikkate alınması akustik konfor gereksinimlerinin ekonomik yollarla kazanılması anlamına gelmektedir. Günümüzde kullanımı giderek yaygınlaşan bilgisayar destekli modelleme yöntemleri, dijital ortamda gerçekleştirilen akustik hesaplamaları oldukça kolaylaştırmıştır. Oluşturulan geometrik mekân modelleri içinde tanımlanan kaynak ve alıcı noktaları arasındaki ilişkiler yardımıyla salona ait akustik yanıt eğrileri elde edilir. Bu çalışma kapsamında, tasarım ve uygulamacılar ile kullanım avantajlarını paylaşmak amacıyla, hacim akustiği modelleme yazılımlarının tasarım ve projelendirme aşamalarında sürece nasıl dahil edildiği örneklerle açıklanmaktadır. Yazılımla elde edilen hacim akustiği parametreleri ile yazılım kullanımının tasarıma nasıl yansıdığı hakkında bilgi verilmektedir. Yazılımın saha uygulamalarına yönelik kullanım örnekleri ile bir örnek özelinde uygulama sonrası ulaşılan sonuçlar kıyaslamalar yapılarak paylaşılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Mimari akustiği, Akustik simülasyon, Akustik modelleme, Akustik tasarım.

## ABSTRACT

Providing suitable acoustic conditions based on the functionality of the space is necessary to perform activities in the right way and to achieve the acoustic comfort for the audience. Incorporation of acoustical requirements into the design process in industrial and architectural design, means the acquisition of acoustic comfort requirements in an economic way. Computer modeling methods which are commonly used nowadays, can also be described as acoustic calculations in digital environment. Impulse responses of the halls are obtained by defining the source and receiver points in the geometric spatial models. Within the scope of the present study, how the room acoustics modeling softwares are utilized in the process of design and project phases will be explained to share the advantages with designers and constructors. Information about room acoustics parameters and how software use is reflected in design will be described and case studies for site applications and post-implementation comparisons will be presented.

**Key Words:** Architectural acoustics; Acoustic simulation, Acoustic modeling, Acoustic design.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde sıkça kullanılan akustik modelleme programlarında yapılan hesaplamalar kolaylıkla yenilenebildiğinden salonların farklı kullanım koşulları için akustik yanıt eğrileri hızlıca elde edilebilir.

Bu da, tasarım aşamasında tasarımcıya zaman kazandırmakta, projelendirme sürecini hızlandırarak hedef kriterlerin optimizasyonu sürecini kısaltmaktadır.

Malzemelerin ses yutma ve dağıtma özelliklerini dikkate alan algoritmalara sahip modelleme yazılımlarında elde edilen hesaplama sonuçlarının, ölçümlerde elde edilen hacim akustiği parametre değerleri ile büyük ölçüde örtüştüğü bilinmektedir [1]. Literatürde bu konuda yapılmış çok sayıda yayına ulaşılabilir.

Çalışma kapsamında, akustik modellemenin gelişimi paylaşılmış ve dijital modelleme yazılımlarının kullanımında, tasarımcının yazılıma verdiği bilgiler ve bu bilgilere karşılık yazılımın tasarımcıya sundukları kolaylıklardan bahsedilmiştir.

İki proje örnek olarak alınarak modelleme çalışmasında kullanılan yöntemler ve bir modelleme örneği için uygulama sonrası kıyaslamalar paylaşılmaktadır.

## 2. AKUSTİK MODELLEMENİN GELİŞİMİ

Kapalı hacimlerin akustik tasarımları aşamasında yararlanılan yöntemlerden biri olan akustik modelleme, fiziksel ya da dijital olarak oluşturulabilir. Fiziksel modellerde yapılan ölçümler ile dijital modellerde (simülasyonlarda) yapılan hesaplamalar tasarlanan salonların akustik karakteri hakkında gerekli bilgileri verir. Bir binanın tasarım aşamasında pek çok önemli akustik özelliğin hatasız olarak hesaplanmış olamayacağı açıktır. Deneysel yöntemler basit, küçük yapılar için kullanılabilir olsa da büyük ve önemli oditoryumlar ve alışılmadık formlar için yapıyı inşa etmeden önce akustik sorunların tanımlanması için bir model oluşturulması tercih edilmelidir [2].

Büyük salonların akustik tasarımında uzun süre kullanılmış yöntemlerden biri, tasarımı üzerinde çalışılan salonların, fiziksel modellerinin yani maketlerinin yapılması ve sesin yayılmasının bu maketler üzerinde irdelenmesidir. Maketler üzerinde duvar malzemelerinden hacim boyutlarına kadar değişiklikler yapılabilir olması bu yöntemin büyük bir avantajıdır.

