

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KÜÇÜK ÇINLAMA ODASI TASARIMI VE AKUSTİK MALZEMELERİN SES
YUTUM VE İLETİM ÖZELLİKLERİNİN ÖLÇÜMÜ**

YUSUF ÇAKIRCA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNA TEORİSİ VE KONTROL PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ MERAL BAYRAKTAR**

İSTANBUL, 2018

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÜÇÜK ÇINLAMA ODASI TASARIMI VE AKUSTİK MALZEMELERİN SES
YUTUM VE İLETİM ÖZELLİKLERİNİN ÖLÇÜMÜ**

Yusuf ÇAKIRCA tarafından hazırlanan tez çalışması 20.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Meral BAYRAKTAR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Meral BAYRAKTAR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Baha ZAFER
İstanbul Üniversitesi

ÖNSÖZ

Tez yazım sürecimde fikirleriyle yol göstererek desteğini esirgemeyen danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Meral Bayraktar'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmasına konu alfa kabin Novosim Mühendislik Hizmetleri bünyesinde üretilmiştir. Sağladığı imkânlardan dolayı Novosim Mühendislik Hizmetlerine, değerli fikirleri için şirket yöneticisi Dr. Mert Doğanlı'ya ve iş arkadaşım Ufuk Uzundağ'a ayrıca teşekkür ederim.

Son olarak, her zaman moral desteği ve enerjisiyle yanımda olan sevgili eşim Myroslava'ya çok teşekkür ederim.

Haziran, 2018

Yusuf ÇAKIRCA

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Gelen, yansıyan, yutulan ve iletilen ses enerjisi 11
Şekil 2.2	Kapalı (a) ve açık (b) gözenekli malzeme yapısı [1]..... 12
Şekil 2.3	Akustik Malzemeler [3] 13
Şekil 2.4	(a) Diyafram (panel) ve (b) Helmholtz Rezonatör Yutucular [1] 14
Şekil 2.5	Helmholtz rezonatörü şematik gösterimi 15
Şekil 2.6	Farklı yutucular için rastgele geliş yutum katsayısı eğrileri [1] 15
Şekil 2.7	İsotropik ve Ortotropik panel malzemelerin ses iletim kabiliyetinin frekans bölgelerine göre değişimi [4] 18
Şekil 2.8	Akustik alanın ve yapısal dalgaların eşleşmesi. (a) Kritik frekans ve üzerinde panel dalgalarının yayılımı, (b) kritik frekans altında bölgesel yayılım [4]... 19
Şekil 2.9	Empedans tüpü ölçüm yöntemi şematik gösterimi 23
Şekil 2.10	Çınlama Odası 27
Şekil 2.11	İki mikrofona serbest alan yutum katsayısı test düzeneği [1] 30
Şekil 2.12	Açık uçlu empedans tüpü ile yerinde ses yutum ölçümü 31
Şekil 2.13	Alfa Kabin [53] 32
Şekil 2.14	Ses iletim kaybı ölçümü için empedans tüpü düzeneği [1]..... 34
Şekil 2.15	Ses İletim Kaybı odası ölçümü şematik gösterimi..... 37
Şekil 2.16	a) İki çınlama odalı ses iletim kaybı ölçüm düzeneği, b) Bir çınlama odası ve bir yankısız ortam ses iletim kaybı ölçüm düzeneği..... 37
Şekil 2.17	İki yankısız odalı ses iletim kaybı ölçüm düzeneği 38
Şekil 2.18	Yankısız oda ve çınlama odalı ses iletim kaybı ölçüm düzeneği 38
Şekil 3.1	İkiz alfa kabin..... 41
Şekil 3.2	Ortalama doğal frekans aralığı ve boyutsuz frekans faktörü [28] 44
Şekil 3.3	Alfa kabin boyutları 46
Şekil 3.4	Çeşitli oda ölçü oranlarının doğal frekans dağılımı 46
Şekil 3.5	Düzensiz şekilli oda ve dikdörtgensel odanın sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen doğal frekans dağılımı 47
Şekil 3.6	Panel ve küresel dağıtıcılar [40] 48
Şekil 3.7	Farklı dağıtıcı tiplerinin dağınık alan üzerine etkisi [40] 49
Şekil 3.8	Dağıtıcı sayısının oda tipine göre ses yutumu üzerine etkisi [39]..... 50
Şekil 3.9	Dağıtıcının ses yutumu üzerindeki etkisi..... 51
Şekil 3.10	Ahşap (sol) ve Beton (sağ) duvar yapısına sahip alfa kabinler 52
Şekil 3.11	Kabin duvar yapısı 53
Şekil 3.12	Numune penceresi kapağı 53
Şekil 3.13	Numune tutucu aparat 54

Şekil 3.14	Numune çerçevesi.....	55
Şekil 3.15	Alternatif numune bağlama yöntemleri ile ses yutum eğrileri [74]	55
Şekil 3.16	Kabin içi ses basınç seviyesi ölçüm noktaları	57
Şekil 3.17	Farklı mikrofön pozisyonlarında kabin içi ses basınç seviyeleri	57
Şekil 3.18	Farklı mikrofön pozisyonlarında kabin içi ses basınç seviyelerinin standart sapmaları.....	58
Şekil 3.19	Bağıl standart sapma eğrisi	59
Şekil 3.20	Kabin içi doğal frekans dağılımı.....	60
Şekil 3.21	Farklı zamanlarda yapılan ses yutum katsayısı ölçümlerinin %95 doğruluk aralığı.....	61
Şekil 4.1	Akustik malzemeler	62
Şekil 4.2	STL numune penceresi kapağı.....	63
Şekil 4.3	Numunenin, numune çerçevesine ve oda tabanına yerleştirilmesi	64
Şekil 4.4	Ses düşüm eğrisi.....	65
Şekil 4.5	3 farklı yutucu malzemeler için ses yutum katsayısı eğrileri	66
Şekil 4.6	Farklı kabin içi nem değerlerinde ses yutum katsayısı.....	66
Şekil 4.7	Ses iletim kaybı ölçümleri için birleştirilmiş kabinler	67
Şekil 4.8	Numune tuturucu aparat	68
Şekil 4.9	5 mm kalınlıktaki ağır bariyer malzemenin ses iletim kaybı ölçüm sonuçları..	69
Şekil 4.10	Ses iletim kaybı ölçümleri için %95 doğruluk aralığı	69
Şekil 5.1	Laboratuvarlar arası ses yutum katsayısı kıyaslaması.....	71
Şekil 5.2	Rijitleştirilmiş kabin duvarlarının STL'e etkisi.....	72
Şekil 5.3	Küresel mikrofön pozisyonunda ses basınç alanı standart sapması.....	72

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Ses yutum katsayısı ölçüm yöntemleri [1] 22
Çizelge 2.2	20°C Sıcaklık ve atmosferik basınç altında m hava yutum sabiti 28
Çizelge 3.1	Kabin içi ortalama yüzey yutum katsayıları..... 60
Çizelge 4.1	Test numunesi malzeme bilgileri 63

KÜÇÜK ÇINLAMA ODASI TASARIMI VE AKUSTİK MALZEMELERİN SES YUTUM VE İLETİM ÖZELLİKLERİNİN ÖLÇÜMÜ

Yusuf ÇAKIRCA

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Meral BAYRAKTAR

Akustik malzemeler olarak tanımladığımız, ortamın akustik davranışını değiştirmek için kullanılan malzemelerin, bu etkiyi oluşturan akustik özelliklerinin doğru olarak belirlenmesi otomotiv endüstrisi ve mimaride büyük önem taşımaktadır. Mimaride genellikle konferans salonları, müzik stüdyoları ve konser salonları gibi akustik olarak özel tasarım gerektiren mimari yapılarda kullanılırlar. Otomotivde ise araç içi gürültü kontrolünde geniş kullanım alanına sahiptirler. Özellikle otomotiv endüstrisinde gelişen rekabet ortamı ve artan konfor talepleri ile birlikte önemli bir konfor parametresi olan gürültünün kontrolü için kullanılan akustik malzemelerin daha hassas ve doğru ölçümü önem kazanmıştır.

Akustik malzemelerin özelliklerinin ölçülmesinde uluslararası kuruluşlarca standart hale getirilmiş yöntemler ve üzerinde çalışmaların devam ettiği standart dışı yöntemler bulunmaktadır. Standart dışı yöntemler arasında küçük çinlama odaları; modüler kullanım imkânı sunması, az yer kaplaması, düşük maliyetli olması ve ürün seviyesinde numune ölçümüne olanak sağladığı için özellikle otomotiv endüstrisinde tercih edilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında standart dışı yöntemlerden olan, alfa kabin olarak da isimlendirilen küçük çinlama odası akustik tasarımı ve üretimi gerçekleştirilerek, akustik olarak tasarımında dikkat edilmesi gereken parametreler ve standart çinlama odalarından ölçekleme yapılırken akustik açıdan karşılaşılan problemlere üretilen

özmler üzerinde durulmuştur. Testlerin otomasyonu ve sonuçların işlenebilmesi için Python ve Qt programlama dili kullanılarak kabin yazılımı yapılmıştır.

Tasarımı ve üretimi yapılan kabin ile otomotiv endüstrisinde kullanılan akustik malzemelerde aranan en önemli iki özellik olan ses yutum ve ses iletim kaybı özelliklerinin ölçümü gerçekleştirilerek referans kabin olarak kabul edilen Rieter firmasının kabini ile kıyaslama yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Küçük çınlama odası, malzemelerin akustik özelliklerinin ölçümü, akustik malzemeler, akustik malzemelerin yapısı, alfa kabin



DESIGN OF SMALL REVERBERATION ROOM AND MEASURING THE SOUND ABSORPTION AND TRANSMISSION CHARACTERISTICS OF ACOUSTIC MATERIALS

Yusuf ÇAKIRCA

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assist. Prof. Dr. Meral BAYRAKTAR

Determining the acoustical properties of acoustic materials, which are used to change the acoustical response of the environment, play an important role in automotive and architectural applications. In architecture, they are specially designed and selected in order to meet certain criteria in conference and concert halls and studios. Whereas in automotive industry, they are widely used to meet interior noise level targets. Especially in automotive industry, due to high comfort demand of the customers and the costs associated with these parts, it is very important to correctly select and size the material used.

In order to determine these properties, there are standardised and non- standardised methods. Non- standardised methods include small reverberation rooms which are one of the highly preferred ones because they provide minimal space requirements, modularity options, cost efficiency and component level testing possibilities.

In this thesis, a small reverberation room (also called alpha cabin) is designed and manufactured. During the development process, several iterations have been done to understand the effect of different parameters on material properties. In order to automate the tests and process the results, a software code was developed in Python and Qt.

After the completion of the cabin, different materials were tested for absorption and sound transmission loss properties and compared against a reference Rieter cabin and the results were evaluated.

Keywords: Small reverberation room, measuring acoustic characteristics of materials, acoustic materials, structure of acoustic materials, alpha cabin



1.1 Literatür Özeti

Akustik malzemelerin özelliklerinin doğru olarak belirlenmesi otomotivde konfor çalışmalarında, mimari akustikte yalıtım ve akustik oda çalışmalarında ve akustik malzeme geliştiricileri için oldukça önemlidir. Özellikle otomotivde konfor parametrelerini iyileştirmek için yapılan akustik çalışmaların ticari olarak rekabet gücü kazandırması bu alanda yapılan akademik çalışmaların sayısını da artırmıştır.

Otomotivde sıklıkla kullanılan yutucu akustik malzeme tipleri, bu malzemelerin özellikleri ve yutum özelliklerinin ölçüm yöntemleri hakkında bilgi için [1] deki kitaptan faydalanılmıştır. Ölçüm yöntemlerinin detayları konusunda genel olarak bu kaynaktan yararlanılmıştır. Yutucu malzeme çeşitlerine göre ses yutum mekanizması hakkında detaylı bilgi için ise [2] deki kitaptan faydalanılabilir. Yine Vidinlimen tarafından 2010 yılında yapılmış olan çalışmada otomotiv endüstrisinde kullanılan akustik malzemelerin özellikleri hakkında detaylı bilgi verilmiş, Comet yazılımı ile malzeme modellemesi yapılarak deneysel yöntemler ile karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir [3].

Bu tez çalışması kapsamında tasarımı gerçekleştirilen küçük çınlama odalarının teorik temelleri için genel olarak [4] ve [5] deki kitaplardan faydalanılmıştır. Ses iletim kaybı hakkında teorik bilgi için de bu kaynaklara başvurulmuştur. Temel akustik bilgileri ve kapalı alan akustiği konularında Jacobsen vd. tarafından yazılan [6] daki kitaptan faydalanılmıştır.

Ses yutum ve ses iletim katsayısı ölçümleri uluslararası standartlar ile düzenlenmiştir. Çınlama odalarında ses yutum ölçümleri ISO 354 ve ASTM C423 ile standardize edilmiştir

[7], [8]. Dağınık alan yönteminin kullanıldığı ses iletim kaybı ölçümleri için ise ASTM E90 ve ISO 140 standartlarından faydalanılmıştır [12], [13]. Tezde tasarımı yapılacak olan alfa kabinler küçük birer çınlama odalarıdır. Alfa kabin ses yutum ölçüm prosedürleri ve tasarım detayları için bu standartlardan faydalanılmıştır.

Ses yutum ve ses iletim katsayısı ölçüm yöntemlerinden olan empedans tüpü ölçümlerinde numunenin düzgün kesilmesi ve tüp içerisine düzgün yerleştirilmesi doğru ölçüm yapılabilmesi için önemlidir. Ueno ve Kino [17] deki çalışmalarında empedans tüpü ölçümlerinde numune boyutunun etkisini incelemişlerdir. Bu çalışma, empedans tüpü ölçümlerinde olması gereken numune boyutu hakkında gerekli bilgiyi vermektedir.

Çınlama odaları yönteminin teorik temelini oluşturan kapalı alanlarda ses alanı ve dağınık alan yaklaşımı konusunda Ver ve Beranek'in [18] deki kitabı ile Ingard'ın [19] daki kitabı oldukça detaylı bilgi içermektedir. Kapalı alanlarda dağınık ses alanı ve çınlama konularında Möser'in [20] deki kitabından faydalanılabilir. Ayrıca aynı kaynaktan empedans tüpünde ses yayılımı ve empedans tüpü ölçümleri hakkında da bilgi bulunabilir.

Çınlama odalarında çınlama süresinin hesaplanmasında kullanılan temel yaklaşım, 1922 yılında Harward Üniversitesi tarafından basılan [21] deki kitapta Sabine tarafından ortaya konmuştur. Sabine'e alternatif olarak 1930 yılında Eyring tarafından [22] deki çalışma yapılarak yeni bir formülasyon geliştirilmiştir.

Jacobsen [24] deki çalışmasında çınlama odalarında ses alanını tanımlayan iki temel yaklaşım hakkında giriş seviyesinde bilgi vermektedir. Bu yaklaşımlardan birincisi, dalga denkleminin ön tanımlı sınır şartları altında analitik veya numerik yöntemlerle çözümü, ikincisi ise ses alanının istatistiksel olarak açıklanmasıdır. Çalışmasında bu yöntemler ile ses gücü ölçümü, ses yutum ölçümü ve ses iletim kaybı ölçümlerinden kısaca bahsedilmiştir.

Nutter 2006'da yaptığı çalışmada, çınlama odalarında ses gücü ve ses yutum ölçümlerini enerji yoğunluğu metodunu kullanarak incelemiştir. Sonuçları standartların önerdiği yöntemler ile kıyaslayarak enerji yoğunluğu yöntemi alternatif olarak kullanılabilir mi, bu yöntem ile çınlama odası ölçümlerinin uygulanabilirliği Schroeder frekansı altına genişletilebilir mi gibi sorulara cevap aramıştır. Sonuç olarak enerji yoğunluğu yöntemi

ile ses yutum ölçümlerinde daha az varyasyon olduğu ve düşük frekans ölçümlerinde daha iyi sonuç elde edildiğini öne sürmüştür. Benzer sonuçların küçük çınlama odalarında da elde edildiğini söylemiştir [25].

Hudgson tarafından [26] daki çalışmada, dağınık alan teorisinin oda yüzeylerinin yansıtıcılık seviyesine ve kullanılan dağıtıcılara göre uygulanabilirliği ışın takip yöntemi (ray tracing method) kullanılarak incelenmiştir. Çalışmasında panel yansıtıcı şeklindeki hacim ses dağıtıcıların (volume diffuser) sayısı arttıkça sesin iki dağıtıcı arasında sıkışıp kaldığını ve diğer yüzeylere ulaşmadığını söyleyerek kararlı durumda da ses düşümünde varyasyonlar olduğunu belirtmiştir.

Çınlama süresi ölçümü üzerine standartlarda belirtilen iki yöntem bulunmaktadır. Birincisi kesilmiş gürültü yöntemi, ikincisi ise tümleşik impuls cevabı yöntemidir. Tümleşik impuls cevabı yöntemi ile ilgili detaylı inceleme 1964 yılında Schroeder tarafından yapılmıştır [27].

Çınlama odalarında tam dağınık alanın oluşturulması problemlili bir konu olduğundan, dağınık alanı etkileyen faktörler ve dağınık alan teorisinin hangi durumlarda uygulanabilir olup olmadığı üzerine oldukça fazla çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan biri Hodgson tarafından yapılan [28] daki çalışmadır. Hodgson bu çalışmada, oda şekli, yüzey yansıtma miktarı, dağıtıcı yoğunluğu ve yüzey yutumu parametrelerini kararlı hal durumunda ve çınlama esnasında Eyring ve Sabine yaklaşımlarından hangisinin daha doğru sonuçlar verdiğini inceleyerek genel bir tablo sunmuştur. Nicolas ve Nelisse tarafından [29] da yapılan çalışmada ise dağınık alanın tanımı verilerek dağınık alanı karakterize etmek için kullanılan yöntemler anlatılmıştır.

Ayrıca Schultz tarafından [30] da yapılan çalışma ile çınlama odalarında ses yayılımının değerlendirilmesinde kullanılan yöntemler hakkında genel bilgi verilmiştir. Abdou ve Guy tarafından [31] daki çalışmada ise dağınık alan kalitesinin göstergelerinden olan geçici ve konumsal dağılım göstergeleri verilmiştir.

Düşük frekanslarda oda içerisindeki havanın modları, basınç dağılımını ve dolayısı ile ses alanının dağınıklığını etkilemektedir. Bolt [32] de yaptığı çalışma ile çeşitli ebatlardaki dikdörtgensel ve birbirine paralel herhangi iki kenarı olmayan düzensiz şekilli odalarda doğal frekans dağılımlarını inceleyerek oda şeklinin ve ölçülerinin dağınık alan üzerindeki

etkisini göstermiştir. Yine Bolt tarafından yapılan çalışmalarla oda kenar ölçülerinin dikdörtgensel odalarda doğal frekans dağılımına etkisi incelenmiştir ve düşük frekanslar için istatistiksel olarak bir homojenlik göstergesi belirlenmiştir [33], [34], [35]. Bolt [36] daki dikdörtgensel odalar için yaptığı istatistiksel çalışmada ise hacmi ve kenar ölçüleri bilinen odanın homojenliğinin kolayca bulunabileceği bir tablo oluşturmuştur.

Blaszak 2008 yılında Bolt'un oda şeklinin homojenlik üzerine etkisini gösteren tanımının yetersiz olduğunu ileri sürerek kendi tanımını gösteren çalışmasını yapmıştır [37]. Bu çalışma sonucunda Bolt gibi, ideal dağılımın görüldüğü oda kenar ölçüsü oranlarını vermiştir.

