

MİMAR KEMALEDİDİN SALONU AKUSTİK PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ VE PERFORMANS İYİLEŞTİRME ÖNERİLERİ

Cüneyt KURTAY, Demet IRKLI ERYILDIZ*, Gülsu ULUKAVAK HARPUTLUGİL**

Mimarlık Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe, Ankara.

*Mimarlık Bölümü, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi, Lefke Avrupa Üniversitesi, KKTC.

**Mimarlık Bölümü, Safranbolu Fethi Toker Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Karabük, kurtay@gazi.edu.tr, demet@lefke.edu.tr, g.u.harputlugil@gmail.com

(Geliş/Received: 16.07.2007; Kabul/Accepted: 23.06.2008)

ÖZET

Bu çalışmada, Gazi Üniversitesi Rektörlük Binası içinde yer alan Mimar Kemaleddin Salonunun akustik performansının değerlendirilmesi amacıyla, salonun akustik analizleri gerçekleştirilmiştir. Akustik analiz için kullanılan ECOTECT v.5.20 bilgisayar simülasyon programı yardımıyla, salonun mevcut durumuna ilişkin istatistik reverberasyon süreleri belirlenmiş ve ışın izleme yöntemi ile geometrik analizi yapılmıştır. Mimar Kemaleddin Salonu'nun akustik performansının iyileştirilmesine yönelik olarak salonun mevcut durumuna yansıtıcı ve yutucu paneller eklenerek, bitirme malzemeleri ses yutma kapasitelerine göre yeniden seçilerek 7 farklı model elde edilmiştir. Bu modellerin karşılaştırılması sonucunda, salonun müzik amaçlı kullanımı ve konuşma amaçlı kullanımının sıklığına bağlı olarak öneriler geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akustik performans, mimari akustik, Mimar Kemaleddin Salonu, ışın izleme yöntemi, konferans salonu akustiği.

ACOUSTICAL PERFORMANCE EVALUATION OF MİMAR KEMALEDİDİN HALL AND ALTERNATIVES FOR PERFORMANCE IMPROVEMENT

ABSTRACT

In this study, acoustical performance of Mimar Kemaleddin Hall in Gazi University, Rectorate Building has been analyzed. The acoustic analysis of the hall has been performed by using a simulation program called ECOTECT v.5.20 and the results were developed by means of statistical reverberation times and geometrical acoustic analysis. The existing base model of the Hall was modified by using acoustic panels and various finishing materials. By comparing the results of 7 modified models, suggestions were developed depends on main function of hall for speech or for music.

Keywords: Acoustical performance, architectural acoustic, Mimar Kemaleddin Hall, ray-tracing method, conference hall acoustics.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bina performansını, iç ortamda kullanıcı konforunun düzeyine bağlı değerlendirmek söz konusu olduğunda, iç ortam sıcaklığı, hava kalitesi, aydınlık düzeyi ile gürültü ve ses denetimi, performansın ana belirleyicileri olarak gösterilebilir. Gürültü ve ses denetimi, akustik biliminin ana konusudur [1,2,3]. Akustik, sesin oluşumu, denetimi, iletimi, karşılanması ve bunların etkilerini inceleyen bir bilim olarak tanımlanabilir. İç ortamda, kullanıcı

gereksinimini karşılayacak ses düzeyi, frekans dağılımı ve çınlama süresinin belirlenmesi ile mekan akustik performansının tanımlanması mümkün olmaktadır [4].

Bu çalışma kapsamında, bina performansı ana göstergesi olarak, akustik performans ele alınmaktadır. Değerlendirme için ECOTECT v.5.20 [5] isimli bir bilgisayar programından yararlanılmış ve 1926 yılında "Orta Muallim Mektebi ve Terbiye Enstitüsü" olarak Mimar Kemaleddin Bey tarafından tasarlanan ve bugün Gazi Üniversitesi Rektörlük Binası olarak kullanılmakta

olan bina içinde yer alan Mimar Kemaleddin Salonu akustik performans analizi gerçekleştirilmiştir [6].

2. AKUSTİK ANALİZ YÖNTEMİ (THE ACOUSTICAL ANALYSIS METHOD)

Mimari akustik, özellikle sesin üretilmesi ve yayılması ile ilgilienmektedir. Bu noktada mekan geometrisi ve ses yutma kapasitelerine bağlı olarak bitirme malzemelerinin seçimi önem kazanmaktadır [7-9]. Bir mekanın akustik performansını belirleyebilmek için, akustik analiz yöntemlerinden birini kullanarak, bir dizi matematiksel hesaplama yapmak gerekmektedir [10-12].

Geometrik verileri de kullanarak daha hassas sonuçlar elde edebilmeye yönelik olarak çeşitli bilgisayar programlarından yararlanılabilmektedir [4,13,14]. Bu araştırma çerçevesinde, Mimar Kemaleddin Salonu'nun geometrik modellemesi ve akustik analizi için, İngiltere Cardiff Üniversitesi'nde geliştirilmekte olan ECOTECT v.5.20 programı kullanılmıştır. Program, bir dizi akustik analiz gerçekleştirebilme seçeneği sunmaktadır. Bu analizler, basit istatistik reverberasyon sürelerinin belirlenmesinden, sofistike nokta analizi ve ışın izleme tekniklerine kadar geniş bir alanı kapsamaktadır.

ECOTECT v.5.20 ile, akustik analiz dışında, ısı performans analizi, gölge ve gölgeleme, yapay ve doğal aydınlatma düzeyleri ve maliyet analizi gibi farklı analizler de gerçekleştirmek mümkündür. Üç boyutlu modelleme gerektiren ve CAD uyumlu çalışabilen ECOTECT v.5.20, çoğunlukla tek bir alanda uzmanlaşan pek çok program yanında, bu kadar farklı alanda analiz gerçekleştirebilen ender programlardan biridir.

Mimar Kemaleddin Salonu'nun akustik analizini gerçekleştirebilmek için seçilen ECOTECT v.5.20, akustik analizde; istatistik reverberasyon süresi ve akustik ışınlar yardımı ile geometrik analiz gerçekleştirebilmektedir.

2.1. İstatistik Reverberasyon Süresinin Hesaplanması (Statistical Reverberation Time Calculations)

Bir odadaki kaynak ses üretmeye başladığında, belirli bir noktada ölçülen ses yenginliği doğrudan sesin ulaşması ile birden bire yükselir ve toplam ses düzeyine kadar dolaylı yansımalar da katılarak, bir dizi küçük artışlarla yükselmeye devam eder. Sonunda, kaynaktan yayılan enerjinin oda yüzeyleri tarafından soğurulan enerjiye eşitlendiğinde bir dengeye ulaşılır. Bu, çoğu malzemenin soğurmasının ses yenginliği ile orantılı olmasındandır; ses düzeyi yükseldikçe, soğurma da yükselir [15, 16].

2.1.1. Reverberasyon Süresi (Reverberation Time)

Yönetmeliğinde çınlama süresi olarak tanımlanan reverberasyon süresi (RT) hesaplanması için W. C. Sabine [17] formülü kullanılmaktadır (1).

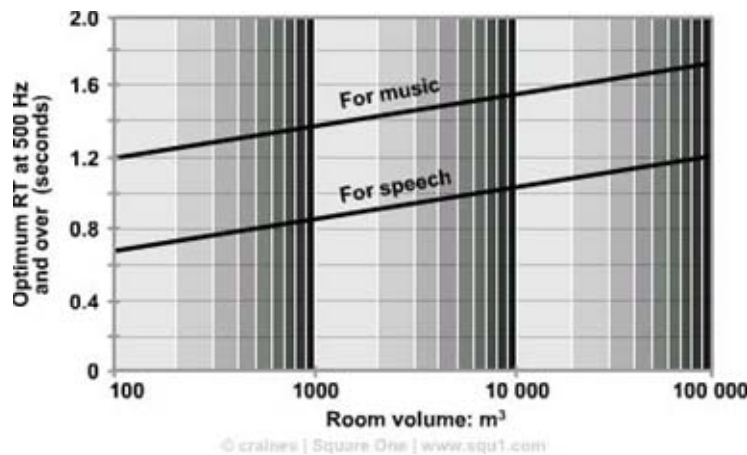
$$RT = \frac{(0,161V)}{A} \quad (1)$$

Burada V kabuğun hacmi (m³) ve A'da kabuktaki toplam soğurma olarak tanımlanmaktadır.