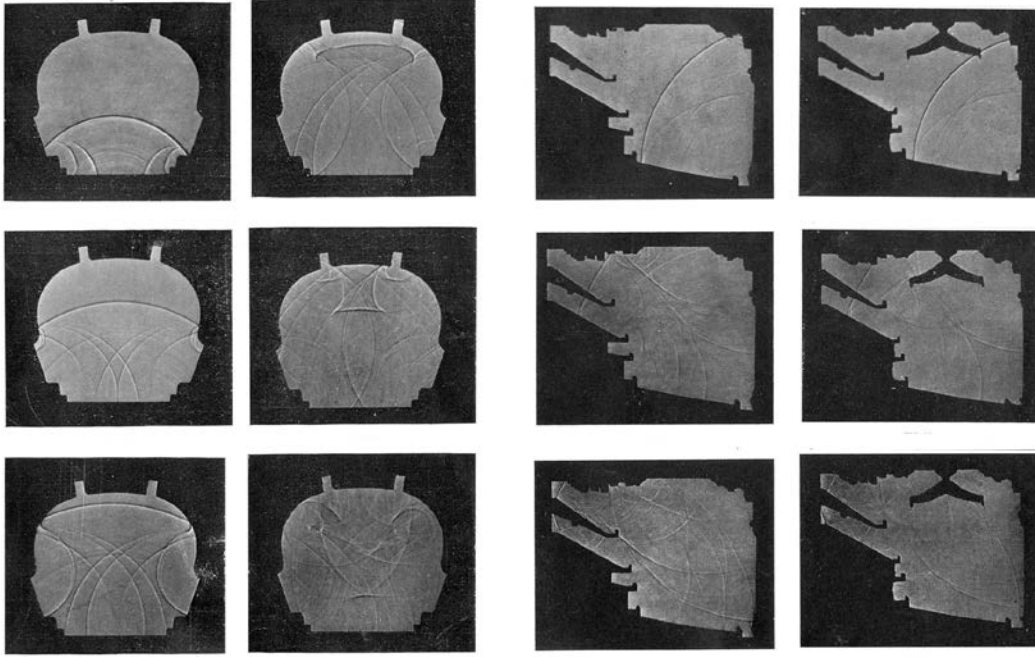
Bu çalışma yönteminde, yayılan bütün fiziksel dalgaların birkaç ortak özelliği sebebiyle, model ölçümlerinde sadece ses dalgaları kullanmak gerekli bulunmamıştır.

Geçmişte bir salonun planının veya kesitinin yerleştirilebildiği düz, su dolu bir tekneden oluşan iki boyutlu bir dalga tablosu kullanmak basit bir yöntem olarak kullanılmıştır. Gözlem için ışığın da kullanıldığı bu sistemde, yüzey yansımaları incelenmiştir. Bu teknik uzun dalga boylu seslerle sınırlıdır [3].

30'lu yıllarda, ses yerine ışık kullanılması daha uygun bir yöntem olarak görülmüştür [4]. Işığın dalga boyları bütün hacim boyutlarıyla karşılaştırıldığında çok küçük kaldıklarından, yüksek frekanslara daha uygun düşmektedir. Bu tür çalışmalarda, ses yansıtıcı yüzeyler için cilalı metal sac yapraklar kullanıldığı gibi, ses yutucu yüzeyler ise siyaha boyanır ya da siyah kağıt veya kumaşla kaplanır. Buna benzer olarak, ses dağıtıcı yansıtıcı yüzeyler beyaz mat kağıtla olabildiğince iyi simüle edilir. Modellenen salonlarda enerji dağılımı, fotoseller ya da buzlu cam kullanılarak ve fotoğraflanarak saptanabilir.

Sabine, çalışmalarında ışığı kullanmıştır. Yansıma alanlarını belirlemek için yüzeylere ışık göndererek yansıma alanlarını tanımlayabilmiştir. Sonraki çalışmalarında dalga yayılımını inceleyebilmek için çizgisel ışın fotoğrafçılığı tekniğini kullanan Sabine, birçok tiyatro için yansıma şemaları hazırlamıştır [5]. New York'taki New Theater için yaptığı çalışmalara ait yansıma analizleri Şekil 1'de görülebilir.

Sabine'in yöntemi zamanla farklı araştırmacılarca geliştirilmiştir. Akustik incelemeleri ışık kullanılarak gerçekleştirilmeye devam etmiştir. Bu yöntemde küçük lambalar kullanılmıştır. Bu küçük lambalar, modellerde ses kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Işığın kullanıldığı modellemeler, erken yansıma analizine yönelik bir çalışma yöntemidir [3].



**Şekil 1.** Çizgisel ışın fotoğrafçılığı tekniğiyle elde edilen yansıma analizi (Sabine) [5], [6]

Bu optik model ölçümü, bir hacimdeki durağan enerji dağılım bilgilerini elde edebilmek için oldukça yararlıdır. Bununla birlikte bu optik ölçümler, belli bölgeler için gerekli olan yansılardan sorumlu duvar ve tavan oranlarının doğruluğunu belirleyebilir ve dinleyiciye ulaşan enerji oranlarının varış zamanları ve bununla birlikte gecikme süreleri hakkında bir fikir verir nitelikte değildir. Bundan dolayı hacmin tüm durağan davranışlarından daha önemli olan hacim akustiği ile ilgili sorular optik model ölçümleriyle cevaplanamaz. Bu modeller 1:50 ya da 1:100 gibi büyük ölçekli olabilir. Ses üreten ve kayıt eden sistemlerin boyutlarının küçülmesi, frekans değiştiricilerin gelişmesi gibi nedenlerden ötürü bu yöntemin günümüzde kullanımının kalmadığı söylenebilir.

Maketlerde incelemeler yapmak da kullanılmış yöntemlerden bir tanesidir. Hızlandırılmış konuşma kayıtları ölçeklendirilmiş ses kaynaklarından yayınlanmış ve küçük mikrofonlarca toplanmış, orijinal frekans aralığına çevrilerek incelenebilmiştir. Maketlerde, kıvılcım (çakım) jeneratörü kullanılarak incelemeler yapılmıştır. Bu tür maketlerde ses yutucu ve yansıtıcı malzemeler de ayrıca ölçeklendirilmelidir.

Maketlerde, ilgili ses sinyali doğrultuluğu ve frekans aralığında, normal duyma aralığında yayın yapan küçültülmüş kaynaklar kullanılır. Kaydedilmiş ses sinyalleri, salonun akustiğini ve üzerinde çalışılan varyasyonların etkilerini öznel olarak değerlendirebilecek dinleyicilere aktarılır. Bu yöntemin pratik hale getirilmesi [7] yakın geçmişte oldukça zor olmuşsa da günümüzde teknik zorluklar aşılmıştır. Öte yandan yüksek maliyetler nedeniyle yöntem ancak çok önemli ve özgün salonların yapımında kullanılmaktadır. Ölçekli modellerin kullanıldığı yöntemin zorlukları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Oluşturulacak maketlerin salonla birebir aynı detaylara sahip olması sağlıklı sonuçlar elde edebilmek açısından son derece önemlidir.
2. Salonda kullanılmış ya da kullanılacak olan malzemelerin boyutları ve montaj biçimleri makette orijinali ile birebir örtüşmelidir.
3. Maketler ince çalışmalar gerektirir. Bu da işçilik değerini ve modelin hazırlanma süresini artırır. Bu yöntem oldukça maliyetlidir.