Sato ve Koyasu 1958'de yaptıkları "Odalardaki ses alanına oda şeklinin etkisi" isimli çalışmaları ile yedi değişik şekildeki odanın doğal frekans dağılımına ve çınlama süresi üzerine etkisini göstermişlerdir. Çalışma sonucunda dış bükey düzensiz şekilli (herhangi iki kenarı birbirine paralel olmayan) beşgen, en homojen dağılımı veren şekil olarak verilmiştir [38]. Daha sonra 2004 yılında Toyoda vd. tarafından yapılan çalışmada yine oda şeklinin ve oda içerisinde kullanılan dağıtıcı sayısının ses yutum katsayısı üzerine etkisi incelenmiştir [39]. Çalışmada dikdörtgen ve birbirine paralel herhangi iki kenarı bulunmayan beşgen oda incelenerek her iki tip odada dağıtıcı sayısı arttıkça yutum katsayısı değerlerinin arttığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca dikdörtgensel şekilli odada dağıtıcıların etkisinin daha fazla olduğu gösterilmiştir.

Dağınık alan kalitesini etkileyen geometrik faktörlerden bir diğeri oda içerisine yerleştirilen dağıtıcı yüzeylerdir. Nolan vd. [40] daki çalışmalarında farklı dağıtıcı tiplerinin çınlama odalarında dağınıklık üzerine etkisini göstermişlerdir. Çalışma sonucunda oda duvarlarına yerleştirilen panel tip dağıtıcıların daha etkili olduğu gösterilmiştir. Nolan bu çalışmasında, ses alanındaki dağınıklığın göstergesi olarak dağınık alan faktörünü temel almıştır.

Doğal frekansların dağınık alan üzerine etkisi belli bir frekans değerine (geçiş frekansı) kadar görülmektedir. 1962'de Schroeder ve Kuttruff tarafından yapılan "Odada frekans cevap eğrileri üzerine" isimli çalışmada Schroeder frekansı olarak da isimlendirilen bu geçiş frekansı ortaya konmuştur [41], [42].

Dağınık alan yönteminin temel alındığı ses yutum katsayısı ölçümlerinde kullanılan Sabine formülasyonu ses alanının tam dağınık olduğunu varsayar. Ölçümlerde ses alanının dağınıklığını etkileyen diğer bir etken numunenin sonlu olmasından kaynaklanan kenar etkisidir (edge effect). Kenar etkisinin hesaba katıldığı yutum katsayısı efektif yutum katsayısı olarak isimlendirilmektedir. Kuttruff'un [43] deki kitabından kenar etkisi ile ilgili detaylı bilgi alınabilir. Ayrıca Kuttruff'un ilgili kitabında kapalı alanlarda ses alanı dalga teorisi temel alınarak anlatılmıştır. Kenar etkisi üzerine Sauro vd. tarafından 2009'da yapılan çalışmalarda aynı yüzey alanına sahip fakat farklı kenar uzunluklara sahip olacak şekilde geometrik şekillere ve parçalı yüzey alanına sahip numunelerin ses yutum ölçümleri yapılarak kenar etkisinin yutum katsayısı üzerine etkisi gösterilmiştir [44], [45].

Simülasyon yazılımlarının gelişmesiyle oda akustiğinin bu yazılımlar aracılığı ile incelenip akustik özelliklerinin belirlenmesi de kolaylaşmıştır. CAD yazılımları ile de bütünleştirilebilen bu yazılımlar sayesinde geometrisi oluşturulan odanın akustik özelliklerinin tespiti mümkün olmaktadır. Pelzer vd. tarafından yayınlanan [54] deki makalede simülasyon teknikleri incelenerek uygulama yöntemlerinden bahsedilmiştir.

Ses yutum ve ses iletim kaybı ölçümlerinde kullanılan ve bu tez çalışmasının da ana konusu olan alfa kabinler küçük birer çınlama odası olup otomotiv endüstrisinde kullanılan standardize edilmemiş ölçüm sistemleridir. Toyota, Renault ve Fiat gibi otomotiv firmaları küçük çınlama odalarını kendi belirledikleri yöntemlere göre ses yutum ve iletim ölçümleri için kullanmaktadırlar [50], [51], [52]. Ayrıca Autoneum firmasının ürettiği alfa kabin birçok otomotiv firması tarafından kullanılmaktadır ve alfa kabin tasarımlarında referans olarak tercih edilmektedir [53].

Küçük çınlama odası tasarımına bir örnek olarak 2003 yılında Toyota prosedürünü temel alarak Jackson tarafından yapılan tasarım incelenmiştir [55]. Jackson'ın bu çalışmasında oda içerisinde yüzey yansıtıcılığını artırmak için duvarlar seramik ve boşluksuz olarak tasarlanmıştır.

Küçük çınlama odalarında (alfa kabin) ses yutum ölçümü standardize edilmemiş bir yöntemdir. Veen ve Saha küçük çınlama odaları ile Round Robin testleri gerçekleştirerek bu kabinlerde yapılan ölçümlerin standardize edilmiş kabinler ile kıyaslanabilir sonuçlar

elde edilip edilemeyeceğini incelemişlerdir [56], [57]. Çalışmalar sonucunda, düzgün tasarlanmış küçük çınlama odalarının standardize edilmiş odalar ile karşılaştırılabilir sonuçlar verdiği görülmüştür.

Tez çalışmasında tasarımı yapılan alfa kabinler, ses iletim kaybı ölçümlerinin de yapılabilmesi için iki kabin olarak tasarlanmıştır. Malzemelerde ses iletimi genel olarak yapısal kaynaklı ve hava kaynaklı olarak ikiye ayrılabilir. Panel malzeme veya duvarlarda ses iletimi birkaç davranışsal bölgeye ayrılır. Malzemeler üzerinden ses iletimi, üç farklı ses geliş durumu (dik, açılı ve dağınık) için çeşitli malzeme yapılarında Fahy ve Gardonia'nun Sound and Structural vibration isimli kitabında detaylı olarak anlatılmıştır [58]. Teorik arka plan için [58]'deki kitap ile birlikte [4] ve [5]'deki kitaplardan da istifade edilmiştir.

London [59]'daki çalışmasında çınlamalı ses alanında, yani restgele geliş ses alanında tek sıra duvarlar için ses iletim mekanizmasını incelemiştir. Yaptığı deneysel çalışmalarla homojen duvarların üç önemli fiziksel özelliğinin ses iletim kaybını belirlediği sonucuna varmıştır. Bu üç fiziksel özellik; duvarın kütlesi, sönümü ve eğilme dalgalarının yayılma kabiliyetidir.

Ses dalgalarının numune üzerine dik geldiği durumda ses iletim kaybı hesabı için literatürde genel olarak iki yöntem bulunabilir. Birincisi transfer matris yaklaşımı temeline dayanır, ikincisi ise dalga alanının analizi teorisini temel alır. Salissou ve Panneton bu iki yöntemden dalga alanı analizi yöntemi ile empedans tüplerinde ses iletim kaybı ölçümü için yeni bir yaklaşım geliştirerek klasik yöntemler ile kıyaslamasını yapmışlardır [60]. Transfer matris yaklaşımını içeren yöntemler ve dalga analizi yöntemi Tao ve Seybert tarafından [61]'deki çalışmada verilmiştir. Transfer matrisi yöntemlerinden en sık kullanılan iki-yük ve iki-kaynak (two-loads, two-source) yöntemleri Munjal ve Doige tarafından [62]'deki çalışmada verilmiştir. Bu iki yöntem empdans tüpü ölçümlerinde dört mikrofona yöntemi olarak da isimlendirilir.

Song ve Bolton [63] deki çalışmalarında dört mikrofona empedans tüpü ile transfer matris yaklaşımını kullanarak otomotivde kullanılan yalıtım malzemeleri için yansıma ve iletim katsayılarını ve çeşitli numune parametrelerinin etkisini incelemiştir. Ayrıca metodlar arasında karşılaştırmalı olarak sonuçlar da yorumlanmıştır. Dalga alanı analizi

yöntemi kullanılarak iki mikrofonlu empedans tüpünde ses iletim ölçümü çalışması ise Seybert ve Ross tarafından yapılmıştır [64].

Crocker ve Price tarafından 1969 yılında yapılan çalışmada, klasik ses iletim problemleri yöntemlerinde kullanılan kütle yasasının sönüm ve rijitliği göz ardı ettiğini söyleyerek rijitlik, sönüm ve panel sonlu ölçülerinin de etkisini hesaba katan istatistiksel enerji metodu kullanılarak ses iletim kaybı incelenmiştir [65]. Minten vd. tarafından 1987’de yapılan çalışmada ise Crocker ve Price’ın istatistiksel enerji analizi yöntemi verilerek, geleneksel iki mikrofonlu ses iletim kaybı ölçümlerinin istatistiksel enerji analizi yöntemi ile kıyaslaması yapılmıştır [66].

Waterhouse [67] deki çalışmasında, çınlama odalarında yüzeylerde, yüzey birleşim yerlerinde ve köşelerde gelen ses dalgası ile yansıyan ses dalgasının çakışmasından dolayı enerji yoğunluğunda artış olduğunu ortaya koymuştur. Waterhouse etkisi olarak isimlendirilen bu durumu ses iletim kaybı ifadesine düzeltme faktörü olarak eklemiştir.

1981’de Crocker vd tarafından panel malzemelerin ses iletim kaybı ölçümleri için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem malzeme üzerine gelen ve iletilen sesin akustik şiddetinin ölçülmesine dayanmaktadır. Bu yöntemin avantajı olarak geleneksel iki çınlama odalı yöntemlerin yerine tek bir odanın kullanılabilmesi gösterilmiştir [68].

Halliwell ve Warnock ise 1985’de, Crocker vd. tarafından geliştirilen yeni yöntemin geleneksel iletim kaybı ölçüm yöntemi ile karşılaştırmasını farklı oda koşullarında gerçekleştirmişlerdir. Ses şiddeti ölçümüne dayalı yöntemin daha tekrarlanabilir sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca her durum için Waterhouse düzeltme faktörünü de uygulayarak karşılaştırmaları tekrarlamışlardır [69].

Çınlama odalarında dağınık ses alanı en önemli gerekliliklerden biridir. Dağınık alanı elde etmek için yapılan çalışmalara rağmen, çınlama odalarında yeterli dağınık alan elde edilip edilemediği hala soru işaretidir. Özellikle laboratuvarlar arasında tekrarlanabilirlik oldukça zayıftır. Çınlama odalarında ses alanının dağınıklığını tanımlamak için farklı çalışmalar yapılmıştır fakat ölçüm yöntemi üzerinde uygulanmak üzere ortak bir yöntem geliştirilmemiştir. Vercammen ve Lautenbach [70] deki çalışmalarında, tercihen daha pratik bir yöntem olan çınlama sürelerindeki varyasyonun ölçümüne dayanan yöntemi vermişlerdir. ASTM C423 standardı da bu yöntemi içermektedir.

Vercammen ve Latuenbach'ın çalışmalarında belirttiği çınlama süresindeki varyasyonun teorisi Davy tarafından [71] ve [72] de açıklanmıştır.

Çınlama odalarında ses yutum ve ses iletim kaybı ölçümlerinde yüksek seviyede geniş band ses kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Kleckner vd. çınlama odalarında kullanılacak hoparlörün seçimi ve hoparlör karakteristiklerinin incelenmesi üzerine yaptıkları çalışmada çınlama odalarında gerekli olan ses basınç seviyesinin üreticinin verdiği hoparlör karakteristiklerine göre nasıl belirlendiğini göstermişlerdir [73].

Çınlama odalarında numunenin bağlantı şekli yutum katsayısı üzerinde etkili olmaktadır. Kenarları açıkta olan numunelerde kenar etkisinden dolayı yutum değerleri daha yüksek çıkmaktadır. Wentzel vd. alternatif numune yerleştirme yöntemleri üzerine yaptıkları çalışmada, kabin tabanına derinliği ayarlanabilen girinti yaparak numunenin yüzeyinin kabin tabanına sıfır olacak şekilde monte edilmesini sağlamışlardır. Bu monte şekli ile yapılan ses yutum ölçümlerini, kenarları tamamen açıkta numune ve yansıtıcı bir çerçeve içine yerleştirilmiş numune ölçümleri ile karşılaştırmışlardır. Çıkıntısız monte ismini verdikleri bu montaj yöntemi ile elde edilen sonuçların büyük çınlama odalarında elde edilen sonuçlara daha yakın çıktığını göstermişlerdir [74].

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışması ile otomotiv endüstrisinde kullanılan akustik malzemelerin, ses yutum ve ses iletim kaybı özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan alfa kabin tasarım ve üretiminin yapılması amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda alfa kabinlerin teorik temelleri ve üretim detayları hakkında bilgi verilerek kabin doğrulamaları yapılacaktır. Üretilen kabin ile otomotivde sık kullanılan akustik malzemelerin ses yutum ve iletim ölçümleri yapıp referans olarak kabul edilen kabin ölçümleri ile karşılaştırılması yapılacaktır.

1.3 Hipotez

Bu tez çalışması ile tasarımı ve üretimi yapılan küçük çınlama odaları, oda içerisindeki akustik alanın tam dağınık ses alanı özelliğine sahip olduğu varsayımı ile çalışmaktadır. Tam dağınık ses alanı, kapalı alan içerisindeki bir ses kaynağından üretilen sesin her 1/3

oktav bandı merkez frekansında odanın her yerinde eşit ses basınç seviyesine sahip olduğu ve ses enerjisinin her yönde eşit dağıldığı ses alanı demektir. Oda duvarlarının ve oda içerisindeki herhangi bir malzemenin yutum özelliği ile çınlama süresi arasındaki ilişki bu varsayım üzerine kuruludur. Bu varsayım ile malzemelerin akustik özelliklerinin çınlama odalarında doğru bir şekilde belirlenebilmesi oda içerisindeki dağınık alanın tam olarak sağlanması ile olur denilebilir.

1.4 Tezin Konusu

Gerek mimari akustik alanında gerekse otomotiv sektöründe, gelişen teknoloji ile birlikte kalite ve konfor parametrelerinin iyileştirilmesine yönelik talep artmaktadır. Konfor taleplerinin yanı sıra, özellikle mimari alanda fiziksel ve psikolojik rahatsızlıklar doğuran gürültülü ortamlar, çevre yönetmelikleri ile de kontrol altına alınmaya çalışılarak bu alandaki iyileştirmeler zorunlu hale getirilmektedir. Gürültünün azaltılması çalışmalarının yanında, konferans salonları ve stadyumlar gibi belirli oranda sesin yansımalarının istendiği ortamlarda da tam tersi yönde malzeme özelliklerinin belirlenmesi istenebilir. Malzemelerin akustik özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, bu çalışmalar için önemli bir teknik adımı oluşturmaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe, üreticilerin birbirleri ile rekabet edebilmeleri, konfor parametrelerini iyileştirme kabiliyetleri ile doğrudan ilişkili hale gelmiştir. Bu noktada, otomotiv sektöründe önemli bir konfor parametresi olan gürültüyü etkili bir şekilde kontrol edebilmek için, kullanılan malzemelerin akustik karakteristiklerini iyi anlamak ve buna göre malzeme seçimi yapmak gerekmektedir. Otomotivde, malzemelerin ses yutum ve ses iletim özellikleri bu karakteristiklerden en önemli ve en çok ilgilenilen ikisidir. Araç içerisinde, koltuklarda ve iç kaplamalarda kullanılan malzemelerin ses yutum özelliği araç içindeki gürültünün kontrolü için bilinmesi gereken önemli bir parametredir.

Otomotiv endüstrisinde kullanılan akustik malzemeler genellikle, çok katmanlı tiftik haline getirilmiş pamuk ya da plastik temelli gözenekli elyaf malzemelerdir [3]. Bu malzemelerin akustik özelliklerinin belirlenmesinde çınlama odası ve empedans tüpü yöntemi gibi standardize edilmiş yöntemler ve özel olarak tasarlanmış alternatif yöntemler bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında akustik malzemelerin ses yutum ve ses iletim kaybı özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan alternatif yöntemlerden olan küçük çınlama odasının (alfa kabin) tasarımı yapılarak kabin tasarım parametrelerinin numerik yöntemler ve testler ile doğrulaması yapılacaktır.

1.5 Kapsam

Tez çalışmasının birinci bölümünde tez konusu ve literatürde konu ile ilgili yapılan çalışmalardan bahsedilecektir.

İkinci bölümde, otomotivde kullanılan akustik malzemelerin yapısal özellikleri hakkında bilgi verildikten sonra en önemli iki akustik özellik olan ses yutum ve ses iletim özellikleri hakkında teorik bilgi verilip bu özelliklerin ölçümünde kullanılan yöntemler hakkında bilgi verilecektir.

Üçüncü bölümde, malzemelerin akustik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan standart dışı yöntemlerden olan alfa kabinlerin tasarımı yapılacaktır. Daha sonra kabin üretimi yapılarak, akustik gereklilikleri karşılayabilmek için kabin üretiminde dikkat edilmesi gereken konular üzerinde durulacaktır. Üretimi yapılan kabinde otomotiv endüstrisinde sıkça kullanılan malzemelerin ses yutum ve ses iletim ölçümleri yapılarak kabin doğrulaması gerçekleştirilecektir.

Dördüncü bölümde, tasarım detayları verilen alfa kabin ile ses yutum katsayısı ve ses iletim katsayısı belirlenmesi için yapılan testlerin gerçekleştirilme prosedürleri hakkında bilgi verilecektir. Dördüncü bölümün ilk kısmında ses yutum katsayısı ölçümlerinin gerçekleştirilmesi anlatılarak, numunenin ve odanın teste hazırlanması ve kabin yazılımı kullanılarak ölçümün gerçekleştirilme adımlarından bahsedilecektir. İkinci kısmında ise ses iletim kaybı ölçümleri için numune ve kabinlerin hazırlanması anlatılarak ölçüm adımları verilecektir.

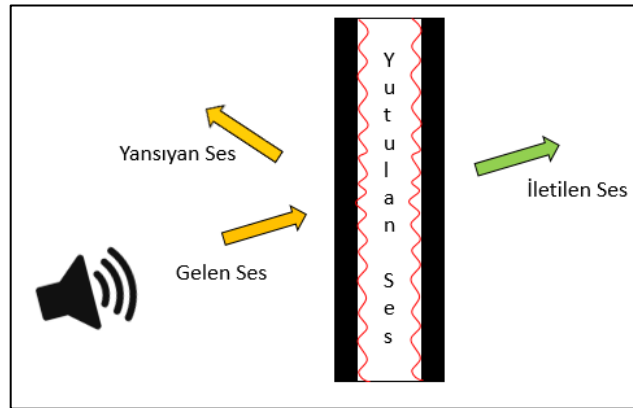
Beşinci bölümde, üretim yapılan kabinde belirlenen 3 numune için ölçümler yapılarak verileri analiz edilecektir. Aynı numuneler referans olarak kabul edilen Rieter firmasının kabininde de ölçülüp ölçüm sonuçları kıyaslanarak değerlendirilecektir. Çeşitli kabin parametrelerinin ve çevresel şartların ölçümlere etkisi gösterilecektir.

MALZEMELERİN AKUSTİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Otomotiv ve mimaride akustik uygulamalar için kullanılan malzemelerde karakteristik olan en temel iki parametre ses yutumu ve ses iletim kabiliyetleridir. Akustik malzemelerde aranan bu iki temel parametrenin büyüklüğü kullanım yerine göre değişiklik gösterebilir ve malzemeleden etkin sonuç alabilmek için doğru olarak ölçülmesi ve belirlenmesi gerekir. Bu bölümde, akustik uygulamalar için kullanılan malzemelerin yapısını ve akustik özelliklerini tanımlayarak bu özelliklerin belirlenmesinde kullanılan yöntemler hakkında temel bilgiler verilecektir.