ECOTECT bu basit formülü kullanarak, malzeme veri tabanındaki bilgiler yardımıyla, bir odanın reverberasyon süresini hızlı bir şekilde hesaplayabilmektedir.

2.1.2. Optimum Reverberasyon Süreleri (Optimum Reverberation Times)

Belirli reverberasyon süreleri için daha etkin hacimlere ulaşabilmeyi sağlamaya yönelik bir tavsiye oluşturabilmek için benzer bir formülasyon yararlı olabilir. Bilinen soğurma özelliklerine sahip bir dizi standart malzeme ve özel amaçlar için uygun optimum RT sınırları ile oda hacmi ile istenen RT arasında bir ilişki kurmak mümkündür. Şekil 1, özel akustik malzemeler kullanılmamış standart bina konstrüksiyonuna dayalı olarak bu ilişkiyi göstermektedir [16].



Şekil 1. 500Hz ve üzerindeki optimum RT ile oda hacmi arasındaki ilişki
(Relation between room volume and optimum RT at 500 Hz and over) [16]

Bu orandan ve oditoryumdaki her bir seyircinin soğurma miktarını arttırdığı gerçeğinden yola çıkarak, odaların hacimleri, tasarım için daha anlamlı olacağı için kişi başına düşen m³ olarak belirlenmiştir.

2.1.3. Sabine Eşitliğinin Doğruluğunun İyileştirilmesi (Improvement for Verifying of the Sabine Equation)

Bir odadaki soğurma yükseldikçe, Sabine formülü ile elde edilen sonuç daha az doğru hale gelmektedir. Soğurma katsayılarının 1.0 olduğu ve reverberasyon süresinin muhtemelen 0.0 olacağı tamamen ölü bir odada, Sabine formülü sonlu bir RT sonucu verir. Daha az reverberant odaların ölçülen sonuçları ile daha uyumlu reverberasyon süresi değerleri veren eşitlikleri elde etmeye yönelik birkaç farklı yaklaşım kullanılmaktadır. Bunlardan biri, Norris-Eyring [18, 19] formülü, daha az yansımaların ulaştığı bir kesikli sönümlenme varsaymaktadır. Bu aşağıdaki formülle ifade edilir (2);

$$RT = \frac{(0,161V)}{-S \ln(1-a)} \quad (2)$$

Burada S toplam yüzey alanı (m²) ve a ortalama soğurma katsayısıdır. Bu eşitlik tamamen ölü bir odada 0.0 doğru sayısını vermektedir ancak sadece tüm yüzeyler için aynı soğurma değerine sahip odalar için geçerli ve daha karmaşıktır.

Odada kullanılan malzemelerin soğurma katsayıları çok çeşitli ise en uygun tahmin, Millington-Sette [15,20,21] eşitliği ile elde edilir. Bu basit olarak, Sabine eşitliğinde etkin bir soğurma katsayısının $a_e = -\ln(1-a_i)$ yerine geçme durumudur ve formülü (3);

$$RT = \frac{(0,161V)}{\sum -S_i \ln(1-a_i)} \quad (3)$$

Burada S_i; i'inci malzemenin yüzey alanı ve a_i; onun soğurma katsayısıdır.

2.1.4. İstatistik Formülün Geçerliliği (Validity of Statistical Formulae)

Yukarıda sözü edilen tüm eşitlikler özünde istatistikidir ve odanın biçimi, yutucu malzemelerin yeri, yansıtıcıların kullanımı gibi oda ile ilgili geometrik bilgileri ihmal eder. Bu nedenle, reverberasyon sürelerini gösterebilseler bile, bir odadaki, ayırt edilebilir ekolar, akustik gölgeler gibi akustik anomalilerin tahmini için kullanılamazlar. Bu beklentiler için detaylı bir geometrik analiz gerekir.

2.2. Geometrik Akustik (Geometrical Acoustics)

İstatistiki yöntemler tasarımın erken aşamaları için yararlıdır, ancak akustik hataların belirlenebilmesinde kapasiteleri oldukça sınırlıdır. Bu, çoğu hatanın

aslında mekan geometrisinden kaynaklı olmasındandır [22]. Basit şematik çizimlerle geometrik analiz, tasarımın erken aşamalarında bilgi verici olsa da, tasarım geliştikçe, daha fazla ve ayrıntılı geometrik bilgi ortaya çıkar ve bunların da analiz için kullanılması gerekir. Mimarlar ve tasarımcılar ne kadar yutucu malzeme kullanılabileceğinin belirlenmesi yanında ne tür bir yutucu kullanılmalı ve en uygun nereye yerleştirilmeli kararının da verecektir. Burada yansıyan ses ışınlarının göz önünde bulundurulması oldukça yararlı olacaktır [16,23].

2.2.1. Temel Varsayımlar (Basic Assumptions)

Tüm bilgisayar modellerinde olduğu gibi, akustikte bazı basitleştirmeler yapılabilir. ECOTECT v.5.20'de tüm geometrik akustik hesaplamalarda söz konusu olan varsayımlar [16]:

- Tüm karmaşık oda yüzeyleri bir dizi düzlemsel poligonal yüzeyler bileşeni olarak azaltılmıştır.
- Yayılan dalgalar düz hatta ilerleyen enerji paketleri ya da küçük ses quantumlarından oluşmaktadır.
- Bu yönü ile ses enerjisi bir enerji fonksiyonu olarak ele alınır, bu enerjinin toplanabileceği anlamına gelmektedir.
- Bu ayrıca fazlanma ve parazit gibi dalga olgusunun olmadığı anlamına da gelir.
- Yüzey ses soğurma katsayıları geliş açısından bağımsızdır.

Böylece, bir geometrik akustik fonksiyonu çerçevesinde, ECOTECT v.5.20, modellenen mekan etrafında hava soğurulması ve yüzey soğurulması yoluyla enerji kaybederek tahmini olarak sıçrayan ses ışınlarını oluşturmaktadır. ECOTECT v.5.20'deki geometrik akustik fonksiyonunun birincil amacı yansıtıcıların ve yansıtan yüzeylerin doğru tasarımıdır.

2.2.2. Ses Işınları Kavramı (Sound Rays)

Dalga boyu ile karşılaştırıldığında oda boyutlarının büyük olduğu düşünülüyor ise, ses dalgalarının ışık ışınlarıymış gibi düşünülmesi mümkündür. Bu ışık analogisine devam edilecek olursa, ses ışınları yansıma kurallarına dayalı olarak sert düzlemsel duvardan yansımaktadır [24].

Ses ışını kavramı ve ses ışınının izlediği yolun geometrik analizi büyük mekanların ve oditoryumların tasarımında, eko ve flutter ekoların saptanmasında ve önlem alınmasında önemli bir rol oynar. Geometrik yaklaşımın bir sınırlılığı genellikle sadece düşük (low order) yansımaların reverberant veya geç ulaşan ses alanında "kayıp" hale gelmesidir. Ayrıca sesin dalga boyuna göreli mekan boyutları, geometrik akustik sadece 500Hz frekans ve üzerinde geçerli olabileceği anlamına gelmektedir.

ECOTECT, reverberasyon sürelerini, 63 Hz frekans bandına kadar göstermektedir. Bunun oluşturulması doğrudan istatistik yöntemle yada geometrik olarak türetilmiş verilerin istatistik yöntemle ele alınmasıyla gerçekleştirilmektedir.

2.2.3. Akustik Işınlr (Acoustical Rays)

Bir mekan içindeki akustik ışınların dağılımı akustik tasarımın önemli bir parçasıdır. Bir kez geometri doğru bir şekilde oluşturulduğunda, ses yutucularının miktarı ve yeri konusunda bir miktar esneklik elde edilir [25, 26]. Bir mekan içinde ışınların dağılımı, duvarların ve diğer yüzeylerin bir ses kaynağını maksimum etkili yansıtmak üzere biçimlendirilmesi için son derece değerli bir yoldur [27, 28].