90'lı yılların başında Heinrich Kuttruff [7] fiziksel modellerin yani maketlerin büyük salonların akustik tasarımı için çok yararlı bir araç olduğu kanıtlanmış olmasına rağmen, onların yerini yavaş yavaş daha ucuz, daha hızlı ve daha verimli olan dijital modelleme yöntemi almakta olduğunu belirtmiştir. Günümüzde kullanımı giderek yaygınlaşan bilgisayar ortamında modelleme yöntemi, dijital ortamda

gerçekleştirilen akustik hesaplamalar olarak da nitelendirilebilir. Oluşturulan geometrik salon modeli içinde tanımlanan kaynak ve alıcı noktaları ile salona ait akustik yanıt eğrisi elde edilir. Dijital akustik modelleme programları hızlı sonuçlar verir ve maketlere oranla oldukça ekonomiktir. Hesaplamanın kolaylıkla yinelenmesi sayesinde salonların değişik koşulları için yanıt eğrisi elde edilebilir.

Günümüzde kullanılan dijital akustik modelleme programları üç farklı yöntem ile çalışırlar. Bunlar; Işın İzleme Yöntemi (Ray Tracing Method), Görüntü Kaynak Yöntemi (Image Source Method) ve Hibrid Yöntemi (Hybrid Method)'dir. Işın izleme metodunun temel algoritması, ses kaynağından yayılan ve modeldeki yüzeylerden yansıyan ışınları takip ederek hangi dinleyici bölgesine ulaştığını belirlemek üzerinedir. Kaynaktan çıkan ses ışınları ya önceden tanımlanmış olarak ya da rastgele yayılır [9]. Kaynak noktasından çeşitli yönlerde yayılan çok sayıda parçacık kullanılır. Dağılan bu parçacıklar her yansımada, hacimdeki yüzeylerin yutma çarpanına göre enerji kaybeder. Bu yöntemde her durumda yanlış yansımalar veya ortaya konmayan yansımaların varlığı bir risk oluşturur.

Hacim akustiği modellerinde ışın izleme metodunun geliştirilmesi yaklaşık otuz yıl önce başlamıştır ancak ilk modeller özellikle yansıma dağılımlarının görsel denetimi amacıyla oluşturulmuştur. Görüntü kaynak yöntemi, ses kaynağının yansıtıcı yüzeyinin düzleminde ayna kullanılarak yansıtılması ilkesine dayanır. Kaynaktan yayılan ve modeldeki yüzeylerce yansıtılan ışınlar yerine oluşturulan görüntü kaynaktan dolaysız olarak yayılan ışınlar kullanılır. Bu yöntemin daha hassas olması bir avantajdır; ancak hacim basit bir geometriye sahip değilse sorunlar oluşabilir [8]. Değinen her iki yöntem de ışın tabanlı yöntemlerdir. İki klasik yöntemin dezavantajlarının olması, bu yöntemlerin iyi özelliklerini birleştiren hibrid yönteminin gelişmesine yol açmıştır. Hibrid yöntemi ise ışın tabanlı bu yöntemlerin birlikte kullanıldığı birleşik bir yöntemdir [9]. Buna göre salon içindeki bir kaynaktan gönderilen ışınların karşılaştıkları yüzeylere göre oluşan görüntü kaynakları, salona enerji gönderir.

Erken yansımalar görüntü kaynak yöntemi ile, geç yansımalar ise ışın izleme yöntemi ile tanımlanmıştır. Yazılım yansımaların erken ya da geç yansıma olduklarını belirler ve ön tanımlı yöntemi uygular. Günümüzde bu yöntemler ile çalışan ve sıklıkla kullanılan dijital akustik modelleme yazılımlarından bazıları; CATT, EASE ve ODEON'dur.

### 3. DİJİTAL AKUSTİK MODELLEME AŞAMALARI VE PROJELENDİRME

Dijital akustik modellemelere, ilgilenilen mekânın üç boyutlu kapalı modelinin oluşturulması ile başlanır. Üç boyutlu modelleme yazılımlarından akustik modelleme yazılımlarına veri aktarımı yapılırken, model ölçeklerinin örtüşmesi doğru hesaplama açısından bir gerekliliktir. Akustik modelleme için üç boyutlu kapalı modelde yer alan yüzey malzemelerine akustik özelliklerinin tanımlanması gereklidir. Bu özellikler yüzeylerin ses yutuculuk ve dağıtıcılık özellikleridir.

Oluşturulan üç boyutlu akustik modeller içinde ses kaynaklarının ve alıcı nokta veya yüzeylerinin tanımlanması izlenmesi gereken adımlardan bir diğeridir. Alıcı özelliğine göre belirlenmiş bir noktadaki parametre değerleri okunabilmekte, ya da ilgilenilen hacim akustiği parametre değerinin hacim içerisindeki dağılımı görülebilmektedir.

Akustik modellemeler ile hacimdeki nesnel hacim akustiği parametre değerleri hesaplanabilmekte ve bu verilere ek olarak, ses dalgalarının salon içindeki hareketi ile yansıtıcı yüzeylerin etkili olduğu bölgeler görselleştirilebilmektedir.