2.1 Ses Yutumu

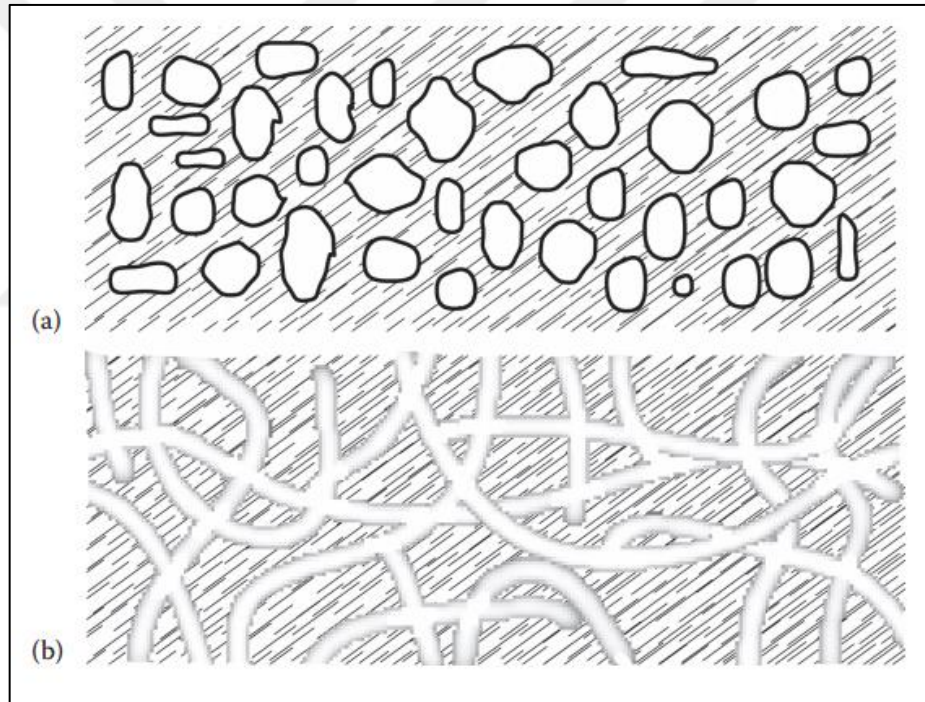
Malzeme üzerine gelen ses enerjisinin malzeme içerisinde yutulan ve yayılan kısmını tanımlar (Şekil 2.1). Yutulan enerjinin büyük kısmı ısı enerjisine dönüştülür kalanı ise iletilir. Yumuşak ve gözenekli malzemeler genellikle iyi akustik yutumu özelliği gösterirken sert ve yoğun malzemeler daha çok yansıtıcı özellik göstermektedir.



Şekil 2.1 Gelen, yansıyan, yutulan ve iletilen ses enerjisi

Malzemenin yutum karakteristiği gelen ses dalgasının frekansına göre değişim göstermektedir. Düşük frekanstaki ses dalgalarının enerjisi yüksek olduğundan malzeme tarafından yutulması daha zordur. Enerjisi yüksek olan ses dalgalarının yutumu için gözenekli malzemelerin kalınlığını artırmak yutum performansını da artırmaktadır. Yutucu malzemelerin kalınlık, yoğunluk, elastisite modülü ve poisson oranı gibi katı faz karakteristiklerinin yanında gözeneklilik, akış direnci, içyapı dağınıklığı gibi akışkan faz karakteristikleri de yutum özelliklerini belirleyen temel parametrelerdir [1], [2].

Gözeneklilik (Porosity): Gözeneklilik toplam yutum hacminin, malzemenin toplam hacmine oranıdır. Yüksek gözeneklilik oranına sahip malzemeler iyi yutum özelliğine sahiptir fakat gözenekli malzemelerde gözeneklilik ve akışa karşı direnç arasında bir ikilem vardır. Malzeme içerisindeki kapalı gözenekler gözenek hacmine dahil edilmezler.



Şekil 2.2 Kapalı (a) ve açık (b) gözenekli malzeme yapısı [1]

İç Yapı Dağınıklığı (Tortuosity): Gözenekli yapıdaki gözeneklerin dağılım şeklini ifade eder. Ses basınç dalgaları yapı içerisindeki gözeneklerden geçerken ne kadar karmaşık yol izlerse malzemenin yutum özelliği de o kadar iyi olacaktır.

Akış Direnci: Malzemelerin akustik davranışını belirleyen en önemli parametrelerden biri R_f , spesifik hava akış direncidir. Akış direnci havanın gözenekli yutucu malzeme içerisine ne kadar kolay girebildiğinin ve hava akışının yapı içerisinde karşılaştığı direncin

bir ölçüsüdür. Buna bağlı olarak malzeme içerisindeki sınır yüzey etkilerinden dolayı ne kadar ses enerjisi kaybolduğu hakkında bilgi verir.

$$\sigma = \frac{\Delta P}{\Delta d} \quad (2.1)$$

Gözenekli malzemeler için birim kalınlıktaki hava akış direnci eşitlik (2.1) ile ifade edilir. Burada ΔP basınç düşümü, d katman kalınlığını ifade etmektedir. Spesifik hava akış direnci, havanın gözenekli yapı içerisine girerken maruz kaldığı direnci gösteren bir özelliktir. Malzeme içerisinde ne kadar ses enerjisi kaybolacağı yönünde bilgi verir. Gözenekli yapıya sahip çoğu yutucu malzeme arasında en çok değişen parametre akışa karşı direnç olduğundan, belirlenmesi gereken önemli bir parametredir [1].

Bu temelde otomotivde kullanılan akustik malzemeler daha çok elyaf, fiber takviyeli plastik malzemeler, çok katmanlı kompozit malzemeler, gözenekli mikro fiber vb. yapılardır (Şekil 2.3).



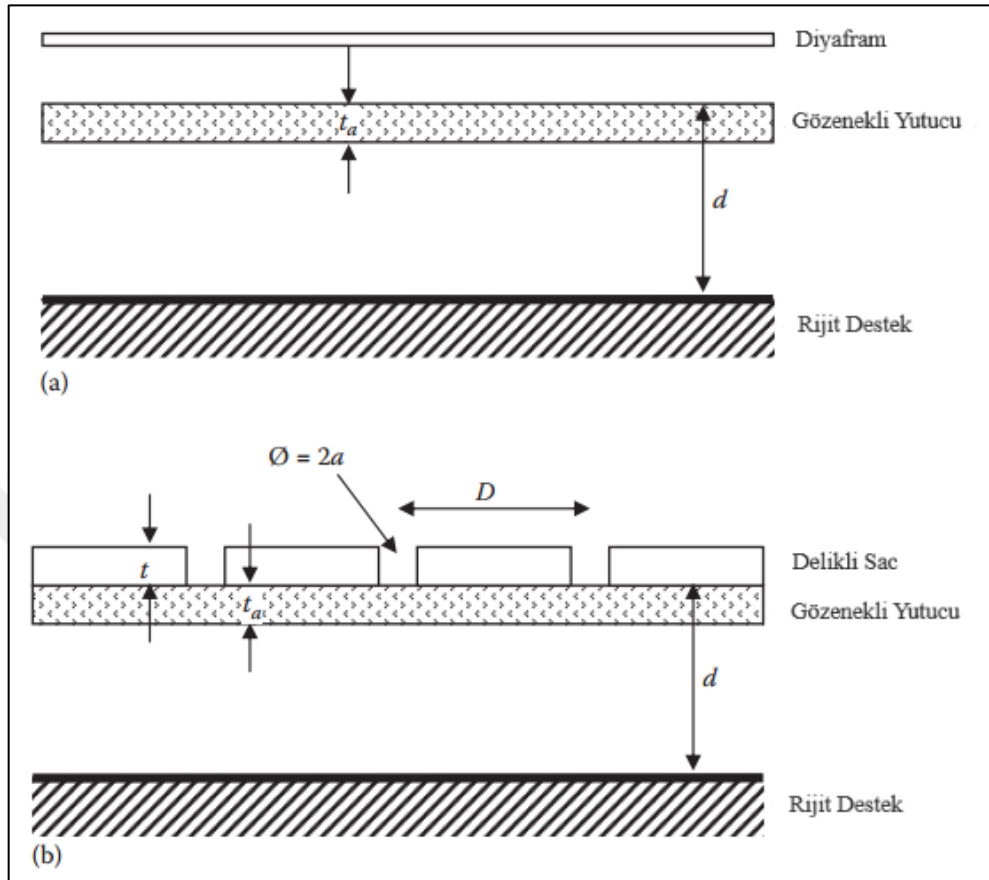
Şekil 2.3 Akustik Malzemeler [3]

2.1.1 Yutucu Tipleri

Ses yutucu malzemeler için iki genel sınıflandırma yapılabilir; gözenekli yutucular ve tınlama aygıtları. Bunların performansı 0-1 aralığında değişen yutum katsayısı ile ifade edilir. En sık kullanılan gözenekli malzeme cam elyafı gibi mineral yünlerdir. İyi yutucu olan gözenekli malzemelerin akustik yutum üzerindeki etkisi yüksek frekanslar ile sınırlıdır. Gözenekler dalga boyuna kıyasla çok sık ise yutum etkisizleşir. Çizelge 2.1'deki gözenekli malzemelerin yutum eğrilerinde görüldüğü gibi yüksek yutum 500 Hz ve üzerinde görülmektedir.

Düşük frekanslarda daha yüksek yutum elde etmenin en etkili yolu ise rezonans yutucu kullanmaktır. Bunun için gözenekli yutucu malzemenin önüne delikli bir sac yerleştirilerek bir Helmholtz yutucusu formu oluşturulur veya cam elyaf malzeme önüne

ince bir sac koyularak diyafram veya panel yutucu formu oluşturularak rezonans yutucu elde edilir (Şekil 2.4).

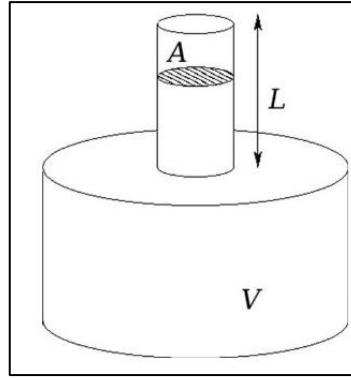


Şekil 2.4 (a) Diyafram (panel) ve (b) Helmholtz Rezonatör Yutucular [1]

Helmholtz rezonatörü kapalı hacimdeki gazın rezonansa girmesini sağlayan bir aygıttır. Hacim bir boyun ile dış ortama açılır (Şekil 2.5). Bir şişenin ağzına karşıdan üflendiğinde oluşan ses bu rezonansa örnektir. Rezonans frekansını boşluğun hacmi (V) ve boyun ölçüleri (A ve L) belirler.

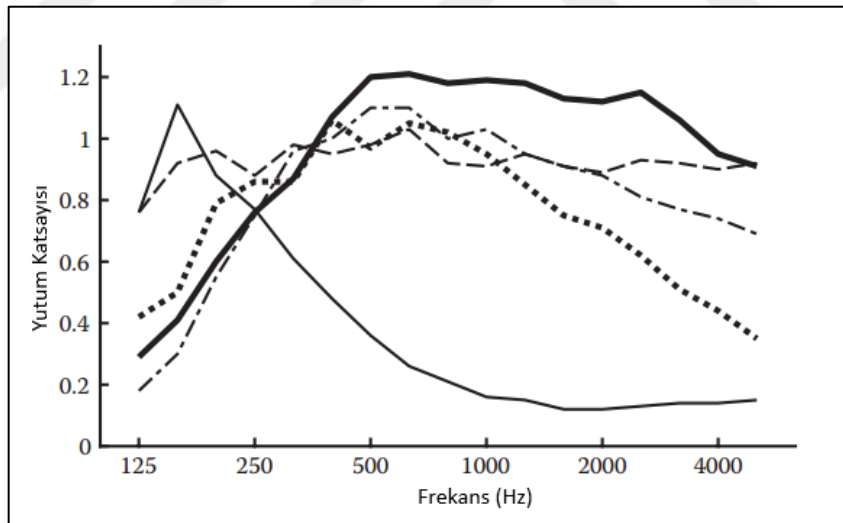
$$f_n = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V.L}} \quad (2.2)$$

(2.2)'de c_0 boşluktaki gazda ses hızını, A boyun kesit alanını, V boşluk hacimini ve L boyun uzunluğunu gösterir. Buna göre Şekil 2.4-b'de gösterilen delikli sac ve gözenekli yutucu malzeme ile oluşturulan rezonans yutucusunda sac kalınlığı ve delik çapı rezonans frekansını belirleyici parametrelerdir. Helmholtz rezonans yutucuları özellikle mimari akustikte yoğun kullanım alanına sahiptir.



Şekil 2.5 Helmholtz rezonatörü şematik gösterimi

Şekil 2.6’da rezonans yutucular ve gözenekli yutuculara örnek birkaç malzemenin rastgele geliş yutum katsayıları frekansa bağlı olarak gösterilmektedir. Grafikte diyafram tasarım daha düşük frekanslarda ve daha dar bant genişliğinde iş yaparken, özel Helmholtz yutucu orta frekansta 3 oktav üzerinde iş yapmaktadır. Geniş bant yutum için hem rezonans hem de gözenekli yutumun bir arada olduğu yapılar kullanılmalıdır. Çizelgede bu iki durum çok katmanlı malzeme ve mikro gözenekli ahşap malzeme olarak görülmektedir.



Şekil 2.6 Farklı yutucular için rastgele geliş yutum katsayısı eğrileri [1]

— .Çok katmanlı, — Diyafram, — Cam elyaf,Helmholtz ve — . — Mikro delikli ahşap

2.1.2 Otomotivde Yutucu Uygulamaları

Otomobillerde ve diğer taşıtlarda yutucu malzeme uygulamaları gürültünün azaltılmasında önemli rol oynarlar. Motor odasından kabin içine ve dış ortama yayılan

gürültünün azaltılması için kaporta altına (özellikle motor kaputu altında) ve mümkünse diğer iç yüzeylere yutucu malzeme uygulaması yapılır. Egzoz sisteminde ise gürültüyü azaltmak için cam elyafı veya çelik yünü gibi lifli malzemeler ile takviye edilmiş susturucular (muffler) kullanılır [1].

Kabin içindeki gürültü yapısal kaynaklı ve hava kaynaklı yollardan birleşik şekilde gelir. Kabin içine yutucu uygulaması yapmak gürültüyü azaltır ancak burada gürültü seviyesindeki iyileşmenin etkinliği, bazı kaynakların çınlamadan ziyade direk etkisi daha baskın olduğu için sınırlıdır. Sürücü veya yolcunun yanındaki camın titreşmesinden kaynaklı oluşan gürültü buna örnek olarak verilebilir. Ayrıca, çok fazla yutucu malzeme eklenmesi faydalı yansımaları da yutacağından yolcuların konuşma anlaşılabilirliğini etkileyebilir. Araç içerisinde yutunun yarısına yakını koltuklar tarafından sağlanır, bu yüzden koltuk malzemelerinin seçimi doğru bir şekilde yapılmalıdır. Yutunun ¼'ünü sağlayan tavan kaplamaları genellikle 6-12 mm kalınlıkta cam elyafı, yapıştırıcı, akustik köpük ve kumaş içeren çok katmanlı yapılardan oluşur [1].

2.2 Ses İletimi ve Ses İletim Kaybı

Malzeme üzerine gelen ses dalgasının malzemeden geçen kısmını malzemenin ses iletim özellikleri belirler (Şekil 2.1). Ses iletim özellikleri Ses İletim Kaybı, Gürültü Azaltma İndisi ve Ses Geçiş kaybı gibi indislerle tanımlanır. Ses iletim karakteristiğini anlatan bu tanımlamalar arasındaki fark hesaplanan parametre farklılığı veya ölçüm yöntemi farklılığıdır.

Ses iletimi, gelen akustik enerjinin (W_i) iletilen akustik enerjiye (W_t) oranı olan ses iletim katsayısı τ ile ifade edilir (2.3). Ses iletim kaybı ise ses iletim katsayısının logaritmik bir oranını ifade eder ve gelen ses dalgasının malzeme üzerine etki ediş açısına göre değişiklik gösterir. Dik geliş (normal incidence), rastgele geliş-dağınık alan (random incidence-diffuse field) veya alan etkili (field incidence) ses iletim kaybı (sırasıyla TL_N , TL_d , TL olarak gösterilir) ve bunlara karşılık gelen iletim katsayısı indisleriyle (sırasıyla τ_N , τ_d , τ_F) isimlendirilerek ifade edilir. Hava kaynaklı tahrik problemlerinde ses iletim kaybı denklem (2.4) ile hesaplanır.

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} \quad (2.3)$$

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (2.4)$$

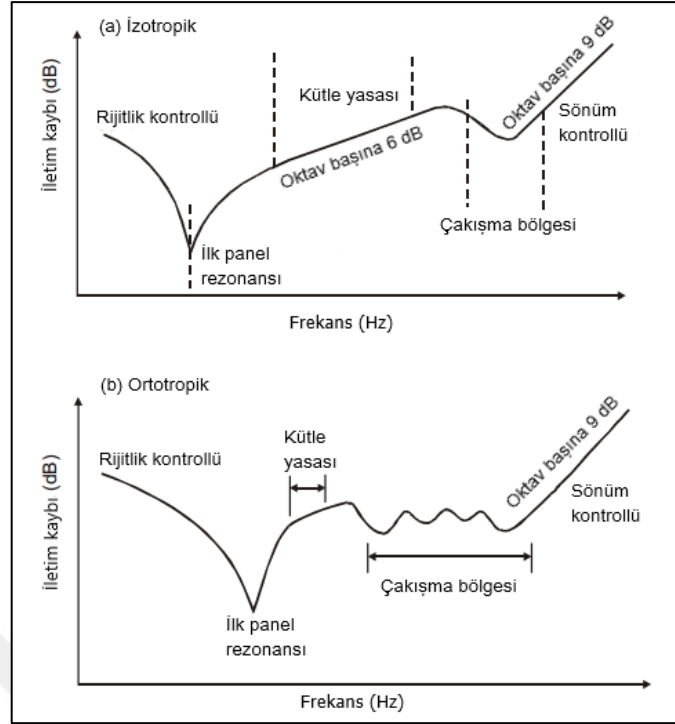
Denklem (2.4)'e göre tam yansıtıcı rijit malzemeler sonsuz ses iletim kaybına sahipken boşluk sıfır ses iletim kaybına sahiptir.

Yapısal kaynaklı ve hava kaynaklı olarak ses iletim mekanizması ikiye ayrılabilir. Ses kaynağı ileten yapıya mekanik olarak temas halindeyse ses iletimi yapısal kaynaklı olarak gerçekleşir ve hava kaynaklı tahrik göz ardı edilir. Bu çalışmada hava kaynaklı tahrik edilen yapının ses iletim karakteristiği incelenecektir. Sonlu bir plaka için ses iletimi, incelenen frekans aralığında gelen ses dalgasının iletici malzeme modlarını tahrik etmesi veya etmemesi durumuan göre rezonans ve rezonans olmayan iletim olarak ikiye ayrılır. İletilen ses dalgası yapı üzerinde titreşim oluşturur ve bu titreşim ile ses dalgaları bir ortamdan diğer ortama iletilir. Katı malzemelerde ses iletilirken malzemenin titreşimi hem eğilme yönünde hemde bası veya çeki yönünde gerçekleşir. Bu iki durumdan hangisinin baskın olacağı malzemenin kalınlığına göre değişmektedir. Katı plakalarda eğilme dalgaları titreşen plakanın sesi iletmesinde ana sorumludur. Dolayısı ile malzemenin eğilme rijitliği önemli yapısal özelliği oluşturmaktadır [4].

$$B = \frac{EI'}{(1-\nu^2)} = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2.5)$$

Malzemenin eğilme rijitliği (2.5) denklemi ile ifade edilir. Burada E elastisite modülü, ν poisson oranı, $I' = h^3/12$ kesitsel ikinci alan atalet momentini ve h plaka kalınlığını ifade etmektedir [4].

Panel şeklindeki malzemeler için frekansa bağlı ses iletimi, sesi ileten yapının topolojik ve malzeme özelliklerine bağlı olarak 4 frekans bölgesine ayrılarak tanımlanır (Şekil 2.7) [5].



Şekil 2.7 İzotropik ve Ortotropik panel malzemelerin ses iletim kabiliyetinin frekans bölgelerine göre değişimi [4]

Statik Rijitlik Bölgesi Çok düşük frekanslarda, yapının ilk doğal frekansının altında ses iletim kabiliyetini ifade eder. Ses iletim kaybı oktav başına 6 dB düşüş gösterir.