ECOTECT v.5.20 [16] ile, interaktif olarak ışınların dağılımını izleyebilmek için, model içinde en az bir tane ses kaynağına ihtiyaç vardır. Bu yöntem ile ışınlar, ses kaynağını merkeze alan ve kaynak vektörünün yönünde dairesel diskler oluşturarak dağılır. Modele yeni bir nesne eklendiğinde veya yer değiştirildiğinde dağılan ışınlar otomatik olarak güncellenmektedir. Böylece ses kaynağı hareket ettirilebilir veya yansıtıcılar doğru açı bulunana kadar döndürülebilir.

2.2.4. Akustik Yanıt (Acoustical Response)

ECOTECT v.5.20 [16] ile, mekanın akustik yanıtını belirlemek için geometrik akustik ışınları kullanan bir analiz gerçekleştirilebilmektedir. Eğer modelde akustik ışınlar oluşturulmuş ise, bu analiz yöntemi ile ışının üç boyutlu izlediği yol ve akustik sönümü belirlenebilir.

Akustik sönüm ile ilişkili olarak bir ışının üç boyutlu yansıma yolu, işitsel mekanın tasarımı için oldukça güçlü bir araçtır [29,30].

Sönümlenme mutlak ses düzeyi ya da görelî ses düzeyi kullanılarak iki yolla elde edilmektedir.

- **Mutlak ses düzeyinin analizinde**, her ışın birleşecek bir ses enerjisi ile başlar. Işın yayıldıkça her yüzey yansıması ve havanın soğurma etkisi ışının ses enerjisini azaltır. Bu negatif ses düzeyi ya da bir ses azalmasına neden olur. Işın ses kaynağı tarafından yayılan ses partikülleri olarak kabul edildiğinde, geometrik yayılmanın yayıldığı kadar enerjisini azaltmakta olduğu göz önünde bulundurulmaz. Burada, tüm ışınlar sabit bir hızda yol aldığı için (20°C havada 343.7 m/sn) her ışının sönüm değeri her zaman aynıdır.
- **Görelî ses düzeyinin analizi** ise, yayılan ışının her iki değeri de aynı noktaya ulaşan doğrudan sesin düzeyi ve sönümünü karşılaştırır. Bu, ses enerjilerinin doğrudan karşılaştırması olduğu için, geometrik yayılım, karşılaştırma öncesi her ışının

ses düzeyinin ses yayılımı için “tersine kare kuralı- (inverse square law)” uygulanarak hesaplanmaktadır. Görelî sönümlenme basit olarak ışın yayılım zamanından doğrudan ışının ulaşma zamanının çıkarılmasıdır. Bu değerler her yansımanın algılanan etkisi hakkında daha gerçekçi bir fikir verir ve bu, bir ışının yansıdıkça, düzeyinin doğrudan sese görelî artacağı anlamına gelir.

Her iki yöntemde de ECOTECT v.5.20, herhangi bir zamandaki herhangi bir ışının düzeyi ve sönümünü, düzey düşey ekseninde (y-ekseni), sönüm yatay ekseninde (x-ekseni) olmak üzere iki boyutlu grafikte bir nokta olarak göstermektedir. Çok sayıdaki ışının bir araya gelmesi ile, grafiğin farklı bölümlerinde noktaların ne sıklıkta yer aldığı görülebilmektedir. Grafikte bu renk yoğunluğu ile ifade edilmektedir.

Grafik, farklı zamanlarda mekanın farklı bölümlerindeki reverberasyon oranları dizisinin bir resmini vermektedir. Bu veriden yola çıkarak en uygun çizgi gösterilmektedir. Grafikteki kırmızı çizgi, 60dB boyunca en uygun çizgiyi, mavi çizgi ise ilk 10 dB'deki en uygun çizgiyi vermektedir.

2.2.5. Sönüm Hesaplanması (Calculations for Estimated Decay)

ECOTECT v.5.20, çok sayıda rastgele ışınlar üreterek onların sönümlenmesini incelemektedir. Bu veriler ile, her frekans bandı için ortalama sönüm eğrisi oluşturulmaktadır. Bu eğri tüm sönümlenen ışınların ortalamasının ters entegre enerji fonksiyonudur. Bu gerçek reverberasyon süresinin gösterilmesini de sağlar. Bu genellikle, ışınların otomatik olarak birbirinden ayrıldığı ve istatistiki olarak önemli olan yüzeylerin önemsiz olanlarına göre ağırlığı olduğundan istatistiki yöntemle daha doğrudur. Eğer bir yüzey yeterince geniş ve açıksa, küçük ve saklı yüzeylere göre daha fazla ışının çarpma olasılığı var demektir. Gerçek bir mekanda, bu, etki derecesiyle doğrudan benzerdir.

İstatistiki yöntemler fiziksel geometriyi dikkate almadıkları için, mekandaki akustik açıdan önemli yüzeyleri diğerlerinden ayırması söz konusu değildir. Ancak, her yüzeye ulaşan çarpma sayısını ve yüzeyin soğurma katsayısını toplayarak ve rastgele ışın üretme yöntemi ile mekandaki tüm ses yutumu hakkında çok daha iyi bir bilgiye ulaşmak mümkündür.

Ortalama serbest yol uzunluğu boyunca, bu veri, mekanın alternatif reverberasyon sürelerinin oluşturacak, istatistiki reverberasyon hesaplamalarında kullanılmak üzere istatistiki reverberasyon süresi formülüne bilgi oluşturmaktadır. Böylece alternatif bir reverberasyon süresi grafiği oluşturmak ve istatistiki yöntem grafiği ile karşılaştırmak mümkündür.

3. ECOTECT v.5.20 ile Mimar Kemaleddin Salonu Akustik Analizi (Acoustical Analysis of Mimar Kemaleddin Hall by ECOTECT v.5.20)

Bu araştırma çerçevesinde, Mimar Kemaleddin Salonu'nun akustik performansının belirlenebilmesi ve gerekli iyileştirmelerin yapılabilmesine yönelik ECOTECT v.5.20 programında modellenen salonun önce mevcut durumu analiz edilmiş, elde edilen veriler doğrultusunda, salonun uygun yerlerine yansıtıcı ve yutucu paneller, ayrı ayrı ve bir arada uygulanarak elde edilen yeni modellerin analizi yapılmış ve en iyi sonucu veren model belirlenmeye çalışılmıştır.

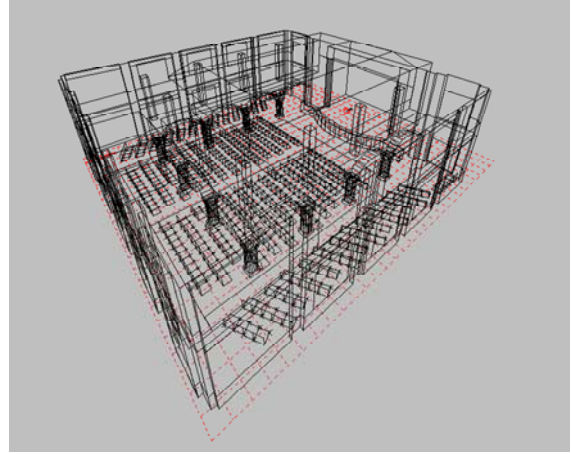
Mimar Kemaleddin Salonu'nun mevcut durumuna ve geliştirilen her modele ayrı bir isim verilmiştir. Bu isimler ve modelin hangi değişiklikleri içerdiği Tablo 1'de görülebilir.