Belirli bir noktada tanımlanan alıcı için işitselleştirme çalışmaları yapılabilmektedir. Böylelikle, nesnel hacim akustiği parametre değerlerinin incelenmesinin yanı sıra öznel değerlendirme yapılma imkanı oluşturulmuş olur. Tanımlanabilen farklı ses kaynakları kullanılarak işitselleştirmeler çeşitlendirilebilir. İşitselleştirmelerde kullanılan ham kayıtların kayıt sırasındaki yansımalarından etkilenmemesi gereklidir, kayıtların tam anekoik odalarda yapılması önerilir [10]. Günümüzde yapılan çalışmalarda, gerçek zamanlı (real-time) akustik modellemeler ile mekânda hareket halindeki bir kullanıcı için sanal gerçeklik çıktıları elde edilebilmektedir (visualization) [11]. Akustik tasarımın, fizibilite aşamasından başlayarak tasarımın her aşamasında sürece dahil edilmesi, tasarım optimizasyonunun sağlanması için oldukça önemlidir. Mekân işlev ve özellikleri doğrultusunda akustik modellemelerin tasarım

aşamasında dikkate alınması sürecin hızlı ve ekonomik ilerlemesini beraberinde getirir. Mevcut yapılar için gerçekleştirilen akustik düzenlemeler ekstra maliyetli olmakla birlikte her zaman uygulanabilir değildir.

Tasarım aşamasında akustik modelleme yazılımlarından yararlanılması mekânlar hakkında tasarımcıya fikir verir ve geliştirilmesine olanak sağlar. Projelerde genellikle izlenen akustik tasarım aşamaları aşağıda sıralanmıştır:

1. Mekâna ait ön bilgilerin toplanması
2. Mevcut durumu belirleyen ölçümlerin yapılması
3. Mekân için hedef kriterlerin saptanması
4. Mekânın akustik modellenmesi ve modelin kalibrasyonu
5. Çözüm için gerekli akustik önlemlerin belirlenmesi
6. Bu bilgilerin modele aktarılarak incelenmesi
7. Optimum sonuçlara ulaşana dek gerekli iterasyonların yapılması
8. Sonuçların projeye dönüştürülmesi
9. Proje uygulaması
10. Uygulama sonrası ölçümlerin yapılması

#### 4. ÖRNEK AKUSTİK MODELLEME ÇALIŞMASI İNCELEMELERİ

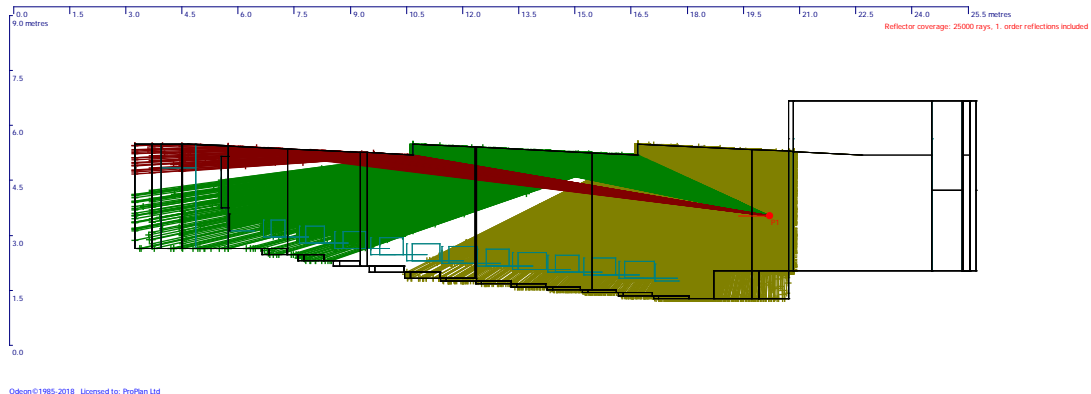
Çalışma kapsamında iki proje için yapılan akustik modelleme çalışmaları paylaşılmaktadır. Açıklanan iki örnekten birinin uygulaması tamamlandığından, yalnızca bu proje için uygulama sonrası ölçümler ile kıyaslamalar aktarılmıştır.

Modellemelerde ODEON yazılımı kullanılmıştır. Trijenerasyon sistemi projesi için ODEON yazılımının yanı sıra Predictor gürültü haritalama yazılımı kullanılarak çevresel gürültü analizleri yapılmıştır.

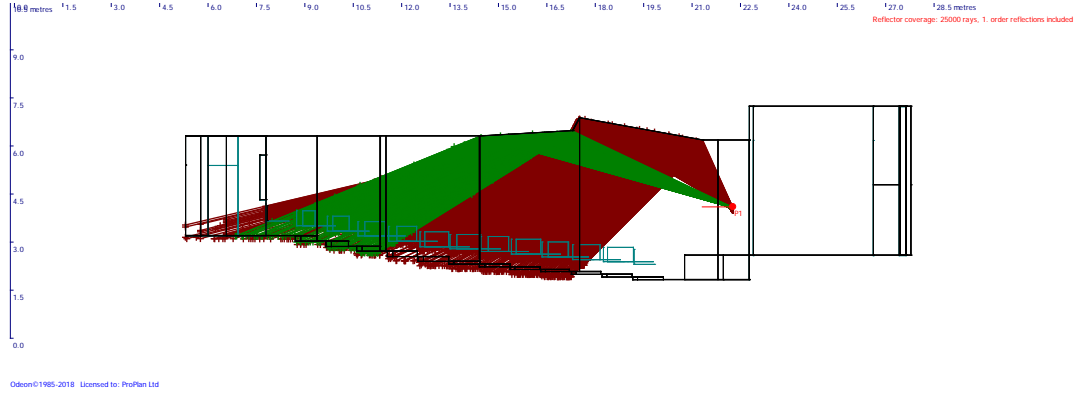
##### 4.1. Bir Meslek Lisesi Konferans Salonu Hacim Akustiği Modelleme Örneği

Avan proje aşamasında bir konferans salonu projesi için yapılan modelleme çalışmaları projelendirme sürecini paylaşmak için açıklanmıştır.