Mod Bölgesi Frekansın artmasıyla ses iletiminde yapının modal davranışı etkili olmaya başlar. Bu bölgede yapının ilk rezonans frekansı bulunur ve ses iletim kabiliyetinde belirgin bir düşüş görülür.

Kütle Bölgesi Modal yoğunluk arttığında, yapının rezonans frekansları birbirine yaklaşır ve her mod benzer miktarda enerji alır. Bu yüzden mod bölgesinde ses iletim miktarında görülen belirgin düşüşler görülmez. Frekans aralığının bu bölesinde ses iletimini sağlayan titreşim birim alan düşen kütle tarafından kontrol edilir ve birim alana düşen kütle iki katına çıkarıldığında ses iletim kaybında 6 dB'lik bir düşüş olur. Aynı zamanda bu bölgede ses iletim kaybı logaritmik olarak frekansın lineer fonksiyonu olur ve frekansın iki katına çıkması her bir oktav band başına ses iletim kaybına 6 dB'lik pozitif bir katkı yapar. Bu bölgede ses iletim kaybı ses dalgalarının malzeme üzerine geliş açısına bağlı olarak ifade edilir.

$$TL = 20 \log \left[\frac{2\pi f \rho_s}{2\rho_0 c_0} \cos \theta \right] \quad (2.6)$$

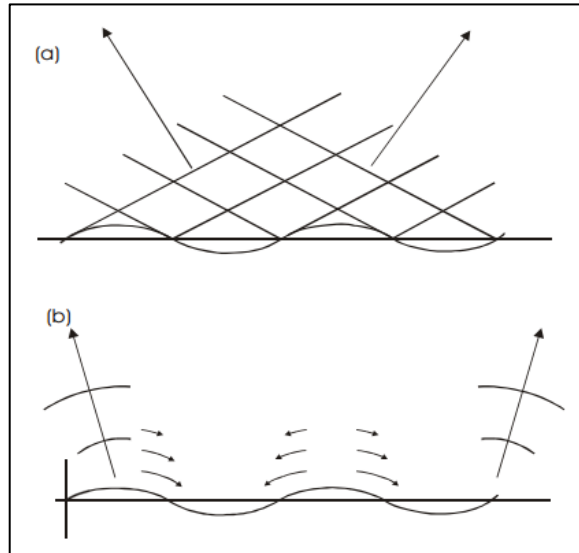
Denklem (2.6)'de ses dalgalarının geliş açısı etki ettiği plakanın normaline göre 0 olduğunda dik geliş (normal incidence) durumunda ses iletim kaybını verir. Burada ρ_o havanın yoğunluğu, c_o sesin havadaki yayılma hızını ve ρ_s birim alandaki kütleyi ifade etmektedir. Yapısal komponentler kütle bölgesini ifade eden frekans aralığında çalışacak şekilde tasarlanırlar.

Çakışma Bölgesi Panel yapılardan ses iletilmesinde yapı üzerinde oluşan eğilme dalgaları sesin iletilmesinde ana etkindir.

$$C_B = \left(\frac{B\omega^2}{m} \right)^{1/4} \quad (2.7)$$

(2.7)'da ω açısal frekansı (rad/sn), m birim alan düşen kütleyi ve B eğilme rijitliğini ifade etmektedir ve denklemde görüldüğü gibi eğilme dalgalarının yayılma hızı tahrik frekansının karekökü ile artar. Frekans yükseldikçe eğilme dalgalarının hızı ile akustik ses dalgasının yayılma hızının eşitlendiği bir kritik frekans değerine ulaşılır. Sonlu izotropik bir panel malzemede kritik frekans ses dalgasının geliş açısına, yapının geometrik ve malzeme özelliklerine bağlı olarak hesaplanır.

$$f_c = \frac{c_o^2}{2\pi \sin \theta} \sqrt{\frac{12\rho(1-\nu^2)}{Et^2}} \quad (2.8)$$



Şekil 2.8 Akustik alanın ve yapısal dalgaların eşleşmesi. (a) Kritik frekans ve üzerinde panel dalgalarının yayılımı, (b) kritik frekans altında bölgesel yayılım [4]

Kritik frekansı ifade eden (2.8) denkleminde c_o ortamdaki ses hızı, θ ses dalgasının geliş açısı, ρ malzeme yoğunluğu, ν poisson oranı, E elastisite modülü ve t panel kalınlığını göstermektedir. Kritik frekans altında yayılma bölgeseldir ve panelin yapısal dalga boyu akustik dalga boyundan kısadır ve dalgaların eşleşmesi mümkün değildir (Şekil 2.8). Kritik frekans üzerinde ise yapısal eğilme dalgalarının boyu akustik dalga boyundan daha uzundur. Ortotropik malzemelerde farklı yönlerde farklı eğilme rijitliği değerleri geçerli olduğundan birden fazla çakışma frekansı (kritik frekans) bölgeleri gözlenir (Şekil 2.7). Kritik frekansın üzerinde ses iletiminde eğilme rijitliği, sönüm ve kütle birlikte etkilidir. Bu Bölgede ses iletim kaybı değeri oktav başına 9 dB yükseliş gösterir.

$$\tau_d = \int_0^{\theta_{lim}} \tau \sin 2\theta d\theta \quad (2.9)$$

$$TL_d = 20 \log \left[\frac{2\pi f \rho_s}{2\rho_o c_o} \right] - 10 \log \left[\ln \left(1 + \frac{2\pi f \rho_s}{2\rho_o c_o} \right) \right] \quad (2.10)$$

Buraya kadar özet olarak panel yapılar üzerine ses dalgalarının tek düzlemde dik veya açılı olarak gelmesi durumunda ses iletim mekanizması hakkında bilgi verildi fakat pratikte genellikle yapılar üzerine ses dalgaları rastgele gelmektedir. Bu durumda ses iletim kaybının hesaplanması dağınık alan (rastgele geliş) durumu göz önüne alınarak yapılır. Dağınık alanda (diffuse field) malzeme üzerine ses dalgaları her yönden ve farklı fazlarda geldiği düşünülür. Dağınık alanda izotropik malzemeler için ses iletim katsayısı bütün geliş açıları için ağırlıklı ortalama belirlenerek denklem (2.9) ile hesaplanır.

Denklem (2.9)'da τ açılı etki durumunda ses iletim katsayısını göstermektedir. Kütle bölgesinde dağınık alan ses iletim kaybı ise denklem (2.10) ile ifade edilir [59].

2.2.1 Gürültü Azaltma İndisi

Ses iletimini tanımlamak için kullanılan diğer bir indis gürültü azaltma indisidir. İletici bir yapı ile ayrılmış iki ortam arasındaki ses basınç seviyelerinin farkını gösterir ve NR kısaltması ile ifade edilir. İletim kaybından farklı olarak bu nicelik sadece akustik elemanın kendi parametrelerine değil sistem parametrelerine de bağlıdır [2].

$$NR = P_1 - P_2 \quad (2.11)$$

P_1 ve P_2 ses ileten bir malzeme ile ayrılmış iki ortamın dB olarak ses basınç seviyelerini göstermek üzere gürültü azaltma indisi denklem (2.11)'deki gibi gösterilir.

Gürültü azaltma indisi, iki ortam arasındaki ses basınç seviyeleri bir mikrofon ile ölçülerek kolayca bulunabilir fakat ölçüm yapılan ortamların akustik özellikleri ses basınç seviyesini etkileyeceğinden doğrudan malzemenin ses iletim kabiliyeti ile ilgili bir bilgi vermez.

2.3 Ses Yutum ve Ses İletim Katsayısı Ölçümü

Ses yutum ve ses iletim özelliklerinin tespitinde kullanılan uluslararası kuruluşlarca standardize edilmiş ölçüm yöntemleri ve standart dışı alternatif ölçüm yöntemleri bulunmaktadır. Ses iletim kaybı ölçümleri için dağınık alan yönteminin kullanıldığı çift odalı test düzenekleri ASTM E90 ve ISO 140, düzlemsel dalga yönteminin kullanıldığı epmedans tüpü test düzenekleri ASTM E2611 ile standardize edilmiştir [12], [13], [14]. Bina akustiğinde yapı elemanlarının ses yalıtım özelliklerinin belirlenmesinde uygulanacak ölçüm yöntemleri ISO 717-1 ve 717-2 ile standardize edilmiştir [15], [16]. ISO 354 ve ASTM C423 dağınık alan metodu ile çınlama odalarında, ASTM C384-04, ISO 10534-1 ve 10534-2 ise empedans tüpünde ses yutum katsayısı ölçüm yöntemlerini içeren standartlardır [7], [8], [9], [10], [11]. Standartlar hesaplama yöntemine göre bazı temel varsayımlar yapılarak belirlenmiştir. Empedans tüpü ölçümlerinde ses alanının düzlemsel (planve wave) olduğu, dağınık alan yönteminin kullanıldığı çınlama odalarında ise akustik ses alanının tam dağınık olduğu varsayımları yapılmıştır.

Ses iletim ve ses yutum özelliklerinin belirlenmesi için uygulanan standart dışı yöntemler;

- Alfa Kabin
- Serbest Alan Yöntemi
- Tamura Yöntemi
- Yerinde Ölçüm Yöntemleri

Bu yöntemler arasında Alfa kabin yöntemi hem ses yutum katsayısı ölçümlerinin hem de iki kabin kullanılarak ses iletim kaybı ölçümlerinin yapılabilirdiği özellikle otomotiv

endüstrisinde etkin olarak kullanılan bir yöntemdir. Alfa kabinleri ilk olarak geliştiren Rieter firmasının kabini standart olarak görülmekte ve kabin doğrulamaları bu firmanın kabini temel alınarak yapılmaktadır.

2.4 Ses Yutum Katsayısı Ölçüm Yöntemleri

Ses yutum katsayısının belirlenmesinde kullanılan yöntemler Çizelge 2.1’de kullanım alanları ve bazı özellikleri ile verilmiştir. Bu yöntemler arasında rastgele geliş (random incidence) yutum katsayısını veren dağınık alan yöntemi, numune boyutlarının gerçeğe yakın olarak alınabilmesi ve komponent bazlı ölçüm yapılabilmesinden ötürü üzerinde en çok durulanıdır. Rastgele geliş (random incidence) yutum katsayısının tespitinde teori ile deney sonuçlarının kıyaslanabilmesi için oldukça kontrollü ortam şartları gerekir ve bu açıdan sorunludur.

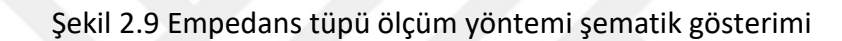
Çizelge 2.1 Ses yutum katsayısı ölçüm yöntemleri [1]

Ölçüm Yöntemi	Ölçülebilen Parametreler	Numune	Uygulama Alanları
Empedans Tüpü	Yutum katsayısı α , İletim katsayısı τ , Akustik empedans z	Küçük	Yutucu malzeme geliştirme, araştırma
Çınlama Odası	Rastgele geliş yutum katsayısı α	Büyük	Performans ölçümü
İki mikrofona yarı yankısız oda	Akustik empedans z , belirli açılarda gelen ses için yutum katsayısı α ölçümü	Büyük	Araştırma
Yerinde Ölçüm	Dik geliş (normal incidence) yutum katsayısı α	Büyük	Araştırma, Performans ölçümü

2.4.1 Empedans Tüpü Yöntemi

Kundt tüpü olarak da isimlendirilen empedans tüpleri ses yutum katsayısı, akustik empedans ve ses iletim katsayısı ölçümlerine olanak sağlamaktadır (Şekil 2.9). İyi tanımlanmış ve kontrollü şartlar altında ölçüm yapmaya olanak sağlaması açısından çok kullanışlıdır. Tüp için özel olarak hazırlanmış küçük numuneler ile ölçüm yapılır, kolayca

Şekil 2.9 Empedans tüpü ölçüm yöntemi şematik gösterimi



ilindirik tüpün bir ucunda ses kaynağı yer alır ve diğer ucun

- Düz ses kayıpsız yayılabilmesi için tüp içerisinde kayıplar azaltılmalıdır. Bu yüzden, kalın cidar kalınlığı genellikle tercih edilir. Bas frekanslarda çalışacak empedans tüpleri ise kayıpların azaltılması için beton çeper gibi sıradışı yapısal tasarıma ihtiyaç duyar ve insan kulağının duyma alt eşiği olan 20 Hz altındaki durumlar için de kullanılabilir.

- Ses kaynağı ilk mikrofon pozisyonundan birkaç tüp çapı veya genişliği kadar uzakta olmalıdır.
- Empedans tüpü ile yalnızca dik geliş ses yutum ölçümü yapılabilir.
- İki mikrofon arası uzaklık, en düşük ölçüm frekansının dalga boyunun en az yarısından büyük olmalıdır ve aynı zamanda numunenin yerleştirildiği taraftan da çeyrek dalga boyundan büyük olmalıdır.
- Ölçüm yapılabilecek en yüksek frekans;

$$f_c = \frac{c}{2d} \quad (2.12)$$

(2.12)'de c ses hızını, d ise silindirik tüplerde çapı, kare kesitli tüplerde ise en büyük kesit genişliğini göstermektedir. (2.12) eşitliği, geniş frekans aralıklarında ölçüm yapılmak istendiğinde farklı kesit ölçülerine sahip tüp kullanılması gerektiğini göstermektedir.

Empedans tüpü ölçümlerinde numunenin düzgün kesilmesi ve tüp içerisine monte edilmesi kritik bir detaydır. Numunenin tüpün içine tam oturması önemlidir. Numune kenarları boyunca herhangi bir boşluk kalması durumunda bu boşluklar doldurulmalıdır. Aksi takdirde, numunenin kenarlarında aşırı yutum oluşacak ve yutum katsayısı fazla yüksek çıkacaktır [1]. Numunenin yerleştirilmesi ile ilgili bir diğer önemli nokta ise numune tüp içerisine aşırı sıkıştırılmamalı, tüp çapından 0,5-1 mm arası daha küçük olmalıdır. Böylece numunenin ses yutumu ve empedansı sonsuz yanal ölçülere sahip numuneninki gibi etkin bir şekilde ölçülebilir. Eğer numune çapı tüp çapından büyük olursa tüp içerisinde rezonansa sebep olur, numune tüp çapından fazla küçük olduğu durumda ise numune kenarlarından oluşan ses kaçaklarına sebep olur [17].

Ses yutum katsayısı ölçümü için empedans tüpünde üç farklı yöntem kullanılır; tüp içerisinde hareket edebilen tek mikrofonun kullanıldığı sürekli dalga oranı yöntemi, iki mikrofon kullanılan transfer fonksiyonu yöntemi ve üç mikrofonlu en küçük ortalama kare yöntemi.

Sürekli Dalga Oranı Yöntemi Bu yöntemde tüp içerisinde tüp eksenini boyunca hareket eden bir mikrofon probu bulunmaktadır. Burada yutum katsayısı, tüp içerisindeki maksimum ses basınç seviyesinin minimum ses basınç seviyesine oranından hesaplanır.

Transfer Fonksiyonu Yöntemi İki mikrofon ile ölçüm yapılan bu yöntem ile hem yutum katsayısı hem de yansıma katsayısı ölçümü yapılabilir.

$$P = A(e^{jkx} + Re^{-jkx}) \quad (2.13)$$

Tüp içerisindeki ses basıncı (2.13) ile ifade edilir. Burada k dalga sayısı, R yansıma katsayısı, $x = 0$; numunenin yansıtıcı yüzeyden uzaklığını gösterir ve sıfır olduğu kabul edilir ve A karmaşıklık sabitidir. (2.13)'de ilk terim gelen ses dalgasının basıncını, ikinci terim ise yansıyan ses dalgasının basıncını ifade etmektedir. Eşitlik yansıma katsayısının fazı ve büyüklüğü olmak üzere iki bilinmeyen içermektedir. Tüp içerisinde iki noktadan basınç değeri ölçülerek yansıma katsayısı için denklem çözülür. Eşitlik (2.14) ile yansıma katsayısından ses yutum katsayısı hesaplanır.

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (2.14)$$

İki mikrofon arasındaki transfer fonksiyonu, mikrofon lokasyonlarındaki basınçların oranıdır (2.15)

$$H_{12} = \frac{P(x_2)}{P(x_1)} \quad (2.15)$$

Her iki mikrofon pozisyonu için basınç değerleri (2.15)'de yerine koyulduğunda;

$$H_{12} = \frac{e^{jkx_2} + Re^{-jkx_2}}{e^{jkx_1} + Re^{-jkx_1}} \quad (2.16)$$

Burada x_1 ve x_2 Şekil 2.8'de gösterilen mikrofon pozisyonlarının rijit yüzeyden olan uzaklıklarını göstermektedir. Eşitlik (2.16) tekrar düzenlendiğinde (2.17) ile yansıma katsayısı elde edilir.

$$R = \frac{H_{12}e^{jkx_1} - e^{jkx_2}}{e^{-jkx_2} - H_{12}e^{-jkx_1}} \quad (2.17)$$

En Küçük Ortalama Kare Yöntemi Temelde transfer fonksiyonu yönteminin uyarlanması ile elde edilir. Empedans tüpünde ölçüm yapılabilecek frekans aralığını artırmak için üç mikrofon kullanımına olanak sağlar [1].

2.4.2 Çınlama Odası Yöntemi

Çınlama odaları; ses yutum katsayısı ölçümü, gürültü kaynağının ses gücü ölçümü ve ses geçirgenliği ölçümü gibi çeşitli standardize edilmiş ölçüm yöntemlerinde kullanılan önemli bir akustik araçtır. Çınlama odaları yüksek ses basınç seviyelerinde uydu parçalarının test edilmesi için de kullanılırlar [24].

Pratikte çoğu uygulamada ses dalgaları malzeme üzerine pek çok farklı açıdan etki eder. Açık alan ölçümlerinde (free field), ses dalgalarının malzeme üzerine her açıdan gelmesini sağlama imkânı yoktur. Ses dalgalarının malzeme üzerine her açıdan etki etmesini pratik bir şekilde sağlamak için özel tasarlanmış tam yansıtıcı çınlama odaları kullanılır (Şekil 2.10). Gerekli oda boyutları oldukça büyüktür ve büyük numunelerin kullanılmasını gerektirir. Yalnızca ses yutum katsayısı ölçümüne olanak sağlar.

Çınlama odalarında ses yutum katsayısı ölçümü tam dağınık ses alanı varsayımına göre hesaplanır. Bu yöntem dağınık alan yöntemi (diffuse field method) ve rastgele geliş (random incidence) yutum katsayısı ölçümü olarak da isimlendirilir. Tam dağınık alan kabaca, oda içerisinde yansıyan ses enerjisinin oda hacmi boyunca herhangi bir noktada minimum varyasyona sahip olduğu ve enerjinin bütün yönlerde eşit dağıldığı ses ortamı olarak tanımlanır. Tam dağınık alanı elde edebilmek için genellikle oda duvarlarına yansıtıcı yüzeyler eklenir (Şekil 2.10). Ayrıca oda duvarları bir birine paralel olmayacak şekilde üretilir. Bu tedbirlere rağmen tam dağınık ses alanı elde edilemez, bu sebeple çınlama süresi konuma bağlı olarak değişir. Bu durumu engellemek için birden fazla noktaya ses kaynağı yerleştirilir ve birden fazla noktada ölçüm alınır. Hoparlörler odanın köşelerine yerleştirilerek odanın modlarının maksimum seviyede tahrik edilmesi sağlanır. Böylece hoparlörlerden sesin direk yayılmasının önüne geçilir. Mikrofonlar oda duvarlarından ve difüzörlerden minimum 1m uzağa yerleştirilir. Bütün bu önlemlere rağmen, havanın modlarının etkisinden dolayı düşük frekanslarda yutum katsayısı ölçümündeki doğruluk yüksek frekanslara göre daha düşüktür.

$$f_{sch} = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (2.18)$$

Schroeder tarafından elde edilen ve “crossover frekans” olarak da isimlendirilen kritik frekans değeri eşitlik (2.18) ile elde edilir [42]. Bu frekans değerinin altında hava modları

(oda rezonansı) baskın haldedir ve tam dağınık alanın elde edilmesi mümkün değildir. (2.18)'de V oda hacmini göstermektedir.