Tablo 1. Model isimleri ve içerikleri. (Model names and their definitions)

Model adı	İçeriği
MODEL-1	Mimar Kemaleddin Salonu mevcut durumu
MODEL-2	Mevcut duruma sadece halı kaplama uygulaması ile elde edilen model
MODEL-3	Mevcut duruma sadece yutucu panellerin eklenmesi ile elde edilen model
MODEL-4	Mevcut duruma sadece yansıtıcı panellerin eklenmesi ile elde edilen model
MODEL-5	Mevcut duruma yutucu ve yansıtıcı panellerin birlikte eklenmesi ile elde edilen model
MODEL-6	Mevcut duruma halı kaplama ve yutucu panellerin birlikte eklenmesi ile elde edilen model
MODEL-7	Mevcut duruma halı kaplama ve yansıtıcı panellerin birlikte eklenmesi ile elde edilen model
MODEL-8	Mevcut duruma halı kaplama, yansıtıcı ve yutucu panellerin birlikte eklenmesi ile elde edilen model

Mimar Kemaleddin Salonu mevcut durumuna ait akustik analizini gerçekleştirebilmek için, öncelikle salon CAD programları yardımı ile üç boyutlu modellenmiş, bu model ECOTECT v.5.20 programına aktararak, modeli programda çalışır hale getirmek üzere gerekli düzenlemeler yapılmıştır (Şekil 2).

Sahneye yerleştirilen bir ses kaynağından, 6, 8, 12 ve 16 yansımali, 12000, 16000, 24000 ve 36000 ışın için ayrı ayrı yapılan hesaplamalar sonucunda, 16 yansımali 36000 ışın hesabının daha hassas sonuçlar verdiği belirlenerek, yapılan analizlerde 16 yansımali



Şekil 2. Mimar Kemaleddin Salonu, ECOTECT programı ile çizilen üç boyutlu modeli (3D Model of Mimar Kemaleddin Hall prepared by ECOTECT program)

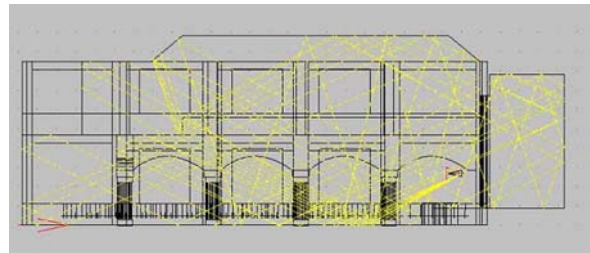
36000 ışın hesaplamaları kullanılmıştır. ECOTECT v.5.20 programı ile, Mimar Kemaleddin Salonu iç yüzeylerinde 16 yansımali 36000 ışının sahnedeki ses kaynağından nasıl dağıldığı ve yansıdığı salonun plan ve kesit düzleminde, ışın izleme görselleştirilerek belirlenebilmektedir (Şekil 3,4).

3.1. Mevcut Durumun Değerlendirilmesi (Evaluation of Existing Hall)

Mimar Kemaleddin Salonu'nun mevcut durumuna ait bitirme malzemeleri ve bu malzemelerin hesaplamalarda kullanılan ses yutuculuk katsayısı değerleri Tablo 2'de verilmektedir.

3.1.1. Reverberasyon Sürelerinin Belirlenmesi (Determination of Reverberation Times)

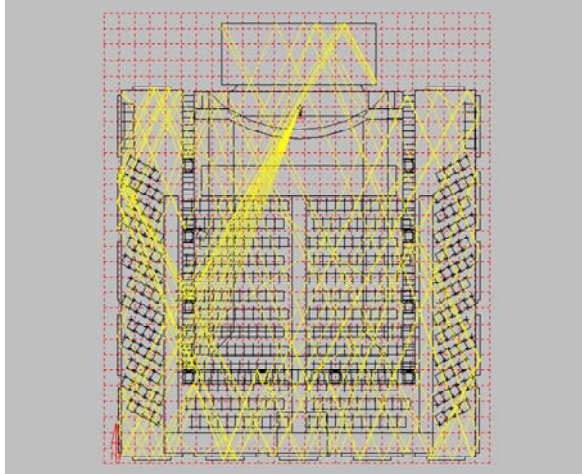
ECOTECT v.5.20, reverberasyon sürelerinin hesaplanmasında Sabine, Norris-Eyring ve Millington Sette yöntemlerinin üçüne ait sonuçları da grafiksellemektedir. Mimar Kemaleddin Salonu'nun mevcut durumuna ait İstatistiki reverberasyon sürelerinin belirlenmesinde, kullanıcı sayısı 500 olarak hesaplamalara katılmış, koltuk yüzeylerinin kumaş kaplı olduğu varsayılmış ve ECOTECT v.5.20 salon hacmini 5150,18 m³ olarak hesaplamıştır.



Şekil 3. Mimar Kemaleddin Salonu sahnesindeki bir ses kaynağından 16 yansımali ses dağılımının ışın izleme yöntemi ile belirlenmesi-Kesit. (Determination of 16th order sound distribution from the sound source on the stage of Mimar Kemaleddin Hall by ray tracing method-Section.)

Tablo 2. Mimar Kemaleddin Salonu mevcut durumunda kullanılan malzemelerin ses yutuculuk katsayısı değerleri. (The Sound Absorption Coefficients of existing finishing materials on Mimar Kemaleddin Hall)

	63 Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
Duvar Kaplamaları								
Traverten kaplama	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,07
Ahşap kaplama	0,24	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10	0,10
Alçı pano	0,29	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	0,09
Döşeme Kaplaması								
Parke kaplama	0,04	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07	0,07
Tavan Kaplaması								
Betonarme döşeme üzeri plastik boya	0,10	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08

**Şekil 4.** Mimar Kemaleddin Salonu sahnesindeki bir ses kaynağından 16 yansımali ses dağılımının ışın izleme yöntemi ile belirlenmesi-Plan. (Determination of 16th order sound distribution from the sound source on the stage of Mimar Kemaleddin Hall by ray tracing method-Plan.)

Mevcut salon verileri ile yapılan hesaplamalar ile, salonun tam boş (%0), %25 dolu, %50 dolu, %75 dolu ve tam dolu (%100) durumlarına göre, istatistiki reverberasyon süreleri elde edilmiştir. İstatistiki reverberasyon süreleri, salonun doluluk oranlarına göre karşılaştırıldığı gibi, ayrıca salon pencerelerini kapatan perdelerin açık veya kapalı olma durumlarına göre de bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir.

3.1.2. Geometrik Akustik Analizi (Analysis of Geometrical Room Acoustics)

Salonun, geometrik akustik analizi gerçekleştirildiğinde, hacmin biçimi ve yüzey geometrisi de hesaplamalara dahil edilmektedir. Bu analiz sonucu elde edilen, salonun mutlak ses düzeyleri ve göreceli ses düzeylerine ait grafikler Şekil 5 ve 6'da verilmektedir.

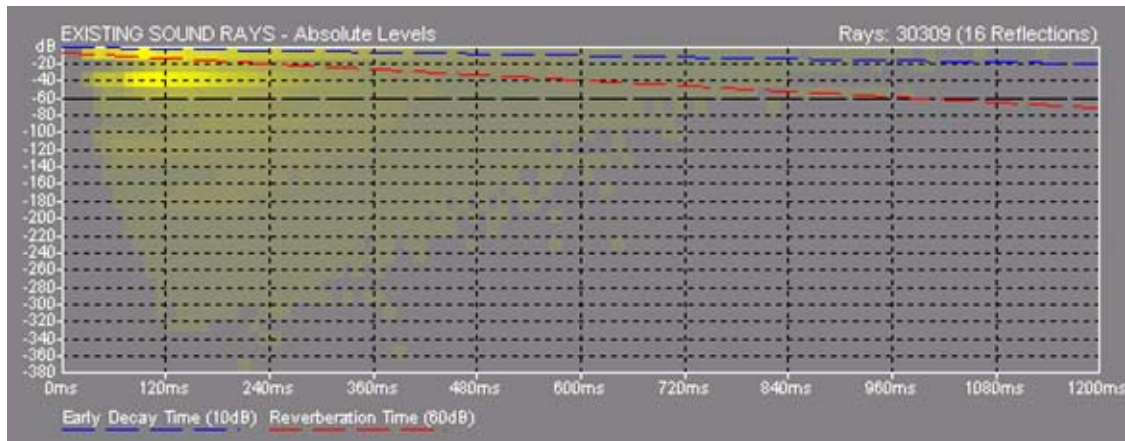
500Hz ve 1000Hz için mutlak ve göreceli ses düzeylerine ait en uygun reverberasyon süresi, en uygun early decay süresi, ortalama soğurma katsayısı ve ortalama free path uzunluğu değerleri Tablo 3'de verilmektedir. Örnek olarak 500 Hz için elde edilen mutlak ses düzeyleri ve göreceli ses düzeyleri grafikleri verilmiştir (Şekil 5,6).