Konferans salonu için avan projede tanımlanan tavan ve duvar yüzeylerinin yararlı yansımaya sağladığı alanların incelenmesi ile modelleme çalışmaları başlatılmıştır. Tanımlanan proje için yansıtıcı yüzeylerin etkili olduğu bölgeler görselleştirilerek form revizyonları geliştirilmiştir. Yapılan form revizyonları ile dinleyici alanının tamamına doğru ve yararlı yansımaya sağlayacak yansıtıcı paneller tasarlanmış ve tavanda ses yutucu olarak kullanılacak bölümler belirlenmiştir. Çalışmaya ait görseller Şekil 2 ve Şekil 3'te yer almaktadır.



Şekil 2. Akustik tasarım öncesinde tavan yansıtıcılarının etki alanı görüntüsü



**Şekil 3.** Akustik tasarım sonrasında tavan yansıtıcılarının etki alanı görüntüsü

Mekâna ait form çalışmaları, proje mimarı ile karşılıklı görüşmeler ile belirlendikten sonra, konuşma amaçlı kullanılacak konferans salonu için belirlenen hedef akustik kriterler uyarınca malzeme seçimleri yapılmıştır. Malzeme seçimleri yapılırken kullanılabilir malzemelerin ses yutuculuk ve dağıtıcılık özellikleri dikkate alınmaktadır.

Yankılanım süresi (RT) bir hacimdeki sesin 60dB azalması için gerekli olan süre olarak tanımlanır. Bu, ses gücünün milyonda birine ya da ses gücü düzeyinin binde birine düşmesine karşılık gelir [12]. Yankılanım süresi, kapalı mekânların akustik karakterinin oluşmasında en başta gelen hacim akustiği parametresi olarak kabul edilmektedir. Ayırt edilebilirlik ( $D_{50}$ ) kaynak açıldıktan sonraki 0–50ms ile 0– $\infty$ ms zaman aralıklarında dinleyiciye ulaşan toplam ses enerjileri arasındaki orandır. Konuşmanın anlaşılabilirliğini ifade eden akustik değişkenlerden biri olan ayırt edilebilirlik, zamana bağlı lineer bir sistem olarak öngörülen hacmin yanıt eğrisine bağlı olarak da hesaplanabilir [13].

Konferans salonu için yankılanım süresi ve ayırt edilebilirlik hedef kriterleri belirlenmiş ve akustik tasarımda bu kriterler dikkate alınmıştır. Salon için belirlenen hacim akustiği parametre değerleri Tablo 1’de verilmektedir.

**Tablo 1.** Konferans salonu için hedef hacim akustiği parametre değerleri

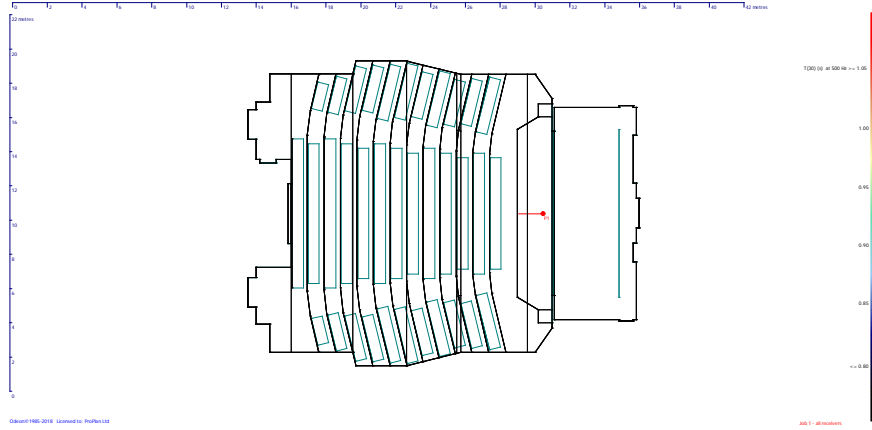
Parametre	Frekans (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
$RT_{max}$ (sn)	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
$RT_{min}$ (sn)	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
$D_{50}$ (500-1000Hz Ort) (%)	> %50					

Konferans salonu için önerilen projenin modelleme hesaplarında elde edilen hacim akustiği parametre değerleri Tablo 2’de görülebilir.

**Tablo 2.** Konferans salonu için önerilen proje için modellenen hacim akustiği parametre değerleri

Parametre	Frekans (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
RT Dolu Salon (sn)	0.77	0.85	0.89	0.92	0.92	0.81
RT Boş Salon (sn)	0.80	0.88	0.93	0.97	0.97	0.86
$D_{50}$ (500-1000Hz Ort) (%)	%63					

Akustik modelleme yazılımlarında, hesaplanan hacim akustiği parametre değerlerinin mekân içindeki dağılımı da görülebilmektedir. Konferans salonuna ait yankılanım süresi (500Hz) dağılımı Şekil 4’te yer almaktadır.



**Şekil 4.** Konferans salonu için önerilen proje için yankılanım süresi dağılımı (500Hz)

Proje uygulama aşamasına geçildiğinde, hacim akustiği modelleme verilerinde tanımlanan malzemelerin kullanılması ve detaylara uygun uygulamanın gerçekleştirilmesi beklenir. Söz konusu proje özelinde, uygulama sırasında kullanılan malzemelerde değişiklikler yapılmıştır. Bu da, hedeflenen değerlerin elde edilmediği anlamına gelmektedir.

Uygulama sonrasında konferans salonunda belirli noktalarda ölçümler yapılmıştır. Uygulanan projeye ait malzemelere ait özellikler hacim akustiği yazılımına aktarılarak hesaplamalar güncellenmiş ve ölçüm sonuçları ile kıyaslanmıştır. Kıyaslamalar, aynı ölçüm noktaları için gerçekleştirilmiştir. Ölçüm ve modellemede elde edilen yankılanım süresi değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Konferans salonu için önerilen proje için modellenen hacim akustiği parametre değerleri

Parametre	Frekans (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
RT Ölçüm (sn)	1.09	1.00	0.99	1.10	1.14	1.06
RT Modelleme (sn)	0.98	1.01	1.05	1.08	1.11	1.03

Tasarlanan proje uygulanmamış olsa da, uygulanan proje için yapılan ölçüm ve modelleme hesaplarında elde edilen yankılanım süresi değerlerinin birbiriyle büyük ölçüde örtüştüğü görülmektedir.