Çınlama odalarında genellikle üç oktav bandında 400 Hz ile 10 kHz arasında ölçüm yapılabilir. Tam dağınık alan sağlanmış odada, çınlama süresi odanın toplam yutumuna bağlı olduğundan numune yerleştirmeden önce ve yerleştirdikten sonra yapılan çınlama süresinin ölçülmesi yerleştirilen numunenin rastgele geliş yutum katsayısının belirlenmesine olanak sağlar.



Şekil 2.10 Çınlama Odası

$$T_{60} = \frac{55,3V}{cA} \quad (2.19)$$

Dağınık alan teorisine göre çınlama odalarında çınlama süresi eşitlik (2.19) ile hesaplanır. Burada A eşdeğer ses yutum alanını ifade etmektedir.

$$A_{Sabine} = \tilde{\alpha}S + A_{hava} \quad (2.20)$$

$$A_{Eyring} = -S \ln(1 - \tilde{\alpha}) + A_{hava} \quad (2.21)$$

Eşdeğer ses yutum alanı için iki yaklaşım bulunmaktadır. Eşitlik (2.20) ile ifade edilen, Sabine yaklaşımını vermektedir [21]. Eyring ise eşdeğer ses yutum alanını eşitlik (2.21) ile ifade etmiştir [22].

$$\tilde{\alpha} = \frac{\sum S_i \tilde{\alpha}_i}{\sum S_i} \quad (2.22)$$

$$A_{hava} = 4Vm \quad (2.23)$$

Eşitlik (2.20) ve (2.21)'deki $\tilde{\alpha}$, ortalama yüzey yutum katsayısını ifade etmektedir ve eşitlik (2.22) ile gösterilir. S ise toplam yüzey alanını göstermektedir. A_{hava} büyük odalar için hesaplanması önemli olan toplam hava yutumunu gösterir ve eşitlik (2.23) ile ifade edilmektedir. (2.23)'de V oda hacmini, m ise hava şartlarına bağlı olan zayıflatma katsayısını ifade etmektedir. Bu katsayının değeri havanın bağıl nemine ve frekansa bağlı olarak Çizelge 2.2'den okunabilir veya formülasyon ISO 9613-2'de bulunabilir [23]. Yüzey yutum değerleri bilinen boş oda için çınlama süresi, eşitlik (2.20) veya (2.21)'in eşitlik (2.19)'da yerine koyulması ile bulunur.

$$\alpha = \frac{A_n - A_b}{S_n} \quad (2.24)$$

Çınlama odası test düzeneklerinde ise boş ve numune yerleştirilmiş odanın çınlama süreleri ölçülerek eşitlik (2.19)'dan boş ve numuneli oda için eşdeğer ses yutum alanları bulunur. Boş oda çınlama süresi ($T60_b$) ölçümünden boş odanın eşdeğer ses yutum alanı A_b , numuneli oda çınlama süresi ($T60_n$) ölçümünden ise numuneli oda eşdeğer ses yutum alanı A_n elde edilir. Bulunan A_n ve A_b değerlerinin farkının numunenin kapladığı S_n alanına bölünmesiyle eşitlik (2.24) ile ifade edildiği gibi ses yutum katsayısı bulunur.

$T60_b$ oda boşken ses kaynağının kapatılmasından sonra ses basınç seviyesinde 60 dB düşüş için geçen süreyi ifade etmektedir. $T60_n$ aynı sürenin oda içerisine numune yerleştirilmiş durumdaki değerini gösterir.

Çizelge 2.2 20°C Sıcaklık ve atmosferik basınç altında m hava yutum sabiti

Bağıl	Frekans							
Nem %	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
20	0.06	0.16	0.32	0.6	1.5	4.96	17.2	50
30	0.044	0.14	0.33	0.58	1.15	3.25	11.26	38.76
40	0.035	0.12	0.32	0.6	1.07	2.58	8.39	29.94
50	0.028	0.1	0.3	0.63	1.07	2.28	6.83	24.24
60	0.024	0.088	0.28	0.64	1.11	2.14	5.9	20.48
70	0.021	0.077	0.26	0.64	1.15	2.08	5.32	17.88

Çınlama odaları ile ses yutum ölçümü yönteminin önemli kısıtlayıcı tarafları;

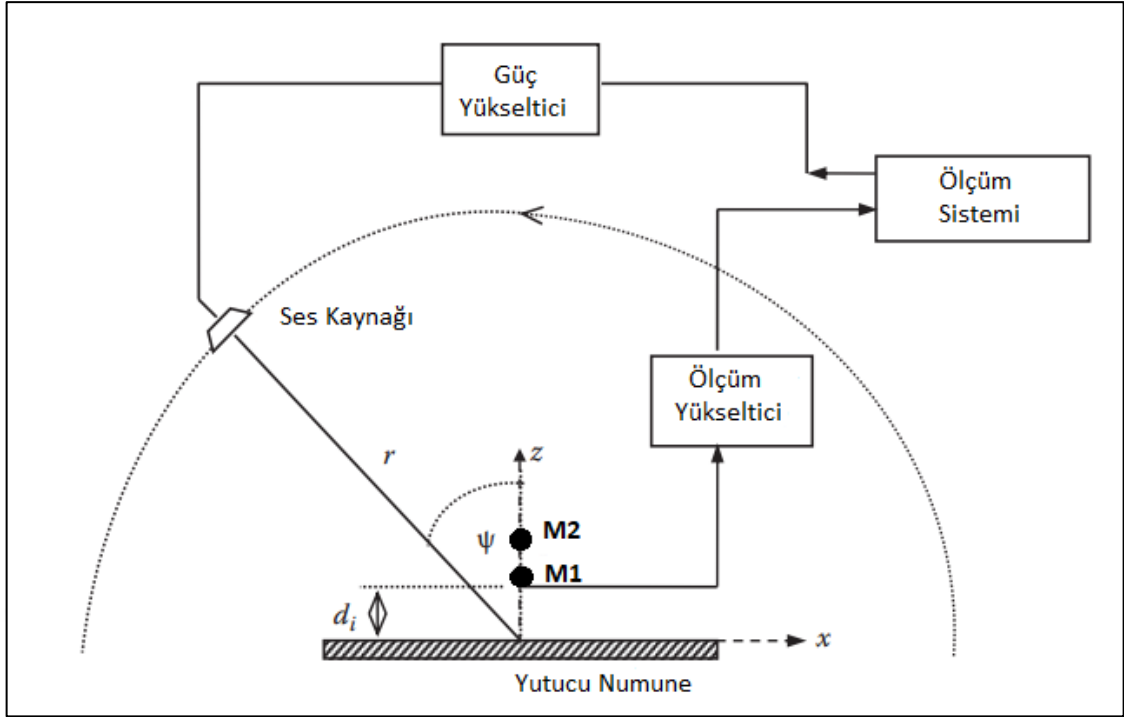
- Standart çınlama odaları çok büyüktür ve kurulum maliyeti yüksektir.
- Yalnızca ses yutum ölçümleri ve karmaşık olmayan yansıma katsayısı ve akustik empedans ölçümleri yapılabilir.
- Büyük yüzey alanına sahip numune gereksinimi vardır. ISO 354'e göre 10-12 m², ASTM C423'e göre ise 5,57-6,69 m² olarak verilmiştir.

Aynı laboratuvardaki çınlama odası ölçümlerinde yüksek oranda tekrarlanabilirlik sağlanırken, laboratuvarlar arasında tekrarlanabilirlik problemi görülmektedir. Bu durumun ana sebebi çınlama odası içerisinde dağınık alanın tam olarak sağlanamamasıdır. Özellikle yutum değeri yüksek malzemelerin ölçümlerinde laboratuvarlar arası uyumsuzluk durumuna daha sık rastlanır.

2.4.3 İki Mikrofonlu Serbest Alan Yöntemi

Empedans tüpü ölçümleri ses dalgalarının düzlemsel geldiği varsayımı ile yalnızca dik gelen ses dalgaları için yutum katsayısı ölçümüne izin verirken serbest alan (free field) yöntemi ile ise belirlenen bir açı için yutum katsayısı ölçümü mümkündür. Açık alan veya serbest alandan kasıt malzeme üzerine gönderilen ses dalgasından başka bir etkinin olmadığıdır. Yani bu yöntem ile yankısız veya yarı yankılı odalara ihtiyaç duyulur. Ölçüm için büyük numune gerekliliği vardır. Bu yöntem de empedans tüpü yöntemi gibi akustik malzeme geliştiricileri tarafından gözenekli yutucu malzemelerin geliştirilmesinde kullanılır. Gerçek ortam şartlarını yansıtmadığından yutum karakteristiği belirlenmesinde tercih edilmez.

Homojen izotropik malzemeler için en uygun yöntemdir. Büyük bir numune üzerine uzak mesafedeki ses kaynağından belli bir açı ile tahrik uygulanır (Şekil 2.11). Gelen ve yansıyan ses dalgalarının düzlemsel ses dalgası olduğu varsayılır. Empedans tüpü ölçümlerinde kullanılan transfer fonksiyonu yöntemi burada da aynen kullanılır. Numune üzerinden belli mesafelerdeki M1 ve M2 mikrofonlarının ses basınç seviyeleri arasındaki transfer fonksiyonu yutucu malzemenin yüzey empedansını verir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 İki mikrofonlu serbest alan yutum katsayısı test düzeneği [1]

Uygulamada üzerinde önemle durulması gereken bazı pratik detaylar mevcuttur ki teoride ölçüm yapılan numune sonsuz olmalıdır fakat gerçekte numuneler sonlu büyüklüktedir ve numune kenarlarında ses dalgasında kırılmalar olur. Düşük frekanslarda yansıyan ses dalgası düzlemsel olma özelliğini kaybeder ve teori geçersiz olur. Büyük numunelerin bulunması mümkün olmadığında kenar etkisinden kurtulmak için ses kaynağı numuneye yaklaştırılır. Düzlemsel dalga durumunda birinci mikrofonun numune yüzeyinden mesafesi genelde 5mm, ikinci mikrofonun ise 15 mm olarak alınır. Alt ve üst frekans limitleri için empedans tüpünde bahsedilen mikrofonlar arası mesafeler burada da geçerlidir.

Numune üzerine gelen ses dalgalarının geliş açısı φ olmak üzere yansıma katsayısı (2.22) ile ifade edilir.

$$R = \frac{H_{12}e^{jkz_1 \cos \varphi} - e^{jkz_2 \cos \varphi}}{e^{-jkz_2 \cos \varphi} - H_{12}e^{-jkz_1 \cos \varphi}} \quad (2.22)$$

(2.22)'de z_1 ve z_2 mikrofonların sırasıyla numuneden uzaklıklarını göstermektedir.

2.4.4 Yerinde Ölçüm Yöntemi

Yerinde akustik empedans ve ses yutum özelliklerinin ölçümü yöntemi, montajı yapılmış parçaların çalışma şartları altında gerçek performanslarını vermesi açısından avantajlı bir yöntemdir. Fakat ortam şartlarının laboratuvar ortamındaki gibi kontrollü olması mümkün olmadığından yapılan ölçümlerin sağlıklı olması çoğu durumda mümkün değildir.



Şekil 2.12 Açık uçlu empedans tüpü ile yerinde ses yutum ölçümü

Laboratuvar ortamına getirelemeyen malzemelerin yutum katsayılarının ölçümü için açık uçlu empedans tüpü kullanılmaktadır (Şekil 2.12). Numunenin yerleştirildiği uç açıktır ve doğrudan ölçüm yapılacak yüzey üzerine yerleştirilir. Bu yöntem uluslararası standart kuruluşlarınca trafik gürültü bariyerleri ve yol yüzey ölçümleri için standardize edilmiştir [46], [47], [48]. Tüpün açık ucunda, muhtemel kaçakların ölçüm üzerine etkilerini engellemek amacı ile flanş bulunmaktadır. Flanş ses kaçaklarını tam olarak engelleyemez ve yöntemin kısıtlayıcısı da bu kaçaklardır. Eğer test edilen yüzey geniş, homojen, izotropik ve düzlemsel ise bu yöntemden hassas sonuç alınabilir [49].

2.4.5 Alfa Kabin Ölçüm Yöntemi

Alfa kabinler, otomotiv endüstrisinde geniş kullanım alanı bulan küçük çınlama odalarıdır (Şekil 2.12). Çınlama odalarına benzeşim kurularak tasarlanırlar. Malzemelerin ses yutum katsayısı ölçümleri, herhangi bir ses kaynağı için ses gücü ölçümleri ve birbirine bir geçiş aralığı ile bağlı iki oda ile ses iletim kaybı ölçümleri için kullanılırlar. İlk olarak

Rieter firması tarafından geliştirilmiştir ve bu firmanın ürünü alfa kabinlerde doğrulama için referans kabin olarak kullanılmaktadır. Renault, akustik ölçümleri için alfa kabinleri test yöntemi olarak standartlaştırmıştır [51]. Toyota firması ise ses iletim katsayısı ölçümlerini de içeren daha geniş kullanım alanına sahip bir modelini test yöntemi olarak kabul etmiştir [50].



Şekil 2.13 Alfa Kabin [53]

Kabin iç hacmi 6.44 m^3 , numune boyutu ise 1.2 m^2 'dir. 400 Hz ile 10 kHz arasında ölçüm yapılabilmektedir [53]. Ölçüm yapılabilen frekans aralığı, küçük numune gereksinimi ve parça bazında ölçüm yapılabilmesi otomotiv endüstrisinde tercih edilmesinin sebebidir. Test düzeneği standart çınlama odalarındaki ile benzerdir. Dağınık ses alanının tam bir şekilde sağlanabilmesi amacı ile oda duvarları birbirine paralel olmayacak şekilde tasarlanmıştır. Yine dağınıklığı artırmak için duvarlara dağıtıcı paneller yerleştirilir.

Akustik alan, üç köşeye yerleştirilmiş ses kaynağı ile tahrik edilir. Ölçümler, farklı noktalara yerleştirilmiş birden fazla mikrofon ile veya hareket edebilen bir kol üzerine yerleştirilmiş mikrofon ile birden fazla noktada yapılır. Sabine tarafından geliştirilen çınlama süresi formülasyonu ile her bir nokta için çınlama süresi ölçümleri yapılarak

ortalama değer, kabin çınlama süresi olarak alınır. Yutum katsayısı hesabında çınlama odalarındaki alfa yutum katsayısı 0,92 düzeltme faktörü ile apılır.

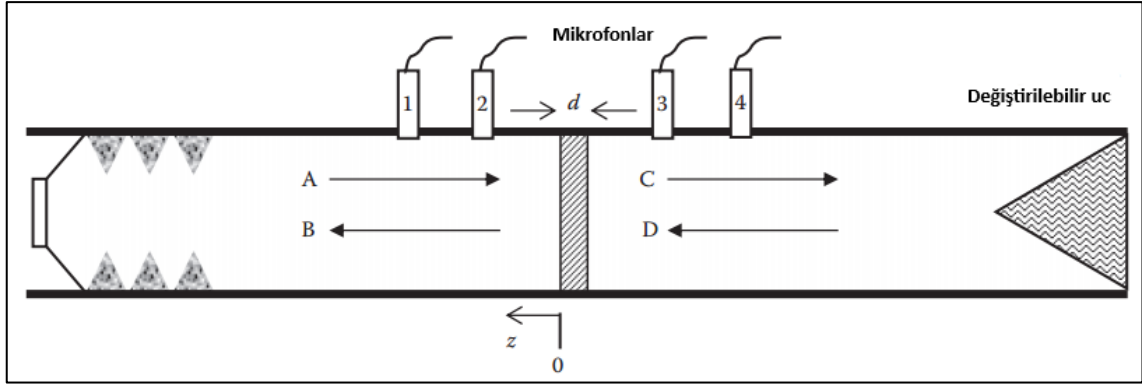
2.5 Ses İletim Kaybı lm Yöntemleri

Ses iletim kaybı ölçümleri için uluslararası kuruluşlarca standartlaştırılmış ölçüm yöntemleri mevcuttur. lm yapılan akustik alanın yapısına bağlı olarak dağınık alan veya dik geliş şartlarında ses iletim kaybı belirlenebilir.

2.5.1 Empedans Tüpü Yöntemi ile Ses İletim Kaybı lm

Empedans tüpü yöntemi ses iletim kaybı ölçümleri için de kullanılabilir. Tp içerisindeki basınç alanı düzlem dalga karakteristiğinde olduğundan, yalnızca dik geliş ses iletim kaybı (TL_N) lmleri yapılabilir. Dik geliş ses iletim kaybı ölçümleri için iki genel method bulunmaktadır. Birincisi transfer matris yaklaşımını temel alır, ikincisi ise dalga alanı analizi teorisini temel alır. En sık kullanılan transfer matris yöntemi ise iki-yük ve iki-kaynak yöntemidir. Bu yöntemler empedans tüpü ölçümlerinde dört mikrofon yöntemi olarak da isimlendirilir. İki-yük yönteminde, ses kaynağı gürültü üretimi için tüpün bir ucuna yerleştirilir ve sesin akış yönündeki dört mikrofondan da ses basınç seviyesi ölçümü yapılır. İki-kaynak yönteminde ise, ses basınç seviyeleri ses kaynağının yerleştirildiği taraftaki mikrofondan ölçülür ve daha sonra ses kaynağı diğer uca alınarak diğer tüpteki mikrofondan da ses basınç seviyesi ölçümü yapılır. Her iki yöntem de aynı sonucu verir [60].

şekil 2.13’de dört mikrofonlu bir empedans tüpü ölçüm düzeneği şematik olarak gösterilmektedir. Tüpün sağ ucunda gösterilen bölge yankısız ucu göstermektedir. Bu uçta yankısızlık, akış direnci yavaş artan kalın gözenekli yutucu malzeme ile veya yankısız takoz ile sağlanır. Buradan ses dalgalarının geri yansımaları durumunda 1 ve 2 numaralı mikrofondan numunenin n tarafından tekrar sesi alabileceği için yankısız u kritik öneme sahiptir.



Şekil 2.14 Ses iletim kaybı ölçümü için empedans tüpü düzeneği [1]

Şekil 2.14’de dört mikrofonlu bir model gösterilmekle birlikte teoride dört mikrofon gereksinimi yoktur.

Tüp içerisinde yüksek frekans değerlerinde düzlem dalga yayılımını sağlamak için iç çapın küçük olması gerekmektedir. Yaklaşık 4 cm çaplı bir tüp ile 5 kHz’e kadar yutum katsayısı ölçümü yapılabilir.