Ayrıca, salonun, her frekans bandı için ortalama sönüm eğrisi ve geometrik verileri, ışın izleme yöntemi ile analize dahil edilen alternatif reverberasyon süreleri grafiği de elde edilmiştir.

Şekil 7'de görülen ortalama sönüm eğrisi için, 1869 noktada 113 yansıma ile yapılan analizde, 1873,735 m² etkin alan ve 4802,250 m³ etkin hacimde, ortalama free path uzunluğu 10,25 m olarak bulunmuştur.

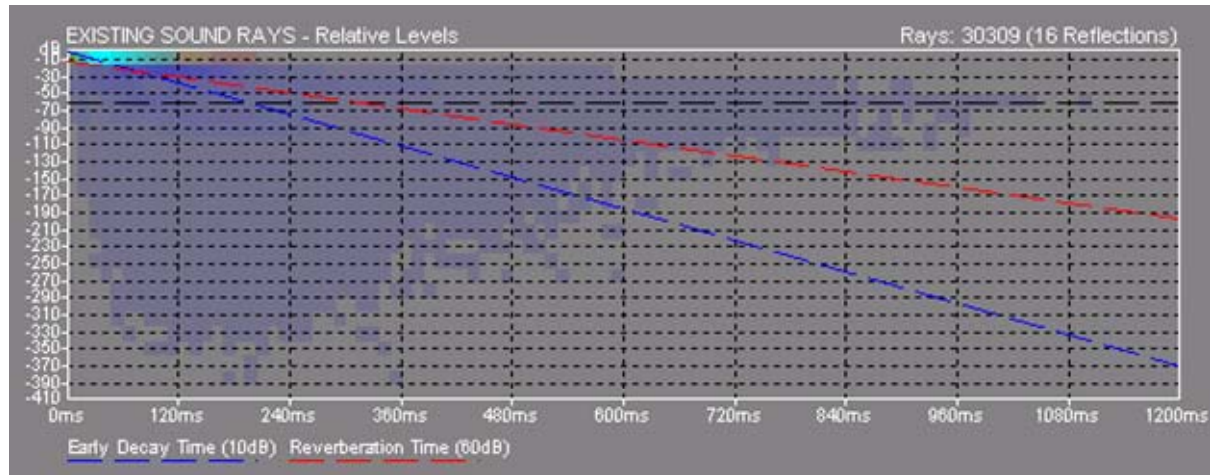
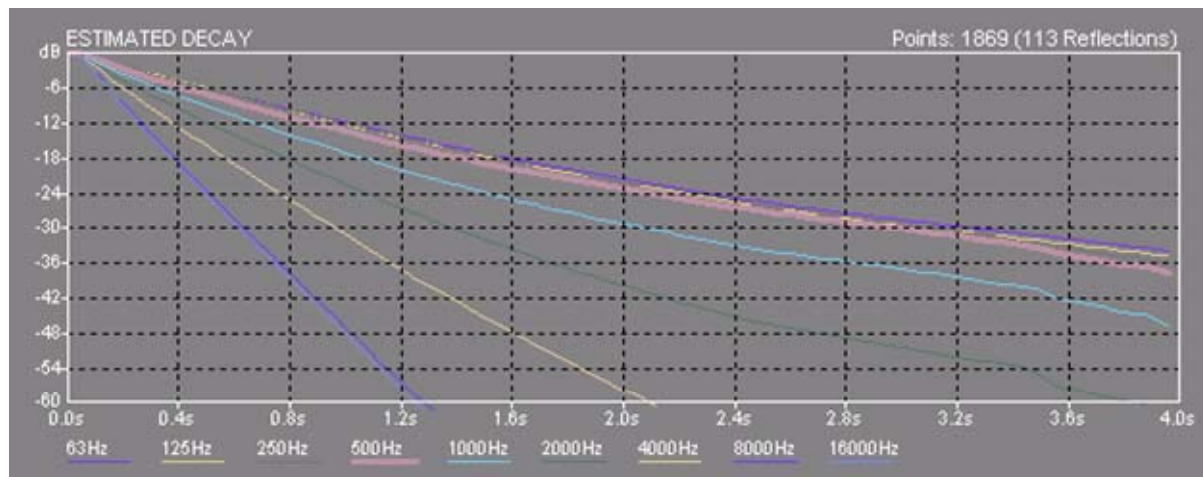
Bu analiz ile birlikte elde edilen, alternatif reverberasyon süreleri grafiği Şekil 8'de verilmektedir.

Mimar Kemaleddin Salonu'na ait, istatistiki reverberasyon süreleri ile ışın izleme yöntemine dayalı alternatif reverberasyon süreleri arasındaki karşılaştırma Tablo 4'de verilmektedir.

**Şekil 5.** Mimar Kemaleddin Salonu mutlak ses düzeyleri grafiği. (Mimar Kemaleddin Hall – Absolute sound levels)

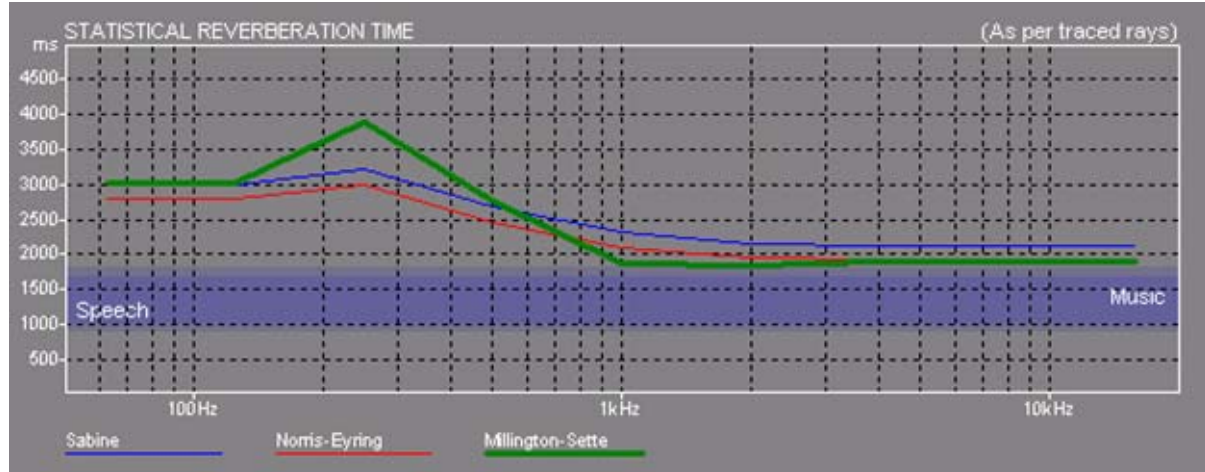
Tablo 3. Mimar Kemaleddin Salonu mevcut durumuna ait mutlak ve göreceli ses düzeyi değerleri. (Absolute and Relative sound levels of Mimar Kemaleddin Hall)

GÖRELİ SES DÜZEYİ	EN İYİ REVERBERASYON SÜRESİ (60db.)		0.304 sn
	EN İYİ öncül sönüm(early decay) SÜRESİ (10db.)		0.190 sn
	ORT. SOĞURMA KATSAYISI	500 Hz	0.247
	ORT. Serbest Yol (Free path) UZUNLUĞU		6.92 m
	EN İYİ REVERBERASYON SÜRESİ (60db.)		0.281 sn
	EN İYİ öncül sönüm(early decay) SÜRESİ (10db.)		0.181 sn
	ORT. SOĞURMA KATSAYISI	1000 Hz	0.264
	ORT. Serbest Yol (Free path) UZUNLUĞU		6.92 m
MUTLAK SES DÜZEYİ	EN İYİ REVERBERASYON SÜRESİ (60 db.)		0.971 sn
	EN İYİ öncül sönüm(early decay) SÜRESİ (10db.)		3.688 sn
	ORT. SOĞURMA KATSAYISI	500 Hz	0.247
	ORT. Serbest Yol (Free path) UZUNLUĞU		6.92 m
	EN İYİ REVERBERASYON SÜRESİ (60db.)		0.851 sn
	EN İYİ öncül sönüm(early decay) SÜRESİ (10db.)		3.674 sn
	ORT. SOĞURMA KATSAYISI	1000 Hz	0.264
	ORT. Serbest Yol (Free path) UZUNLUĞU		6.92 m