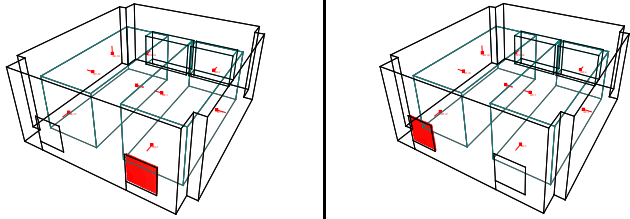
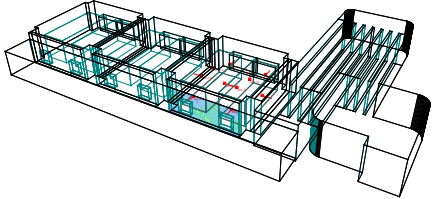
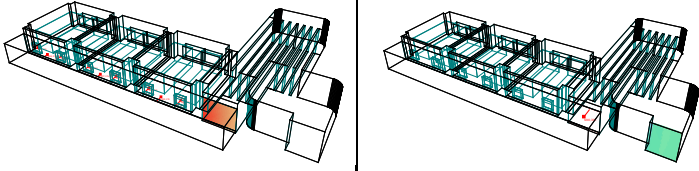
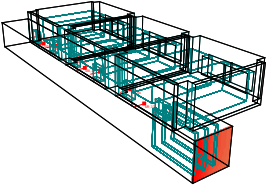
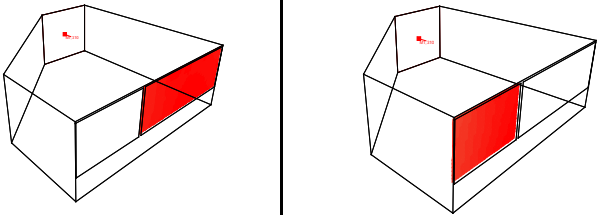
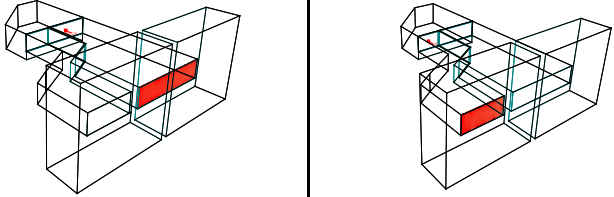
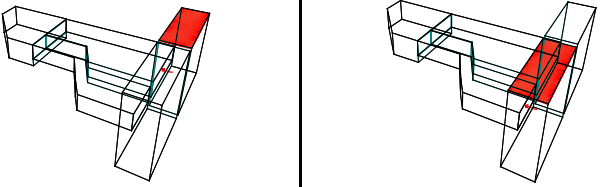
#### 4.2. Bir Alışveriş Merkezinde Trijenerasyon Sistemi Uygulaması için Akustik Modelleme Örneği

Proje için, mevcut yapı içine kurulması planlanan trijenerasyon sisteminin, kurulum sonrası yaratacağı gürültünün kestirimi için hacim akustiği modelleme yazılımının yanı sıra sistemin çevreye yayacağı gürültünün kestirimi için gürültü haritalama yazılımı kullanılmıştır.

Sistem dahilinde kullanılacak 6 adet jeneratörün, ikili gruplar halinde titreşim yalıtımı yapılmış kabinlere yerleştirilmesi planlanmaktadır. Her kabinde, jeneratörlerin hava alışı için ikişer adet fan açıklığı ve hava atışı için ikişer adet kanal açıklığı bulunmaktadır. Buna ek olarak her jeneratörde birer adet egzoz çıkışı bulunmaktadır. Birer ses kaynağı olacak bu açıklıklardan yayılması öngörülen gürültünün kontrolü için bir tasarım yapılmış ve çıkış noktalarındaki ses basınç düzeylerinin yazılım aracılığıyla modellenmesi hedeflenmiştir.

Hava alış yönünde yapılan modellemelere ait görseller, açıklamaları ile birlikte Tablo 4'te paylaşılmaktadır. İlgili görsellerde yüzeylerde farklı renklerle gösterilen bölümler, o alanlar için yapılan ses basınç düzeyi hesaplama sonuçlarını ifade etmektedir. Üzerinde ok olan yüzeyler ise o yüzeyin ses kaynağı olarak tanımlandığını açıklamaktadır. Her modellemede, ses basınç düzeyi hesabı yapılan yüzeyler, bir sonraki modellemede ses kaynağı olarak görülmektedir.

**Tablo 4.** Trijenerasyon sistemi hava alış yönü modelleme çalışmaları

No	Modelleme Aşaması	Açıklama
1		Fan açıklıklarına ait modelleme. Her bir açıklık için ayrı modelleme yapılmıştır.
2		Jeneratörler için tasarlanan kabin duvarına ait ses geçiş kaybı değeri modelleme yazılımına aktarılarak, plenum içine duvardan geçen ses basınç düzeyi hesaplanmıştır.
3		Sisteme ait toplam üç adet kabin için, fan açıklıkları ve duvar yüzeylerinden aktarılan ses gücü düzeyleri hesaplanmış ve bu bölümler ses kaynağı olarak tanımlanmıştır. Plenum giriş noktasında oluşacak ses basınç düzeyleri modellenmiştir.
4		Yapılan modelleme hesapları sonucunda, tasarlanan akustik yutucu kabinin gereğinden fazla gürültü azalması sağladığı görülmüş, optimizasyon amacıyla, tasarlanan bu bölüm kaldırılarak hesaplamalar yeni durum modeli üzerinden tekrarlanmıştır.
5		Plenum ile hava alış kuranglezi arasındaki hava kanalları çıkış bölümü için modellemeler tekrarlanmıştır. Her bir açıklık için ayrı modelleme yapılmıştır.
6		Hava kanalları giriş bölümü için modellemeler tekrarlanmıştır. Her bir açıklık için ayrı modelleme yapılmıştır.
7		Modellemelerin son aşaması olarak, kuranglezlerdeki ses basınç düzeyleri hesaplanmıştır.