Şekil 2.14’de A, B, C ve D tüp içerisindeki düzlem dalga bileşenlerinin genliklerini ifade etmektedir. Numunenin sol tarafında basınç ve hız;

$$p = Ae^{jkz} + Be^{-jkz}, \quad u = \frac{1}{\rho c} (Ae^{jkz} - Be^{-jkz}) \quad (2.23)$$

Numunenin sağ tarafında ise;

$$p = Ce^{jkz} + De^{-jkz}, \quad u = \frac{1}{\rho c} (Ce^{jkz} - De^{-jkz}) \quad (2.24)$$

(2.23) ve (2.24) denklemlerinde k dalga sayısını göstermektedir. Dört mikrofon pozisyonundan (p_1, p_2, p_3, p_4) alınan basınç ölçümlerini kullanarak, (2.23) ve (2.24) denklemleri ile basınç genliklerini veren ifadeleri bulmak mümkündür.

$$A = \frac{p_1 e^{-jkz_2} - p_2 e^{-jkz_1}}{2j \sin(k(z_1 - z_2))}, \quad B = \frac{p_2 e^{-jkz_1} - p_1 e^{-jkz_2}}{2j \sin(k(z_1 - z_2))}$$

$$C = \frac{p_3 e^{-jkz_4} - p_4 e^{-jkz_3}}{2j \sin(k(z_3 - z_4))}, \quad D = \frac{p_4 e^{-jkz_3} - p_3 e^{-jkz_4}}{2j \sin(k(z_3 - z_4))} \quad (2.25)$$

(2.25) denklemleri ile her bir mikrofon pozisyonu için genlikler bulunduktan sonra, numunenin ön ve arka kısmı için (2.23) ve (2.24) denklemleri yardımı ile basınç ve hız değerleri bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} p^r & p^a \\ u^r & u^a \end{bmatrix}_{z=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^r & p^a \\ u^r & u^a \end{bmatrix}_{z=-d} \quad (2.26)$$

Ses dalgasının numuneden geçerek yayılışını (2.26) ile transfer matrisi formunda gösterebiliriz. İletim katsayılarını tespit etmek için, numunenin ses dalgalarına nasıl tepki verdiğini gösteren T_{11} , T_{12} , T_{21} ve T_{22} matris elemanlarına ihtiyaç vardır. Tüpün kapalı ucu için farklı sınır şartları altında iki ölçüm yapılarak bu matris elemanlarının belirlenmesi için yeterli denklem sayısını elde etmiş oluruz. (2.26)'da r üstel indisi tüpün sağ ucunun rijit olarak kaplı olduğunu, a üstel indisi ise açık olduğunu belirtmektedir. Bu iki durumda ölçüm yapılarak çözüm için yeterli denklem sayısına ulaşılır.

Bu transfer matrisi elemanları sesin numuneden geçerek tüp içerisinde nasıl yayıldığını gösterir, fakat ses iletim kaybı basınçların oranı olarak tanımlanmasına karşılık bu denklemler hız da içermektedir. İletim kaybını elde etmek için $z = 0$ ve $z = -d$ durumları için (2.23) ve (2.24) denklemleri (2.26)'da yerine koyularak tekrar düzenlendiğinde ölçülen basınç seviyelerine, c ses hızına ve ρ havanın yoğunluğuna bağlı olarak (2.27) denklemi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left(T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho c} + \rho c T_{21} + T_{22} \right) e^{-jkd} & \frac{1}{2} \left(T_{11} - \frac{T_{12}}{\rho c} + \rho c T_{21} - T_{22} \right) e^{-jkd} \\ \frac{1}{2} \left(T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho c} - \rho c T_{21} - T_{22} \right) e^{-jkd} & \frac{1}{2} \left(T_{11} - \frac{T_{12}}{\rho c} - \rho c T_{21} + T_{22} \right) e^{-jkd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Gelen ses dalgasının basıncının numunenin ilettiği sesin basıncına oranının logaritmik ifadesi olan ses iletim kaybı Şekil 2.14'deki gösterime göre $20 \log_{10}(|A/C|)$ olarak ifade edilir. Tüpün sesin gelişine göre numuneden geçtikten sonraki kısmını tam yansımaz olarak aldığımızda (2.27) denkleminde $D = 0$ olmaktadır.

$$TL = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{2} \left| T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho c} + \rho c T_{21} + T_{22} \right| \right) = 20 \log_{10} |\tau| \quad (2.28)$$

Bu durumda (2.27) denkleminde ses iletim kaybı (2.28) ile ifade edilir. Empedans tüpleri ölçümlerinde kullanılan ve yukarıda teorisi verilen transfer matrisi yöntemi prosedürü ASTM E2611 ile standardize edilmiştir [14]. Empedans tüpü yöntemi ile standart ses iletim kaybı ölçümlerinin bazı sınırlamaları ise aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Kullanılan tüp çapına bağlı olarak ölçüm yapılabilir frekans aralığı kısıtlıdır.

$$f_{maks} = 0.586 \frac{c_o}{d} \quad (2.29)$$

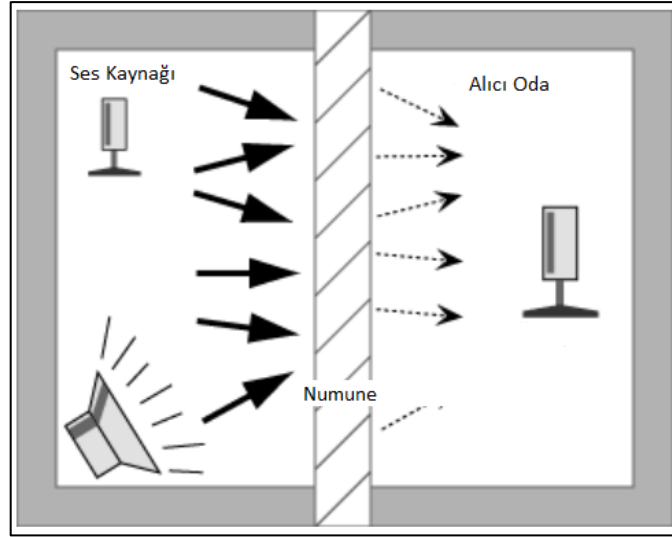
Ölçüm yapılabilir maksimum frekans değerini gösteren (2.29) denkleminde c_o ortamdaki ses hızını, d tüp iç çapını ifade etmektedir.

- Yalnızca dik geliş (normal incidence) ses iletim kaybı ölçümü yapılabilir.
- Ölçüm için yalnızca küçük numuneler kullanılabilir. Komponent seviyesinde ölçüm yapılmasına olanak sağlamaz. Bu yüzden daha çok malzeme geliştiriciler tarafından tercih edilir.

2.5.2 Ses İletim Kaybı Odaları ile Ölçüm

Ses iletim kaybı ölçümlerinde kullanılan bir diğer yöntem, yankılı veya yankısız oda çiftlerinden oluşan iletim kaybı odaları ölçüm yöntemidir. Bu yöntemde, odalar birbirine numune montajına imkân sağlayan bir ara aparat ile birleştirilmiştir ve her iki odadan da ses basınç seviyesi ölçümü yapılarak numunenin ses iletim karakteristiği belirlenir. Bu iki odanın birinde ses kaynağı ve ses basınç seviyesini ölçen mikrofon, alıcı oda olarak isimlendirilen diğer odada ise ses basınç seviyesini ölçen mikrofon yer alır (Şekil 2.14).

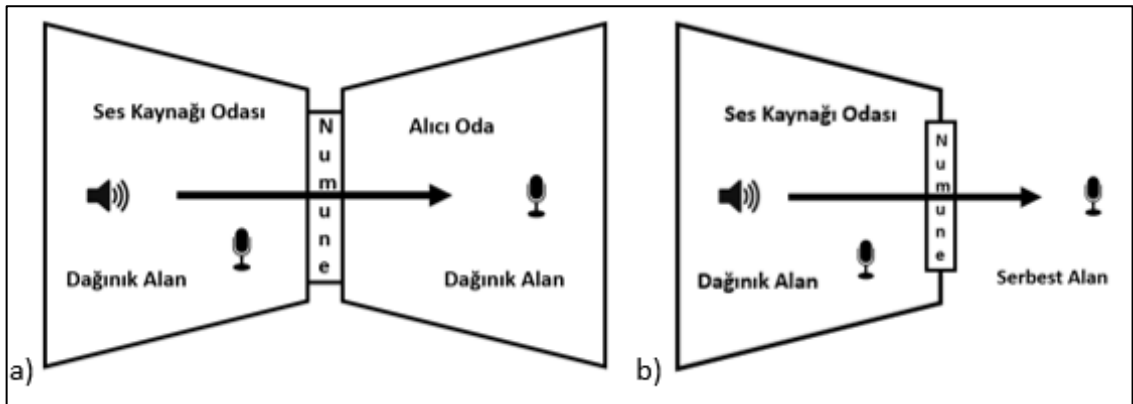
Test düzeneği tasarlanırken iki oda birbirinden akustik olarak ayrılmış olmalıdır. Yani, numunenin yerleştirildiği çerçeve boşluğu hariç iki oda arasında hava kaynaklı veya yapısal kaynaklı ses iletimi olmamalıdır. Ayrıca odalar zeminden de izole edilerek zemin kaynaklı ses iletiminin de önüne geçilmelidir. Ses kaynağının bulunduğu oda ile numune arasında ve alıcı oda ile numune arasında yapısal süreksizlikler sağlanarak odaların duvarlarından numune üzerine aktarılacak titreşimlerin de önüne geçilmelidir. Bu süreksizliği sağlamak için numune tutucu aparatın ses kaynağının bulunduğu odaya ve alıcı odaya bağlantısında, araya kauçuk yalıtım malzemesi yerleştirilir.



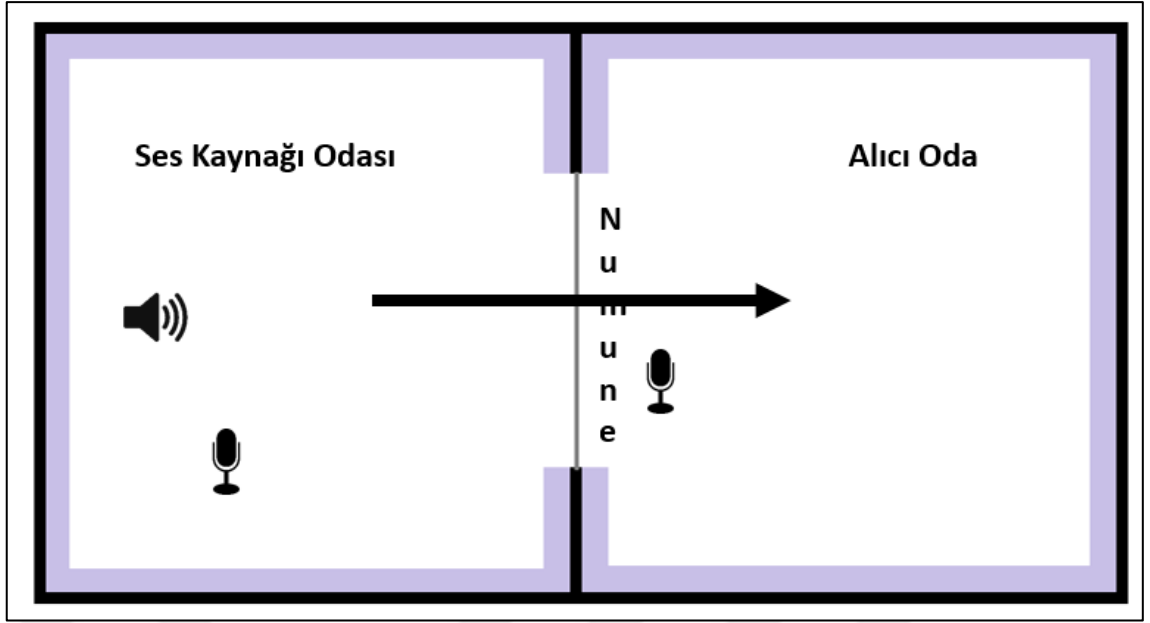
Şekil 2.15 Ses İletim Kaybı odası ölçümü şematik gösterimi

Ses iletim kaybı odalarında yapılan ölçümlerde ses kaynağı olarak rastgele gürültü kaynağı kullanılır. Ölçüm yapılacak frekans aralığının tamamını tekbiçimli şekilde tahrik etmek için ise yönsüz ses kaynağı kullanılır. Ayrıca ses kaynağı olarak kullanılan hoparlörler odanın köşelerine yerleştirilerek oda içerisinde doğrudan ses alanı oluşumu azaltılmış olur.

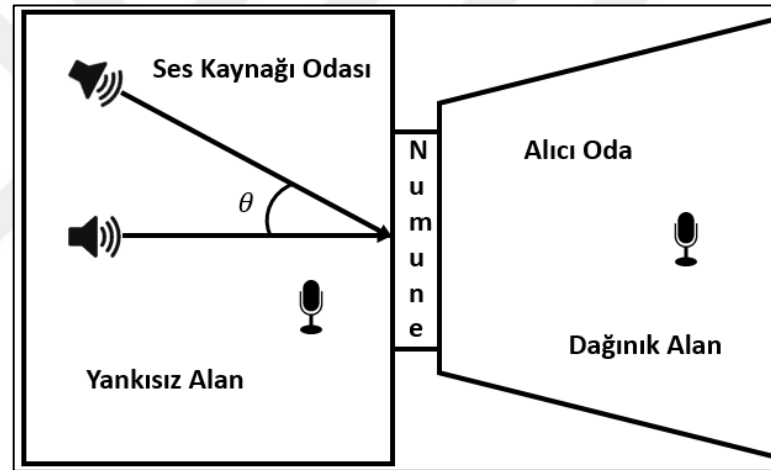
Ses iletim kaybı odaları kullanılarak yapılan ölçümler için birkaç farklı tipte oda düzeneği kurulabilir. ASTM E90 ve ISO 140 uluslararası standartları ile belirlenmiş ses iletim kaybı ölçüm düzenekleri, iki çınlama odası kullanılan düzeneklerdir (Şekil 2.15). Bunların yanında; ses kaynağının bulunduğu bir çınlama odası ve alıcı bulunan bir yankısız oda (serbest alan) (Şekil 2.16), iki yankısız oda (Şekil 2.17), bir yankısız oda (ses kaynağı) ve bir çınlama odası (alıcı oda) (Şekil 2.18) ölçüm düzenekleri de kullanılır.



Şekil 2.16 a) İki çınlama odalı ses iletim kaybı ölçüm düzeneği, b) Bir çınlama odası ve bir yankısız ortam ses iletim kaybı ölçüm düzeneği



Şekil 2.17 İki yankısız odalı ses iletim kaybı ölçüm düzeneği



Şekil 2.18 Yankısız oda ve çınlama odalı ses iletim kaybı ölçüm düzeneği

Ses iletim kaybı odaları kullanılarak yapılan ölçümlerde, ses kaynağının bulunduğu oda yankısız olduğu durumda yapılan ses iletim kaybı ölçümü, dik veya açılı tekil etki eden ses dalgaları altındaki iletim kaybı karakteristiğini verir. Kaynak odası çınlanım odası olması durumunda ise malzemenin dağınık alan şartları altında rastgele geliş ses iletim kaybı karakteristiğini verir.

İki çınlanım odası kullanılan standart test düzenekleri, odalardaki ses basınç seviyelerinin farkının ölçümüne dayanır. Denklem (2.11) ile gürültü azaltma indisi olarak verilen ses basınç seviyeleri arasındaki farka alıcı odanın çınlama özellikleri ile ilişkili düzeltme faktörü de eklenerek denklem (2.30) ile ses iletim kaybı bulunur.

$$TL = NR + 10 \log \frac{S_n}{A} \quad (2.30)$$

(2.30)'da S_n test numunesinin ses iletim alanını, A ise Sabine tarafından bulunan dağınık alan şartlarında alıcı odanın eşdeğer ses yutum alanını gösterir.

$$A = S\tilde{\alpha} \quad (2.31)$$

Alıcı odanın toplam yutumunu veren (2.31) denkleminde S toplam yüzey alanını, $\tilde{\alpha}$ yüzeylerin ortalama yutum katsayısını göstermektedir. Alıcı oda olarak yankısız oda kullanılan test düzeneklerinde odanın yutumu sonsuz olacağından $\tilde{\alpha} = 1$ olur ve ses iletim kaybı gürültü azaltma indisine eşit olur. Alıcı odanın çınlama odası olması durumunda odanın toplam yutumunu veren A , çınlama süresi ölçülerek bulunabilir.

$$A = \frac{55.3V}{c_0 T_{60}} \quad (2.32)$$

Alıcı çınlama odasında ses basınç seviyesi ölçümü birkaç noktadan yapılarak ortalama ses basınç seviyesi hesaplanır.

$$P_2 = 10 \log \frac{\frac{L_1}{10^{10}} + \frac{L_2}{10^{10}} + \frac{L_3}{10^{10}}}{3} \quad (2.33)$$

Ses iletim kaybı odaları ile ölçüm yöntemi de çınlama odaları gibi büyük ve kurulumu maliyetli olduğundan çınlama odalarının sahip olduğu ölçüm sınırlamalarına sahiptir. Ayrıca yankısız odalarda teoride olduğu gibi tamamen yankısız ortamın oluşturulması da oldukça zordur.

Çınlama odalarında dağınık alan teorisinin varsayımına göre akustik enerji odanın her yerinde eşittir. Fakat odanın yüzeylerinde, köşelerde ve yüzeylerin birleştiği kenarlarda durum gerçekte böyle değildir. Bu alanlarda, gelen ses dalgası ile yansıyan ses dalgası çakıştığı için akustik enerjide artış olmaktadır [67]. Waterhouse etkisi olarak isimlendirilen bu etki denklem (2.30)'a düzeltme faktörü olarak eklenerek denklem (2.34)'deki gibi ifade edilir [66].

$$TL = NR + 10 \log \frac{S_n}{A} + 10 \log \frac{(1 + \lambda S_k / 8V_k)}{(1 + \lambda S_a / \lambda V_a)} \quad (2.34)$$

Denklem (2.34)'de S_k ses kaynağının bulunduğu odanın toplam alanını, V_k ses kaynağı odasının hacmini, S_a alıcı odanın toplam yüzey alanını, V_a alıcı odanın hacmini, λ ise oktav bandı merkez frekansındaki ses dalgasının dalga boyunu ifade etmektedir.



KÜÇÜK ÇINLAMA ODASI

Bu tez çalışması ile birlikte, ses iletim kaybı ve ses yutum katsayısı ölçümlerinin özel laboratuvarlar inşa edilmesine gerek kalmadan herhangi bir laboratuvar ortamında modüler olarak yapılabilmesi amacı ile alfa kabin olarak da isimlendirilen küçük çinlama odası tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Bu bölümde alfa kabinlerin akustik, mekanik tasarımı ve üretimi incelenecektir. Bölüm 2’de teorisi verilen çinlama odaları için geçerli olan hesaplamalar ve varsayımlar alfa kabinler için de geçerlidir ve tasarımda kullanılacaktır.

3.1 Tasarım Kriterleri ve Enstrümantasyon



Şekil 3.1 İkiz alfa kabin

Tasarımı yapılacak olan alfa kabin test düzeneği ile hem ses yutum katsayısı hem de ses iletim kaybı ölçümleri yapılması amaçlanmaktadır. Ses iletim kaybı ölçümleri için iki çınlama odalı sistem kullanılacaktır (Şekil 3.1). Her iki oda da ayrı ayrı ses yutum katsayısı ölçümleri yapılabilecek şekilde enstrümante edilmiştir. Her bir oda için kullanılan donanımlar;

- Dewesoft veri toplama cihazı,
- 3 hoparlör,
- Mikrofon,
- Mikrofon pozisyonu değişimi için step motorlu döndürme düzeneği,
- Nem ve sıcaklık ölçüm sensörü,
- Kontrol ünitesi
- 400 Hz – 10 kHz aralığı için analog çıkış frekans üretici (Dewesoft)

Çınlama odaları için uygun akustik alanın oluşturulabilmesi ve belirtilen akustik özelliklerin ölçümü için tasarım gereklilikleri aşağıdaki gibidir.

- Ölçümü yapılan numune ve içeride oluşturulan akustik ortama kabin duvarlarından kaynaklı yapısal titreşim etkisini azaltmak için duvarlar mümkün olduğu kadar rijit olmalı,
- Uygun dağınık alanın oluşturulabilmesi amacı ile birbirine paralel herhangi iki duvar olmayacak şekilde geometri oluşturulmalı,
- Kabin duvarlarının iç yüzeyi yansıtıcı olmalı ve akustik olarak mükemmel yalıtılmış olmalı,
- Ses iletim kaybı ölçümleri için kullanılan numune tutucu aparat farklı kalınlıklardaki numunelerin ölçümüne imkân sağlayacak şekilde olmalı,
- Tam dağınık alan oluşturulması amacı ile duvarlara dağıtıcı/yansıtıcı yüzeyler yerleştirilmeli.