**Şekil 6.** Mimar Kemaleddin Salonu göreceli ses düzeyleri grafiği. (Mimar Kemaleddin Hall – Relative sound levels)**Şekil 7.** Mimar Kemaleddin Salonu ortalama sönüm eğrisi. (Estimated decay graphic for Mimar Kemaleddin Hall)

Tablo 4. Salona ait istatistiki ve alternatif reverberasyon süreleri karşılaştırması. (Comparison of the Statistical and alternative reverberation times of the Hall)

HESAPLAMA YÖNTEMİ	İSTATİSTİKİ REVERBERASYON SÜRELERİ	ALTERNATİF REVERBERASYON SÜRELERİ
NORRIS	500 Hz 2.11 sn.	2.46 sn.
EYRING	1000 Hz 2.10 sn	2.10 sn.
MILLINGTON	500 Hz 1.77 sn.	2.76 sn.
SETTE	1000 Hz 1.46 sn	1.88 sn.
SABİNE	500 Hz 1.91 sn.	2.68 sn.
	1000 Hz 1.72 sn.	2.31 sn.

**Şekil 8.** Mimar Kemaleddin Salonu alternatif reverberasyon süreleri grafiği. (Alternative Reverberation time graphics for Mimar Kemaleddin Hall)

3.2. Akustik İyileştirme Uygulamaları (Implementations for acoustical improvements)

Mimar Kemaleddin Salonu'na yansıtıcı ve yutucu malzemeler uygulanarak ve zeminin halı kaplanması durumunda elde edilecek akustik iyileştirmeleri belirlerken, karşılaştırma tabanı olarak, salonun perdelerinin kapalı olduğu ve %75 dolu olduğu durum göz önüne alınmıştır. Salonun iyileştirme çalışmalarında denenen bitirme malzemeleri ve ses yutuculuk değerleri Tablo 5'de verilmektedir.

İyileştirmeler gerçekleştirilirken, her malzemenin tek tek ve bir arada uygulandığı 7 farklı model elde edilmiştir. Her model kendi içinde avantaj ve dezavantajlara sahip olmakla birlikte, burada optimum çözümü karşılayabilen modelin belirlenmesi amaçlanmıştır. İstatistiki hesaplamalar ve geometrik analiz ile elde edilen her modele ait sonuçlar Tablo 6'da verilmektedir.

Akustik iyileştirmeye yönelik yapılan malzeme seçiminde, konuşma amaçlı salon akustiğine daha uygun olabileceği düşüncesi ile, salonun parke olan

zemini tamamen halı kaplanmış, sahnenin üzerine Şekil 9'da görüldüğü biçimde yansıtıcı paneller uygulanmış ve salonun arka duvarında traverten ile kaplı olan tüm yüzeyler (Şekil 10) yutucu paneller ile kaplanmıştır.

3.2.1. İstatistiki Reverberasyon ve Alternatif Reverberasyon Süreleri Karşılaştırması (Comparison of the Statistical and Alternative Reverberation Times)

Tablo 6'da yer alan istatistiki ve alternatif reverberasyon süreleri incelendiğinde mevcut durum ile önerilen modeller arasındaki farklılıklar saptanabilmektedir.

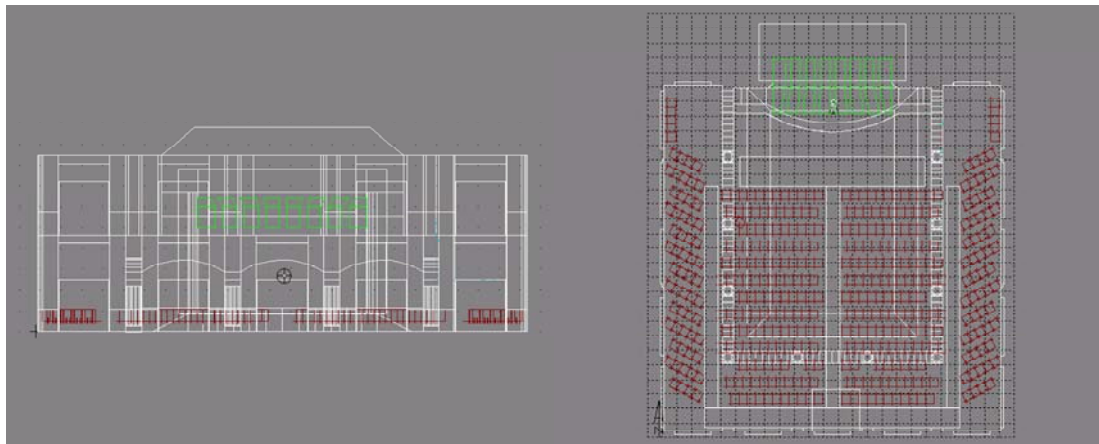
Model-1 (Mevcut durum) ve **Model-2** (yerde halı uygulaması) en yüksek reverberasyon sürelerine sahip olan örnekleme çalışmalarıdır. Yer döşemesinin parke ve halı ile kaplı olmasının reverberasyon süresi üzerindeki etkisi azdır. Burada seçilen halının akustik özellikleri de rol oynamaktadır. Bu modellerin uygulanması salonun ağırlıklı fonksiyonunun müzik amaçlı olması durumunda yararlı olacaktır.

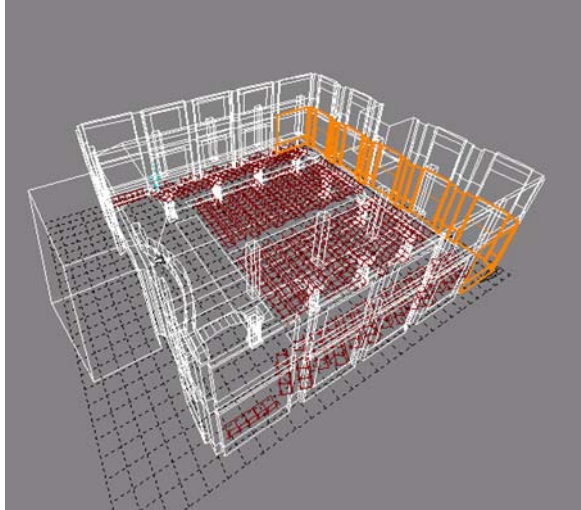
Tablo 5. Mimar Kemaleddin Salonu akustik performansının iyileştirilmesi çalışması için denenen yutucu ve yansıtıcı malzemelerin ses yutuculuk katsayısı değerleri. (The Sound Absorption Coefficients of reflected and absorbant finishing materials of alternative models for improvement of acoustical performance of Mimar Kemaleddin Hall)

	63 Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
Yutucu yüzey	0,94	0,95	0,97	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93
Yansıtıcı yüzey	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
Halı kaplama	0,05	0,05	0,08	0,08	0,22	0,28	0,37	0,37

Tablo 6. Her modele ait istatistiki hesaplamalar ve geometrik analiz sonuçları. (Statistical calculations and geometrical analysis results of the models)