Dış çevre ile ilişkide olan gürültü kaynağı noktaları için hesaplamalar, sistemin her adımı için ayrı ayrı yapılmıştır. Modellemelerde her adım için elde edilen ses basınç düzeyleri, kaynak alanına bağlı olarak ses gücü düzeyine çevrilerek, bir sonraki aşama hesaplarında bu yüzeyler ses kaynağı olarak tanımlanmış ve modellemeler yapılmıştır. Modellemeler, her bir jeneratöre ait ses gücü düzeyleri dikkate alınarak başlatılmıştır.

Modelleme için, jeneratörlerin her bir yüzeyine ait ses gücü düzeyleri hesaplanmış ve modellemede bu yüzeyler ses kaynağı olarak tanımlanmıştır. Bu noktadan sonra ses enerjisinin izlediği yoldaki her yüzey için ses basınç düzeyi hesaplanmış, bu değer ses gücüne çevrilerek bir sonraki modellemede ses kaynağı olarak tanımlanmıştır.

Modellemelerde, hava alış ve atış noktalarının yanı sıra; kabin, kanal ve egzoz bacalarından yayılan gürültü de dikkate alınmış, bu yüzeyler her bir ayrı hesap için ses kaynağı olarak kabul edilmiştir. Böylelikle, hava alış ve hava atış yönlerinde, sesin yapı ve sistem elemanları aracılığıyla geçişi de dikkate alınmıştır. Bunun için, ilgili elemanların ses geçiş kaybı değerleri modellemelerde tanımlanmış ve sağlanacak gürültü azalmasına bağlı olarak bir sonraki aşamadaki toplam ses basınç düzeyi değerlerine ulaşılmıştır.

Jeneratör kabinlerinin her biri için, hava alış ve hava atış yönlerinde ses enerjisinin aktarıldığı tüm açıklık ve yüzeyler için modellemeler tekrarlanmış, sonuç duruma süperpoze metodu ile ulaşılmıştır.

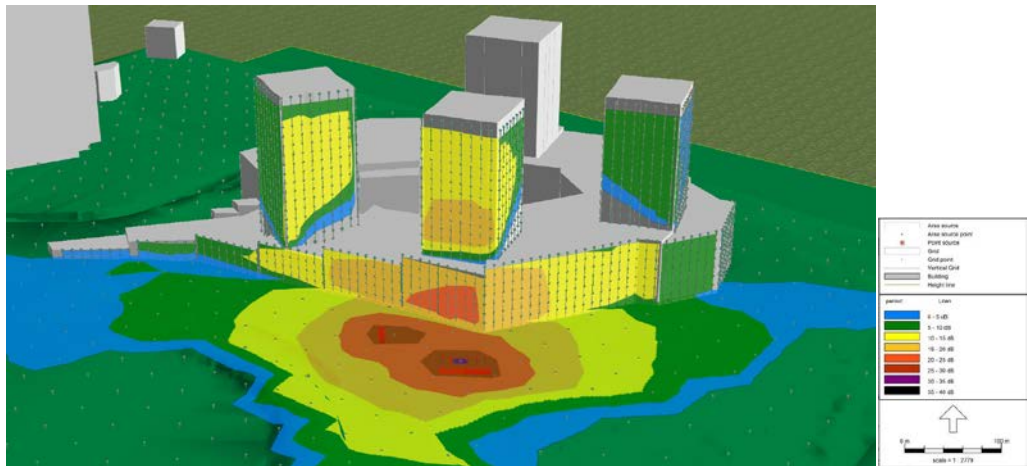
Tablo 4'te modelleme metodu için örnek olarak verilen çalışma, hava atış yönü için de yapılmıştır. Hava atış yönünde, yapı elemanlarından iletilen ses enerjisinin yanı sıra, kanal ve baca gövdelerinden yayılan ses enerjisi için modellemeler yapılmıştır. Egzoz bacalarında kullanılması öngörülen susturucuların etkisi dikkate alınmıştır.

Yapılan modelleme çalışmaları ile trijenerasyon sisteminin dış ortamda gürültü kaynağı oluşturacak üç bileşeni için ses gücü düzeyleri elde edilmiştir. Bunlar; hava alış kuranglezi, hava atış galeri açıklığı ve jeneratör egzoz baca çıkışlarıdır.

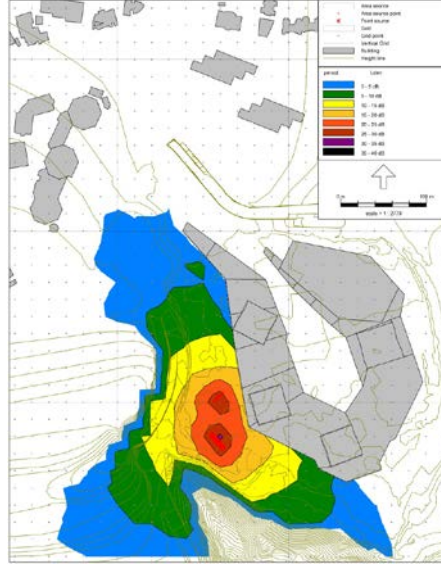
Modellemelerin son aşamasında, hava alış ve atış noktaları ile egzoz atışlarındaki ses basınç düzeyleri hesaplanmış, bu noktadaki ses gücü düzeyleri elde edilmiş ve sistemin çevreye olan etkisi incelenmiştir.