Tekrarlanabilir ve doğru ölçümler yapılabilmesi için kabin yalıtımı ve kabin iç yüzeylerinde kullanılan dağıtıcı yüzeyler kritik tasarım ölçütleri olarak belirtilebilir.

Özellikle kapı bölgesi ve ses iletim kaybı ölçümleri için oluşturulan numune açıklığı kapağı, ses yalıtımı açısından zayıf noktaları oluşturmaktadır ve yapısal tasarımda göz önünde bulundurulmalıdır. Kabin üretim başlığı altında bu bölgelerin tasarımı ile ilgili detaylı bilgi verilecektir.

3.2 Test Düzeneği Çalışma Prensibi

Alfa kabinlerde test düzeneği standart çınlama odalarındaki ile benzerdir. Tez çalışması kapsamında tasarımı yapılan ikiz alfa kabin test düzeneği ile ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı ölçümleri yapılabilmektedir. Ses iletim kaybı ölçümleri için odaların bir duvarında ölçüm açıklığı bulunmaktadır. Numune tutucu aparat ile numune, bir odanın duvarındaki numune açıklığı üzerine monte edildikten sonra odalar bir araya getirilerek ölçüm yapılır (Şekil 4.7).

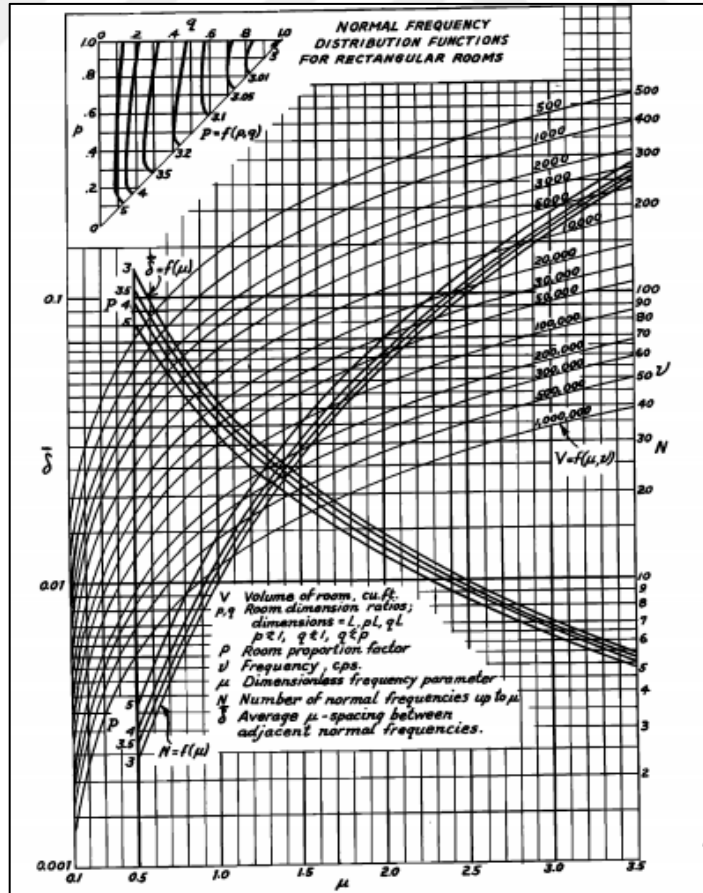
Taşınabilir olarak tasarlanan odalar farklı mekânlarda ölçüm yapılmasına olanak tanımaktadır. Farklı noktalardan veri toplayacak olan mikrofon, alfa kabin yazılımı ile hareketi kontrol edilerek dönebilen bir kola bağlıdır. Mikrofon, yazılım kontrolü ile her bir veri toplama işleminden sonra bir sonraki konumuna otomatik olarak geçmektedir. Bu şekilde sekiz farklı noktadan çınlama süreleri verisi toplanır ve ortalaması alınarak odanın çınlama süresi tespit edilir.

3.3 Akustik Tasarım

Standart büyük çınlama odalarının akustik davranışını anlamak bu odaların ölçeklendirilmesiyle oluşturulan alfa kabinlerin akustik davranışını anlamak için de önemlidir. Büyük odalara kıyasla akustik hacmin küçüldüğü küçük odalarda kararlı akustik dalga oluşumu yüksek frekanslara kaymaktadır. Aynı zamanda düşük frekanslarda dağınık alanın elde edilmesi daha zor olmaktadır. Kapalı alandaki havanın modlarının analitik olarak hesaplanması dikdörtgensel hacimdeki odalar için mümkün iken düzensiz şekle sahip odalarda analitik olarak hesaplanması mümkün olmayıp nümerik yöntemler kullanılır. Oda ön tasarımında, daha basit olan analitik hesaplamaların yapılabilmesi için dikdörtgen şekil ile tasarıma başlanabilir. Ancak dikdörtgensel odalarda havanın modları belli frekanslarda toplanır ve bu frekanslarda ses alanı dağınıklığı düşüktür.

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (3.1)$$

Denklem (3.1) dikdörtgensel bir kapalı alandaki havanın doğal frekanslarını vermektedir. Burada c ses hızını, n_x, n_y, n_z mod sırasını, L_x, L_y, L_z kenar ölçülerini ifade etmektedir [6]. Odanın doğal frekansları arasındaki mesafe, dağınık alanın kalitesi hakkında bilgi verir. Eğer doğal frekanslar belli bir frekans etrafında kümelenmiş ise dağınık alan oluşmamış demektir. Dikdörtgensel odalarda biribine paralel iki duvar arasında oluşan aksel modlar, duvarların herhangi birinin yüzey özelliklerindeki değişiklikten etkilenir fakat diğer paralel duvarların aksel modları etkilenmez. Bu durum dağınık alan üzerinde olumsuz etki oluşturur ve çınlama süresinin yani zamana bağlı ses basınç seviyesi düşüm eğrisinin doğrusallığını bozar. Diktörgensel olmayan odalarda ise aksel modlar bulunmaz ve yüzeylerin herhangi birindeki değişiklik bütün modları etkiler. Bu yüzden, özellikle küçük hacimli odalarda, oda şekli doğal frekansların dağılımını etkilemektedir.



Şekil 3.2 Ortalama doğal frekans aralığı ve boyutsuz frekans faktörü [28]

Oda kenar ölçülerinin birbirine olan oranları ve duvar açıları üzerinde çalışılarak homojenlik açısından doğal frekans dağılımı iyileştirilebilir. Bolt, dikdörtgensel odalarda oda kenar ölçülerinin birbirine olan oranlarının düşük frekanslar için doğal frekans dağılımını etkilediğini gösteren istatistiksel çalışmaları yaparak, bu çalışmaları bir tabloya indirgemıştır [35], [36]. Şekil 3.2'deki tablo, hacmi ve kenar ölçülerinin oranları bilinen dikdörtgensel bir odanın, verilen frekans aralığındaki doğal frekanslarının sayısını bulmak için kullanılabilir. Bu tablo aynı zamanda, birbirini takip eden doğal frekanslar arasındaki ortalama mesafenin belirlenmesi için de kullanılır. Homojen frekans dağılımına sahip dikdörtgensel bir oda tasarımı için oda kenar ölçülerinin birbirine oranlarının belirlenmesinde bu tablodan faydalanılabilir.

$$\psi = \frac{1}{\mu_a - \mu_b} \sum_a^b \left(\frac{\delta_N^2}{\bar{\delta}} \right) \quad (3.2)$$

Bolt aynı zamanda çalışmalarında, doğal frekans dağılımındaki homojenliğin bir göstergesi olan düşük frekans mesafe göstergesini (ψ) tanımlamıştır [35]. Doğal frekanslar arasındaki gerçek mesafelerin ortalama mesafelere oranının ortalama kare sapmasını ifade eden bu gösterge denklem (3.2) ile verilmiştir. ψ değeri ne kadar büyükse frekans aralıklarındaki değişim de o kadar yüksektir ve ses dağılımı düzensizdir. Burada δ modlar arası gerçek mesafeyi, $\bar{\delta}$ ortalama mesafeyi, μ_a ve μ_b ise incelenen frekans aralığını boyutsuz frekans parametresi olarak ifade etmektedir.

$$\mu = \frac{V^{\frac{1}{3}} f}{c} \quad (3.3)$$

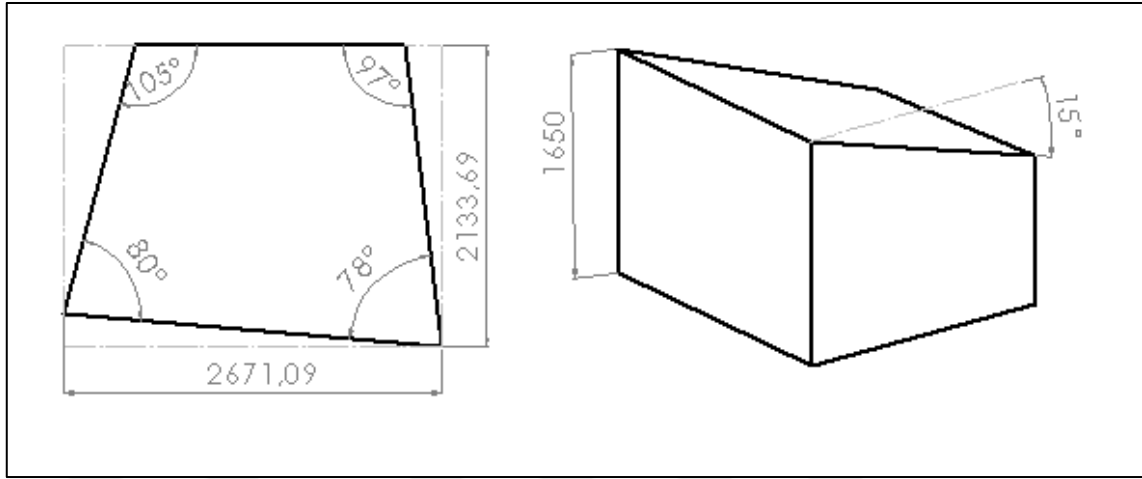
Denklem (3.3)'de V hacmi, f frekansı ve c ses hızını ifade etmektedir. Boyutsuz frekans parametresi, oda ölçülerine bağlı olmadan çalışma yapılmasına olanak sağlar.

$$\Omega = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (|\varepsilon_i| - \Gamma)^2}{(n-1)\Gamma^2} \quad (3.4)$$

$$\Gamma = \sqrt{\psi - 1} \quad (3.5)$$

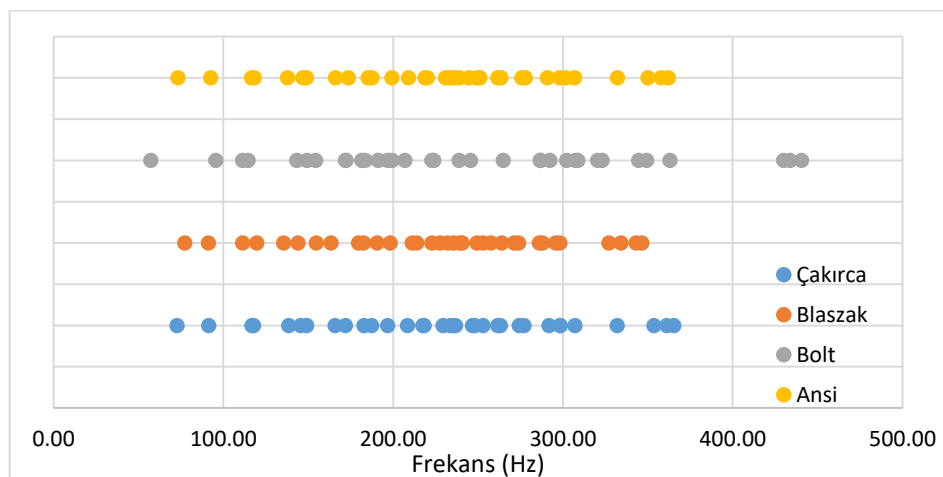
Blaszak ise ψ göstergesinin frekans dağılımının homojenliği hakkında tam bilgi vermediğini söyleyerek denklem (3.4) ile ifade edilen Ω göstergesini tanımlamıştır [37].

Burada n mod sayısını, ϵ_i birbirini takip eden iki doğal frekans arasındaki gerçek mesafeden sapmayı ifade etmektedir. Ω değeri de ne kadar yüksekse birbirini takip eden doğal frekanslar arası mesafedeki değişim de o kadar fazladır.



Şekil 3.3 Alfa kabin boyutları

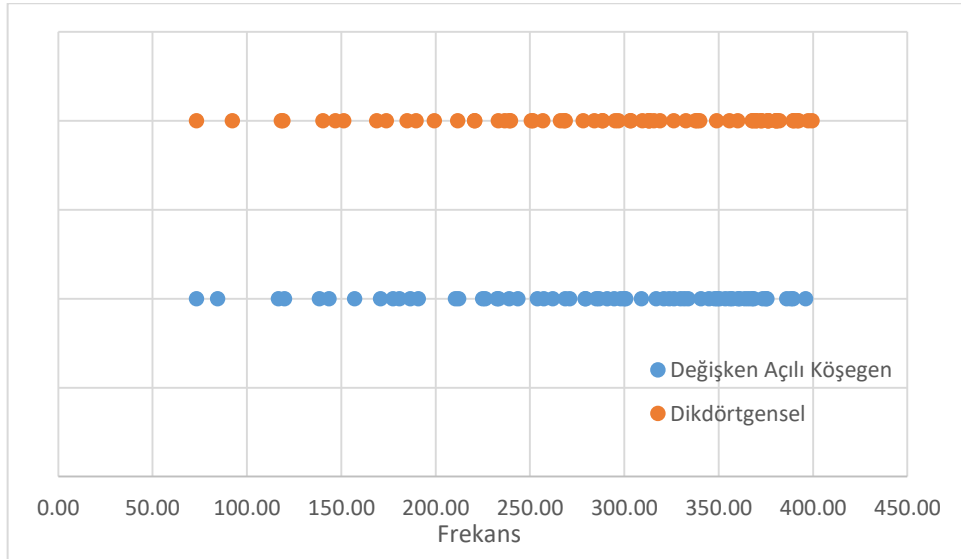
Bolt, 1:1.5:2.5 oranlarını en yumuşak doğal frekans cevabının sağlandığı oranlar olarak belirtmiştir. Yumuşaklıktan kasıt, doğal frekanslar arasındaki mesafe değişimlerinin az olması yani düşük ψ değeridir. $\psi = 1.5$ değeri yumuşak frekans cevabı için limit değer olarak alınmaktadır. Blaszak ise 1.5'den küçük ψ ve 100'den küçük Ω değerini veren, 1:1.22:1.44 ve 1:1.23:1.46 oranlarını önermiştir. ANSI (Amerikan Ulusal Standart Enstitüsü) tarafından yapılan çalışmada ise bu oran 1:1.26:1.59 olarak verilmiştir. Tez çalışması ile tasarımı yapılan alfa kabin için 1:1.29:1.62 oranları belirlenmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.4 Çeşitli oda ölçü oranlarının doğal frekans dağılımı

Şekil 3.4’de Bolt, Blaszak ve ANSI tarafından önerilen oranlarda kenar ölçülerine sahip oda ile tez çalışmasına konu tasarım için belirlenen oranlarda kenar ölçülerine sahip oda hacminin doğal frekans dağılımı, analitik olarak hesaplanarak gösterilmiştir. Hesaplar aynı hacime sahip dikdörtgensel odalar için yapılmıştır. Böylece oda kenar oranlarına bağlı doğal frekans dağılımı kıyaslaması daha doğru şekilde yapılabilmiştir.

Dikdörtgensel odalarda, birbirine paralel herhangi iki duvar kalmayacak şekilde oda duvarlarına açı verilmesi, homojen doğal frekans dağılımına katkı sağlar. Şekil 3.3’de tasarımı yapılan odanın duvarlarına verilen açı miktarları görülmektedir. Düzensiz şekle sahip odalarda düşük frekans bantları için çınlama süreleri değişiminde azalma olduğu görülmektedir. Bu durum yukarıda da belirtildiği gibi, birbirine paralel duvarların ortadan kaldırılması ile eksenel modların da ortadan kalkmasının sonucudur. Ayrıca düzensiz şekilli odalarda, doğal frekans dağılımını gösteren ψ değeri de düşmektedir [38]. Duvarlarının birbirine paralel olmadığı düzensiz şekle sahip odaların doğal frekans hesabı analitik yöntemlerle mümkün olmamaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi gibi numerik yöntemlerle doğal frekans dağılımı elde edilebilir. Şekil 3.5’de tez çalışmasında tasarımı yapılan açılı duvarlara sahip odanın doğal frekans dağılımı, sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanarak dikdörtgensel oda ile karşılaştırılması gösterilmiştir. Her iki durum için de sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.5 Düzensiz şekilli oda ve dikdörtgensel odanın sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen doğal frekans dağılımı

Dağınık alan üzerinde etkisi olan diğer bir geometrik etken oda duvarlarına monte edilen veya tavana asılan dağıtıcılardır (Şekil 3.6). Ses dalgalarının yayılma yolu üzerine yerleştirilen dağıtıcılar, ses alanının daha tekdüze dağılıma sahip olmasını sağlar [40]. Dağıtıcılar panel veya küresel şekilde, sabit veya bir motor yardımı ile dönebilen yapıda olabilirler. Dönebilen dağıtıcılarda motordan dolayı oluşan ek görüntü ses alanı için olumsuz etki oluşturmaktadır. Duvarlara monte edilen sınır dağıtıcıların derinliği maksimum frekansın dalga boyunun $\frac{1}{4}$ 'ü kadar veya daha büyük olmalıdır. Nolan vd. tarafından [40] da yapılan çalışmada çeşitli tipteki dağıtıcıların ses alanı üzerine etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada dağıtıcıların etkisi dağınık alan faktörü göz önüne alınarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.6 Panel ve küresel dağıtıcılar [40]

Dağınık alan faktörü, çınlama süresindeki teorik varyasyonun ölçülen varyasyona oranını ifade etmektedir. Çınlama süresindeki varyasyon, oda içerisinde kararlı ses alanının sabit olmayıp konum ve zaman ile değişim göstermesinden kaynaklanmaktadır. Bu değişimler ses kaynağı kesildikten sonra ses alanının dağılması esnasında da meydana gelir [70]. Bu durumla birlikte odanın dağınık alan davranışını anlamak için incelenmesi gereken iki önemli durum vardır. Birincisi, kararlı durumda ses dağınıklığı; ikincisi, geçici durumda ses dağınıklığıdır. Kararlı durumdaki ses dağınıklığı, ses kaynağı açıldıktan ve kararlı ses alanının oluşması için belli bir süre geçtikten sonra oda içerisinde farklı noktalarda yapılan ses basınç seviyesi ölçümleri ile tespit edilir. Geçici durumda ise, zamana bağlı ses basınç seviyelerindeki değişimin çınlama süresi üzerine etkisini gösteren bir teori geliştirilmiştir [71], [72].