			Model-1	Model-2	Model-3	Model-4	Model-5	Model-6	Model-7	Model-8	
REVERBERASYON SÜRELERİ	Toplam Yutma	500Hz	294.461	280.040	414.152	294.678	418.614	410.294	261.931	410.511	
		1000Hz	340.282	392.722	457.341	340.499	463.463	520.204	365.055	520.421	
	Norris Eyring	500Hz	2.11 sn.	2.26 sn	1.37 sn	2.12	1.39	1.41	2.13	1.42	
		1000Hz	2.10 sn	2.22 sn	1.36 sn	2.11	1.38	1.41	2.12	1.41	
	Millington Sette	500Hz	1.77 sn.	1.81 sn	0.88 sn	1.77	0.87	0.88	1.95	0.88	
		1000Hz	1.46 sn	1.31 sn	0.83 sn	1.46	0.82	0.77	1.44	0.77	
Sabine	500Hz	1.91 sn.	1.97 sn	1.49 sn	1.91	1.48	1.51	2.06	1.51		
	1000Hz	1.72 sn.	1.55 sn	1.38 sn	1.72	1.37	1.26	1.64	1.25		
GÖRELİ SES DÜZEYİ	En İyi Revb. Süresi (60db.)	500 Hz	0.304 sn	0.323 sn	0.284 sn	0.295 sn	0.281 sn	0.287 sn	0.359 sn	0.281 sn	
	En İyi Early Decay Süresi (10db.)		0.190 sn	2.792 sn	4.873 sn	0.190 sn	6.763 sn	4.694 sn	999.00 sn	4.304 sn	
	Ort. Yutma Katsayısı		0.247	0.246	0.276	0.247	0.275	0.280	0.241	0.277	
	Ort. Free Path Uzunluğu		6.92 m	6.99 m	6.94 m	6.83 m	6.82 m	6.99 m	6.93 m	6.91 m	
	En İyi Revb. Süresi (60db.)	1000 Hz	0.281 sn	0.301 sn	0.269 sn	0.274 sn	0.266 sn	0.272 sn	0.344 sn	0.266 sn	
	En İyi Early Decay Süresi (10db.)		0.181 sn	2.922 sn	4.772 sn	0.182 sn	6.357 sn	4.393 sn	50.682 sn	4.190 sn	
	Ort. Yutma Katsayısı		0.264	0.265	0.293	0.264	0.292	0.298	0.259	0.296	
	Ort. Free Path Uzunluğu		6.92 m	6.99 m	6.94 m	6.83 m	6.82 m	6.99 m	6.93 m	6.91 m	
MUTLAK SES DÜZEYİ	En İyi Revb. Süresi (60 db.)	500 Hz	0.971 sn	1.095 sn	0.757 sn	0.924 sn	0.732 sn	0.763 sn	1.190 sn	0.755 sn	
	En İyi Early Decay Süresi (10 db.)		3.688 sn	3.971 sn	3.524 sn	3.472 sn	3.396 sn	3.632 sn	4.986 sn	3.478 sn	
	Ort. Yutma Katsayısı		0.247	0.246	0.276	0.247	0.275	0.280	0.241	0.277	
	Ort. Free Path Uzunluğu		6.92 m	6.99 m	6.94 m	6.83 m	6.82 m	6.99 m	6.93 m	6.91 m	
	En İyi Revb. Süresi (60 db.)	1000 Hz	0.851 sn	0.940 sn	0.681sn	0.809 sn	0.663 sn	0.678 sn	1.048 sn	0.674 sn	
	En İyi Early Decay Süresi (10 db.)		3.674 sn	3.829 sn	3.468 sn	3.457 sn	3.452 sn	3.530 sn	4.695 sn	3.401 sn	
	Ort. Yutma Katsayısı		0.264	0.265	0.293	0.264	0.292	0.298	0.259	0.296	
	Ort. Free Path Uzunluğu		6.92 m	6.99 m	6.94 m	6.83 m	6.82 m	6.99 m	6.93 m	6.91 m	
ESTIMATED DECAY	Ort.Free Path Uzunluğu	500 Hz	10.25 m	12.45 m	12.42 m	10.65 m	12.37 m	12.43 m	12.43 m	12.18 m	
	Etkin Yüzey Alanı (m ²)		1873.735	2016.117	1958.672	2264.426	1940.405	1899.396	2084.104	1979.724	
	Etkin Hacim (m ³)		4802.250	6277.133	6080.657	6029.894	6000.476	5985.961	6477.335	6027.984	
	Nokta Sayısı / Yansıma Sayısı		1869 / 113	1955 / 89	1192 / 29	4844 / 113	1323 / 41	7217 / 27	2107 / 101	2239 / 40	
	Reverb. Süresi	Norris Eyring	500 Hz	2.46	3.97 sn	1.31 sn	1.25	1.28	1.25	1.31	1.50
			1000 Hz	2.10	3.12 sn	1.18 sn	1.14	1.17	1.14	1.20	1.39
		Millington Sette	500 Hz	2.76	2.65 sn	0.51 sn	0.45	0.45	0.49	0.44	0.47
			1000 Hz	1.88	1.74 sn	0.49 sn	0.44	0.44	0.48	0.43	0.47
Sabine		500 Hz	2.68	4.22 sn	1.57 sn	1.52	1.55	1.52	1.58	1.24	
		1000 Hz	2.31	3.38 sn	1.45 sn	1.41	1.44	1.41	1.46	1.13	

**Şekil 9.** Yansıtıcı panel uygulaması. (Implementation of the reflected panels)



Şekil 10. Yutucu panel uygulaması. (Implementation of the absorbant panels)

Konuşma amaçlı salon kullanımının ağırlıklı olması durumunda **Model-4** (yalnızca yansıtıcı yüzey uygulaması) ve **Model-5** (arka duvarlarda soğurucu malzeme kullanımı ve yansıtıcı yüzey uygulaması) ve **Model-6** (Mevcut duruma halı kaplama ve yutucu panellerin birlikte eklenmesi ile elde edilen model) en uygun modellerdir. Burada arka duvarda kullanılan soğurucu yüzey uygulamasının etkin rolü görülmektedir. Konferans ve ders amaçlı kullanımlar için bu uygulamanın yararı açık olarak görülmektedir. **Model-8** (yansıtıcı yüzey, arka duvarlarda soğurucu malzeme kullanımı ve yerde halı uygulaması) **Model-3** (Mevcut duruma sadece yutucu panellerin eklenmesi) ve **Model 7** (yansıtıcı yüzey ve yerde halı uygulaması) konuşma ağırlıklı fonksiyonlara uygun olmakla birlikte müzik performansları için de kullanılabilir.

3.2.2. Geometrik Analiz Değerlendirmesi (Evaluation of the Geometrical Analysis)

Mevcut salon verileri ile yapılan hesaplamalar ile, salonun tam boş (%0), %25 dolu, %50 dolu, %75 dolu ve tam dolu (%100) durumlarına göre belirlenen reverberasyon süreleri incelendiğinde: Reverberasyon sürelerinin salonun doluluk oranıyla ters orantılı olduğu görülmektedir. Burada salonun geometrisi, boyutları ve barındırdığı izleyici sayısı arasında bir ilişki bulunmaktadır. İzleyici sayısı arttıkça reverberasyon süresi azalmaktadır. Ayrıca salon pencerelerini kapatan perdelerin açık veya kapalı olma durumunda salonun akustiği üzerindeki etkisi saptanmış olup, perdelerin kapalı olmasının reverberasyon süresini azaltma etkisi görülmüştür.

İyileştirmeye yönelik çalışmalar ise Bölüm 2.3.1’de belirtildiği gibi fonksiyona göre seçim yapılması konusunda fikir vermektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND PROPOSALS)

Gazi Üniversitesi, Mimar Kemaleddin Salonu hem tarihi hem de mimari özellikleri açısından önemli bir mekandır. Yıllardır eğitim ve kültür alanında pek çok etkinliğe mekan oluşturan bu salon halen yoğun olarak kullanılmaktadır. Mevcut kullanımı sırasında bazı akustik problemler yaşanması, salonun olası bir restorasyonu sırasında tarihi ve mekansal özelliklerini bozmadan akustik iyileştirme yapılması konusunu da gündeme getirmiştir.

Bu çalışma çerçevesinde yapının mevcut durumuna ilişkin reverberasyon sürelerinin hesaplanması ve akustik yanıtların belirlenmesi için, bir bilgisayar simülasyon programından yararlanılmıştır. Kullanılan bilgisayar programı, ECOTECT v.5.20’dir ve ışın izleme yöntemi kullanarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Mimar Kemaleddin Salonu mevcut durumunun analizini gerçekleştirebilmek için, öncelikle salon CAD programları yardımı ile üç boyutlu modellenmiş, bu model ECOTECT v.5.20 programına aktararak, modeli programda çalışır hale getirmek üzere gerekli düzenlemeler yapılmıştır.