Yapı alanına ait arazi topoğrafyası, çevre bina yükseklikleri ayrı bir gürültü haritalandırma yazılımı ile modellenmiştir. Akustik modelleme yazılımı ile trijenerasyon sistemi için elde edilen ses gücü düzeyleri gürültü haritalama yazılımında tanımlanmış ve sistemin çevreye olan etkisi analiz edilmiştir. Gürültü haritalama yazılımı düşey düzlemde analiz imkanı da sunmaktadır.

Analizlerde elde edilen gürültü dağılımı Şekil 5 ve Şekil 6'da yer almaktadır.



Şekil 5. Sistemin yapı cephelerine olan etki analizi



Şekil 6. Sistemin yakın çevreye olan etki analizi

## SONUÇ

Akustik çalışmalarında modelleme kullanımı, uzun yıllardan bu yana tercih edilmiş ve uygulama öncesinde tasarımcıya öngörü sağlamıştır. Modellemenin yıllar içindeki gelişimi, bilgisayar ortamında kullanımını beraberinde getirmiştir. Yazılım algoritmalarının özellikleri sayesinde hızlı ve kolay tekrarlanabilir modellemeler akustik tasarıma dahil edilebilmiş, konfor koşullarına sahip mekânlara ekonomik yollarla ulaşılmasını sağlamıştır.

Modellemede kullanılacak akustik özelliklerin doğru girdisi, sonuç modelin doğru sonuçlar vermesi açısından son derece önemlidir. Bu nedenle, akredite test laboratuvarlarında akustik özellikleri belgelenmiş malzemelerin tercih edilmesi önerilmektedir.

Uygulama sonrası mekânda yapılan akustik ölçümler ile modellemede hesaplanan hacim akustiği parametre değerlerinin büyük ölçüde örtüştüğü görülmektedir. Bu da yazılımların kullanım avantajını ortaya koymaktadır.

Bildiri kapsamında paylaşılan örnek çalışmalarda modellemede kullanılacak yöntemler ve modellemelerle elde edilebilecek çıktılar paylaşılmıştır. Bilgisayar ortamında modelleme araçlarında elde edilecek çıktılar, diğer yazılım ya da araçlarla da birleştirilerek, farklı analizler elde edilebilir.

Bilgisayar ortamında akustik modellemenin, tasarımcı ve uygulamacılara uygulama öncesinde ilgili mekâna uygun akustik koşulların sağlanacağından emin olunması için fırsat sunar. Bu da doğru tasarımın ekonomik yollarla elde edileceğini göstermektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] RINDEL, J.H., CHRISTENSEN, C.L., KOUTSOURIS, G., “Simulations, Measurements and Auralisations in Architectural Acoustics”, Acoustics 2013 New Delhi, India, November 10-15, 2013.
- [2] LAWRENCE, A., “Architectural Acoustics”, Elsevier Publishing Company Limited, Londra, 1970.
- [3] LONG, M., “Architectural Acoustics”, Elsevier Academic Press., Burlington, 2006.



- [4] RINDEL, J. H., “Modelling in Auditorium Acoustics - From Ripple Tank and Scale Models to Computer Simulations”, Keytone Lecture, Sevilla, 2002.
- [5] SABINE, V. F., “A Visual Imprint of Moving Air: Methods, Models, and Media in Architectural Sound Photography, ca. 1930”, Journal of the Society of Architectural Historians, Vol. 76 No. 3, 2017.
- [6] SABINE, W.C., “Theatre Acoustics,” American Architect 104, no. 1984, 1913.
- [7] KUTTRUFF, H., “Room Acoustics”, Third Edition, Elsevier Applied Science, Londra, 1991.
- [8] RINDEL, J. H., “The Use of Computer Modeling in Room Acoustics”, 96th Convention of Audio Engineering Society, 1994.
- [9] SAVIOJA L., “Modeling Techniques for Virtual Acoustics”, Teknillinen Korkeakoulu, Helsinki University of Technology, Helsinki, 1999.
- [10] RINDEL, J.H., “ODEON APPLICATION NOTE – Auralisation and How to Calibrate the Sound Level for Presentations”, 2015.
- [11] PELZER, S., ASPÖCK, L., SCHRÖDER, D., VORLÄNDER, M., “Integrating Real-Time Room Acoustics Simulation into a CAD Modeling Software to Enhance the Architectural Design Process” Buildings 2014, 2, 2014.
- [12] EVEREST, F.A., “Master Handbook of Acoustic”, Fourth Edition, McGraw Hill, New York, 2001.
- [13] ERDEM AKNESİL, A., “Salonların Hacim Akustiği Yönünden Değerlendirilmesinde Akustik Koşul Dağılımlarının Öneminin Ortaya Konulması ve İrdelenmesine Yönelik Bir Yaklaşım”, Doktora Tezi, YTU Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1997.

## ÖZGEÇMİŞ

### Ezgi TÜRK GÜRKAN

2008 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Mimarlık Bölümü'nü bitirmiştir. 2011 yılında aynı üniversitenin Yapı Fiziki Programı'nda mimari akustik üzerine yüksek lisansını tamamlamış, halen doktora çalışmalarına devam etmektedir. 2012 yılından bu yana Pro-Plan Proje Mühendislik San. ve Tic. Ltd. Şti. dahilinde, mimari akustik danışmanlık ve projelendirme konularında çalışmaktadır. Çeşitli otel, ofis, dinleme odası, kültür merkezi vb yapılarda, hacim akustiği, gürültü denetimi ve ses maskeleyme sistemleri projelerinde etkin olarak yer almıştır. Akustik dijital akustik modelleme konusunda ileri düzeyde bilgiye sahiptir.