Sahneye yerleştirilen bir ses kaynağından, 6, 8, 12 ve 16 yansımali, 12000, 16000, 24000 ve 36000 ışın için ayrı ayrı yapılan hesaplamalar sonucunda 16 yansımali 36000 ışın hesabının daha hassas sonuçlar verdiği belirlenerek, yapılan analizlerde 16 yansımali 36000 ışın hesaplamaları kullanılmıştır.

Mevcut salon gün-ay verileri ile yapılan hesaplamalar ile, salonun tam boş (%0), %25 dolu, %50 dolu, %75 dolu ve tam dolu (%100) durumlarına göre, reverberasyon süreleri belirlenmiş ve değerlendirilmeleri yapılmıştır. Ayrıca salon pencerelerini kapatan perdelerin açık veya kapalı olma durumlarına göre de bir çalışma yapılarak yukarıdaki bölümlerde değerlendirilmiştir.

Tüm analizler mevcut durum ve iyileştirmeye yönelik 7 model için gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları karşılaştırılarak uygulama amacına uygun modeller önerilmiştir. Mimar Kemaleddin Salonu modeli için ideal konuşma (speech) ve müzik reverberasyon süreleri mevcut durum ve önerilen modeller için değerlendirilmiştir. Tablo 6’da her model için 500Hz ve 1000 Hz de istatistik ve alternatif reverberasyon süreleri yer almaktadır ve bölüm 3.2.1. de müzik ve konuşma fonksiyonlarına uygun olabilecek modellerin değerlendirilmesi yapılmıştır.

Sonuç olarak akustik iyileştirmeye yönelik salonun kullanım amacının yoğunluğunun bilinmesi önem taşımaktadır. Salonun konuşma yada müzik amaçlı kullanımı farklı akustik önlemler alınmasını gerektirmektedir. Müzik amaçlı kullanım daha uzun bir reverberasyon süresi gerektirmekte ve yansıtıcı

yüzey eklenmesi ile oluşturulan modellerin daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmektedir. Konferans ya da ders amacı için kullanım ise yerde ve arka duvar yüzeylerinde soğurucu malzeme kullanılan modellerde daha iyi sonuçlar vermektedir.

Kullanım sıklığı açısından müzik ve konuşma eşdeğerde ise değişebilir (hareketli) yüzey tasarımına gidilmeli ve akustik amaçlı paneller bilgisayar simülasyonu yardımıyla gereksinime göre yeterli miktar ve yerlerde yansıtıcı ve soğurucu yüzey malzemeleri ile oluşturulmalıdır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmanın bir bölümü Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından desteklenen 06/2002-34 numaralı BAP Projesi kapsamında yapılmıştır. Bize bu olanağı sağlayan Gazi Üniversitesine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Shankland, R.S., “**The development of Architectural Acoustics**”, American Scientist, Vol. 60, March-April, pp.201-209. 1972
2. Lawrence, A., **Architectural Acoustics**, Elsevier Pub.Com.Ltd. Norfolk.1970
3. Kuttruff, H., **Room Acoustics**, Applied Science Publishers Ltd., London.1979**Applications**, McGraw Hill Book Company, New York, USA (re-printed by ASA), 1989.
4. Moore, J.E., **Design For Good acoustics and Noise Control**, The MacMillan Press Ltd., London.1978
5. ECOTECT v.5.20, <http://www.squ1.com>, (son erişim tarihi, Mayıs, 2007).
6. Kurtay C.,(Proje Yürütücüsü) **Gazi Üniversitesi Rektörlük Binasındaki Mimar Kemaleddin Salonu'nun Yapay Aydınlatma ve Akustik Açısından İrdelenmesi**. Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi No: 06/2002-34, Ankara.Temmuz,2004
7. Ginn, K.B., **Architectural Acoustics**, Brüel and Kjaer, Naerum Offset, Denmark. 1978
8. Beranek, L.L., **Music, Acoustics and Architecture**, John Wiley and Sons Inc.1962
9. Cremer, L. and Müller, H.A., **Principles and Applications of Room Acoustics**, Vol.1, Translated by T.J. Schultz, Applied Science Publishers, London and New York.1982
10. Kirszenstein, J., **An Image Source Computer Model for Room Acoustics Analysis and Electroacoustic Simulation**, Applied Acoustics, Vol.17, pp.275-290.1984
11. Sörgüç, M., **Analysis of Sound Field in Enclosed Spaces by Method of Image Sources**, Unpublished Master's Thesis, M.E.T.U. Ankara.1990
12. Topaktaş, L., **Analysis of Sound Field in Enclosed Spaces by Ray Tracing Technique**, Unpublished Master's Thesis, M.E.T.U. Ankara.1990
13. Arıkan, S. and Çalışkan, M., **Odalardaki Ses Düzeyi Dağılımının Bilgisayar Aracılığı ile Belirlenmesi**, TÜBİTAK, 1. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu, 12-14 Eylül, ODTÜ, Ankara. 1984
14. İrklı Eryıldız, D., **The Acoustical Properties of Ancient Theatres: Their Computer Simulation and Measurements**. The III rd International Symposium on Lycia, Vol.1, 7-10 November, 2005.
15. Diracdelta, “Reverberation time”, **Diracdelta Science and Engineering Encyclopedia**, version 2.3, <http://www.diracdelta.co.uk>, (son erişim tarihi, Mayıs, 2007).
16. Marsh, A. J., “**Performance Analysis and Conceptual Design, Part A-Discussion**”, Doctor of Philosophy Thesis, The University of Western Australia School of Architecture and Fine Arts, Australia, 1997.
17. Sabine, W. C., “**Collected Papers on Acoustics**”, Harvard University Press, Massachusetts, USA, 1922 (re-printed in 1964).
18. Eyring, C. F., “Reverberation time in dead rooms”, **Journal of the Acoustic Society of America**, volume:1, pp. 217-241, 1929.
19. A. C. Gade, “**Acoustics of Concert Halls and Rooms**”, Chapter-9, edited by Rossing, T., “Springer Handbook of Acoustics”, Springer publications, 2007.
20. Millington, G., “A Modified Formula for Reverberation” **Journal of the Acoustic Society of America**, volume:4, pp. 69, 1932.
21. Sette, W. J., “A New Reverberation time Formula”, **Journal of Acoustic Society of America**, volume:4, pp. 160, 1933.
22. Held, B.R., Mitchell, B.W., Hurst, C.J., and Mitchell, L.D., **Sound Pressure Level Prediction in Large Rooms Using Geometric Acoustics**, Proceedings, Inter-Noise76, pp.259-262. 1976
23. Funkhouser, T., Tsingos, N., Carlbom, I., Sondhi, M., West, J. E., Pingali, G., Ngan, A., **A Beam Tracing Method for Interactive Architectural Acoustics**, Journal of the Acoustics Society of America, Volume 115 (2), February, pp. 739-756, 2004.
24. Shaw, N., “Architectural Acoustics”, **First Pan-American / Iberian Meeting on Acoustics**, Cancun, Mexico, 2-6 December, 2002.
25. Knudsen, O.V. and Harris, C.M., **Acoustical Designing in Architecture**, Acoustical Society of America. 1978 .
26. Izenour, G.C. **Theatre Design**, McGraw-Hill Book Company.1977.
27. Krokstad, A., Strom, S. And Sorsdal, S., **15 years Experience with Computer Ray Tracing**,

- Applied Acoustics, Vol.16, No.4, pp.291-312. 1983.
28. Krokstad,A., Strom,S. And Sorsdal,S., **Calculating the Acoustical Responce of a Room by Ray Tracing**, Journal of Sound and Vibration, Vol.8, pp.118-122. 1968.
29. Schroder,M.R., **Toward Better Acoustics for Concert Halls**, Physics Today, October, pp.24-30, 1980.
30. Sirel, Ş., **Yapı Akustiği I, Temel Bilgiler**, İnkılap ve Aka Basımevi, İstanbul. 1974.