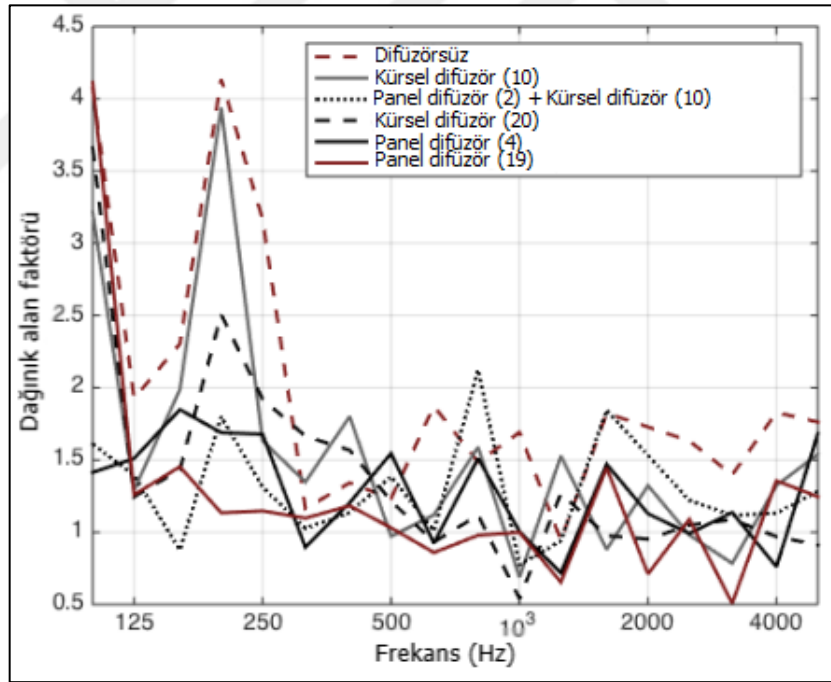
$$var_s(T_{60}) = T_{60} \left(\frac{10}{\ln 10} \right)^2 \left(\frac{720}{BD^3} \right) F \left(D \frac{\ln 10}{10} \right) \quad (3.6)$$

$$F(x) = 1 - 3 \frac{(1+e^{-x})}{x} - 12 \frac{e^{-x}}{x^2} + 12 \frac{(1-e^{-x})}{x^3} \quad (3.7)$$

$$B_i = 1,2 * 0,23 * f_m \quad (3.8)$$

Denklem (3.6) teorik konumsal varyasyonu vermektedir. Burada B_i , istatistiksel bant genişliğidir ve f_m merkez frekans olmak üzere 1/3 oktav bantları için yaklaşık olarak eşitlik (3.8) ile ifade edilir. D, standart konumsal sapması bulunmak istenen çınlama süresi düşüm miktarıdır (dB). Teorik konumsal varyasyon değerleri farklı frekansların ses düşümünün eşit olduğu varsayımı yapılarak türetilmiştir. Gerçek koşullar farklı sonuçlar verecek şekilde farklı olabilir. Eğer ses alanı az dağınık ise teorik değerlere göre gerçek konumsal değişim artar, fazla dağınık ise azalır.

$$f_d = \frac{var_{m,s}(T_{60})}{var_{t,s}(T_{60})} \quad (3.9)$$

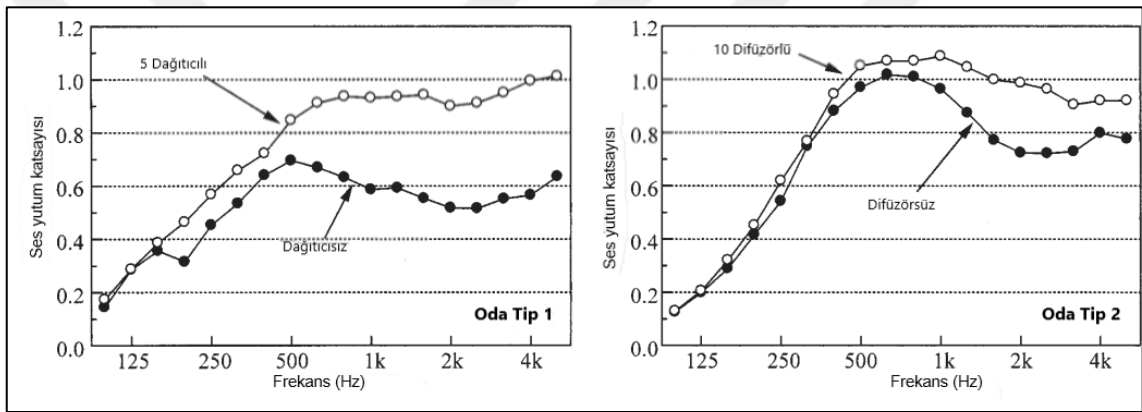


Şekil 3.7 Farklı dağıtıcı tiplerinin dağınık alan üzerine etkisi [40]

Eşitlik (3.9) ile verilen, ölçülen konumsal varyasyonun hesaplanan teorik varyasyona oranı dağınık alan faktörünü göstermektedir. Dağınık alan faktörü ne kadar küçükse ses alanının dağınıklığı o kadar iyidir. Nolan'ın çalışmasında farklı dağıtıcı tiplerinin ses alanının dağınıklığı üzerindeki etkisinin dağınık alan faktörü ile ifadesi Şekil 3.7'de

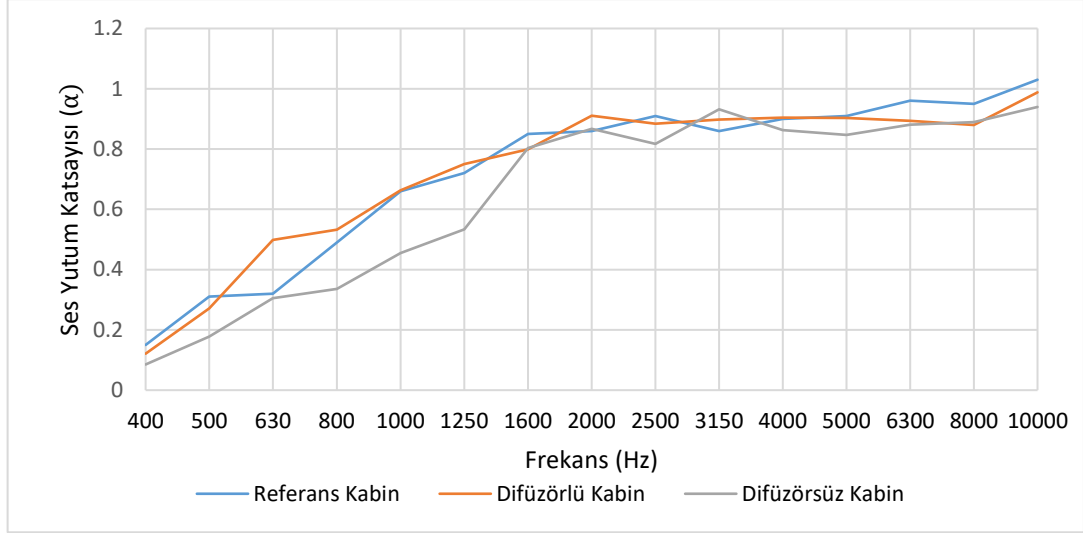
gösterilmiştir. Dağınık alan faktörü, ses alanının dağınıklığı hakkında kabaca bilgi edinmek için kullanılabilir ancak küçük değişimlerde tutarlı sonuçlar vermemektedir. Bu yöntem ile ses alanının dağınıklığı hakkında tatmin edici ve güvenilir sonuçlar alınamamaktadır [40].

Dağıtıcı eklenmesi ile ses yutum katsayısı değerleri artmaktadır. Özellikle dikdörtgenel odalarda bu etki daha fazla görülmektedir. Toyoda vd. tarafından [39] da yapılan çalışmada dağıtıcıların oda içerisindeki dağılımı ve sayısının dağınık alan ve ses yutum üzerine etkisi incelenmiştir. Şekil 3.8’de tip 1 olarak belirtilen dikdörtgenel oda ile tip 2 olarak belirtilen birbirine paralel kenarı bulunmayan düzensiz şekilli odalarda dağıtıcıların etkisi görülmektedir.



Şekil 3.8 Dağıtıcı sayısının oda tipine göre ses yutumu üzerine etkisi [39]

Panel tipi dağıtıcıların dağınık alan açısından daha iyi başarımlar gösterdiği yukarıda belirtilen çalışmalarda görülmektedir. Dağıtıcı malzemesinin düşük yutumlu bir malzeme olması ideal dağınık alana ulaşılmasına katkı sağlayacaktır. Dağıtıcı sayısının belirlenmesi yutum testleri ile yapılır. Dağıtıcı olmadan ve dağıtıcı sayısını artırarak birden fazla ölçüm yapılır. Ses yutum katsayısında artışın durduğu ölçümdeki dağıtıcı sayısı yeterli dağıtıcı olduğunu gösterir [7].



Şekil 3.9 Dağıtıcının ses yutumu üzerindeki etkisi

Tez çalışması kapsamında üretilen alfa kabin için 3 adet dağıtıcı kullanılmıştır. Şekil 3.9’da dağıtıcı olmadan ve dağıtıcı eklendikten sonraki durumda ses yutum katsayısındaki değişim görülmektedir. Dağıtıcı eklenmesi ile referans kabin değerlerine %10 fark ile yaklaşmıştır.

Buraya kadar dağınık alan üzerindeki etkisinden bahsedilen geometrik faktörler düşük frekanslar için geçerlidir. Yüksek frekanslarda ise geometrinin etkisi kaybolur ve doğal frekanslar homojen dağılım göstererek hacme bağlı hale gelir [32]. Doğal frekansların dağılımında geometrinin etkisiz hale gelmeye başladığı nokta Schroeder frekansı (2.18) olarak isimlendirilen kritik frekans değeri ile başlar. Tez çalışmasında tasarlanan odanın hacmi $6,44 \text{ m}^3$ ’dür. Denklem (2.18)’e göre kabinin Schroeder frekansı 1246 Hz’dir.

Kabin içerisinde dağınık alan yöntemi açısından doğru akustik alanın elde edilmesinde akustik alanı tahrik edecek olan hoparlörlerin de önemli etkisi vardır. Çınlama odalarında ses iletim ve ses yutum ölçümleri için yüksek seviye genişbant ses kaynağına gerek duyulur. Genelde bu aralık yaklaşık olarak 100 Hz ile 10 kHz aralığıdır. İdeal bir ses kaynağı, bütün frekanslarda ve bütün yönlerde aynı verimlilikte ses yayabilen tek nokta ses kaynağıdır fakat mevcut teknoloji ile böyle bir hoparlör sürücüsü mümkün olmadığından tahrik frekans aralığı bölünerek iki ya da üç ses kaynağı kullanılır. Çınlama odalarında kullanılan hoparlörlerde genel olarak aranan temel iki özellik düz frekans cevabına sahip olması ve küresel ses yayma kabiliyetinin olmasıdır [73]. Frekans cevabının düz olması, hoparlörün bütün frekanslarda aynı ses basınç seviyesini vermesi

demektir. Küresel yayma kabiliyeti (Q) ise her yönde eşit yoğunlukta ses enerjisi yayabilmesi demektir.

3.4 Alfa Kabin Üretimi

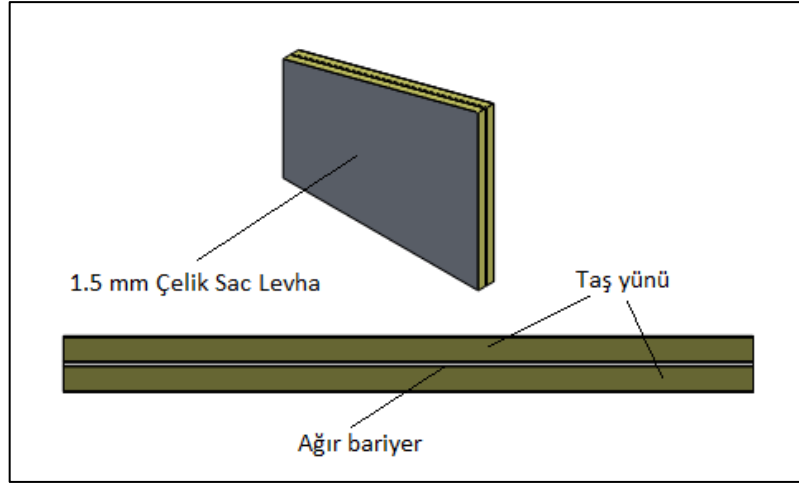
Kabin üretiminde, doğru akustik alanın sağlanması için gerekli olan geometrik şartların yanı sıra rijitlik ve sızdırmazlık gibi önemli yapısal özelliklerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Rijitlik ve akustik sızdırmazlığın sağlanabilmesi amacı ile beton, ahşap omurgalı akustik panel ve çelik sac yüzeyli akustik panel gibi yapısal duvar elemanları kullanılabilir (Şekil 3.10). Beton yapılar akustik sızdırmazlığın ve yansıtıcılığın iyi sağlandığı yapılar olsa da, imalat ve pratik kullanım açısından zordur. Duvarların rijit olması, akustik olarak yansıtıcı yüzeyler elde edilerek daha uzun çınlama süresi elde edilmesini sağlar. Ayrıca duvar panellerinin, ses dalgalarının tahriki ile rezonansa girerek ek gürültü oluşturmalarının önüne geçer.



Şekil 3.10 Ahşap (sol) ve Beton (sağ) duvar yapısına sahip alfa kabinler

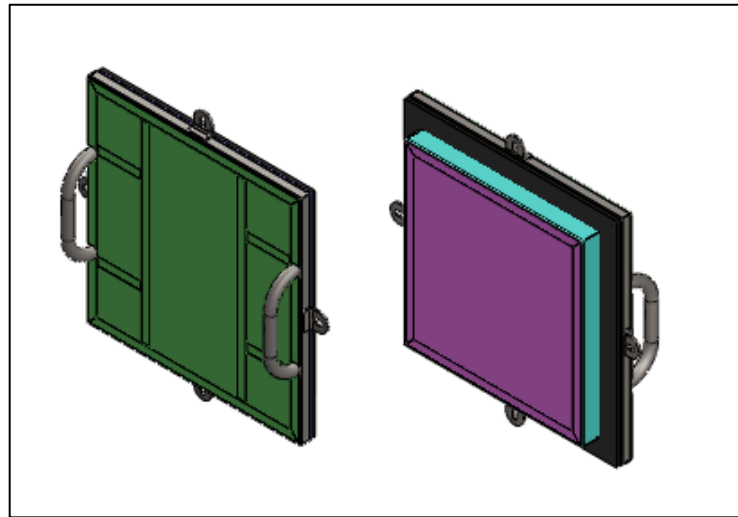
Bu çalışma kapsamında üretilen kabinde, özel olarak oluşturulmuş akustik panel yapısı kullanılmıştır. 1.5 mm kalınlığındaki çelik iç ve dış duvar levhaları arasına 50 mm kalınlığında ortasında ağır bariyer bulunan taş yünü sandviç levha yerleştirilmiştir (Şekil 3.11). Taş yünü levha ses dalgalarının yutumunu sağlarken ağır bariyer de ses iletimini azaltmaktadır. Ayrıca iç duvar saclarının duvar içinde kalan yüzeyine bitüm esaslı, bir yüzeyi yapışkanlı ses yalıtım bariyeri yapıştırılarak sacın titreşimi sönmülmüştür.

Duvarları ve tavanı taşıyan profillerin içi boş olduğundan profil bölgeleri akustik sızdırmazlık açısından duvar yapısının zayıf bölgelerini oluşturmaktadır. Profillerdeki olası kaçakları azaltmak amacı ile kutu profillerin içi akustik köpük ile doldurulmuştur.



Şekil 3.11 Kabin duvar yapısı

Kabin üretiminde genel olarak akustik sızdırmazlık açısından en riskli bölgeler duvarların birleştiği köşe bölgeleri, ses iletim kaybı ölçümleri için açılan numune açıklığı bölgesi ve kapı bölgesidir. Ses iletim kaybı ölçümü için açılan numune açıklığı ses yutum ölçümü yapılırken Şekil 3.12’deki kapak ile kapatılmaktadır. Kapak yapısı da duvar yapısı gibi ağır bariyerli taş yünü sandviç panel yapısındadır. Kapağın oda duvarlarına basan montaj yüzeylerine kauçuk ve akustik sünger yapıştırılarak sızdırmazlık sağlanması gerekmektedir.



Şekil 3.12 Numune penceresi kapağı

Sızdırmazlık, doğru ses yutum ve iletim ölçümü için kritik öneme sahiptir. Bu yüzden, hoparlör, mikrofon vs. kablolarının dışarı çıkış noktaları titiz bir şekilde tasarlanmalı ve üretilmelidir. Kabloların oda dışına çıkışı doğrudan içeriden dışarıya açılan bir boşluktan yapılmamalıdır. Kablolar duvar arasına geçirilip, taş yünü sandviç panel arasında bir

miktar yol aldıktan sonra başka bir noktadan dışarı çıkarılmalıdır. Bu sayede doğrudan dışarı açılan bir delik olması engellenmiş olur.

Ses iletim ölçümlerinde numune, ölçüm penceresi üzerine numune tutucu bir aparat ile monte edilir (Şekil 3.13). Numune tutucunun akustik sızdırmazlığı ses iletim kaybı ölçümleri için oldukça önemlidir. Bu bölgede olabilecek herhangi bir kaçak malzeme özelliğinin doğru tespit edilebilmesini imkânsızlaştırır.



Şekil 3.13 Numune tutucu aparat

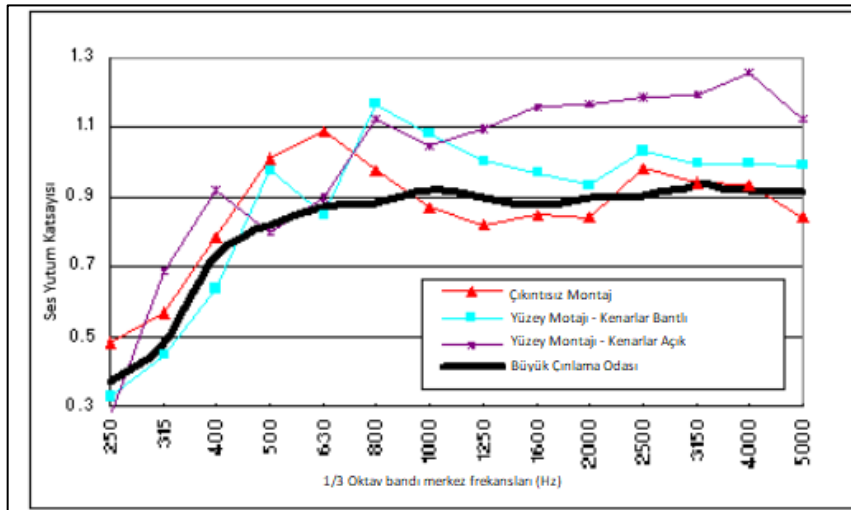
Tasarımdaki numune tutucu doğrudan oda duvarına sekiz adet civata ile sıkıca tutturulmuştur. Toyota'nın hazırlamış olduğu ölçüm standardında oda üzerine sabitlenmiş civatalar üzerene kauçuk numune tutucu çerçeve yerleştirilmektedir [50]. İki odanın birleştirilmesi ise oda duvarından geçen bu altı civata ile yapılmaktadır. Oda duvarına montaj için delik açılması sızdırmazlık açısından riskli görüldüğünden mevcut tasarımda bu şekilde bir yapı tercih edilmemiştir.

Sızdırmazlığa katkı sağlaması amacı ile kabin iç yüzeyi poliürea malzeme ile kaplanabilir. Mevcut kabin tasarımında bu yöntem tercih edilmiştir. Bu kaplama ile köşelerde ve sac plakaların birleşim yerlerindeki boşluklar da kapatılmış olur.



Şekil 3.14 Numune çerçevesi

Çınlama odalarında yöntemin hatalı sonuç vermesine sebep olabilecek etkenlerden biri kenar etkisi olarak isimlendirilen, yutucu elemanın (numune) kenarlarının açıkta kalması durumudur [43]. Açıkta kalan numune kenarları, numunenin yüzeyine göre daha fazla ses enerjisi yutar ve malzemenin gerçek yutum özelliğini yansıtmaz. Bu durumun önüne geçmek için numune yansıtıcı özelliklere sahip bir çerçeve içine yerleştirilir. Mevcut tasarımda çelik keşebent kullanılarak numune ebatlarına uygun çerçeve üretilmiştir (Şekil 3.14). Numune çerçeve içerisine sıkıca yerleştirilmeli ve birleşim yerleri alüminyum bant ile kapatılmalıdır [51].



Şekil 3.15 Alternatif numune bağlama yöntemleri ile ses yutum eğrileri [74]

Numune çerçevesinin kullanılmadığı alternatif bir numune bağlama yöntemi olarak, kabin tabanına yüksekliği ayarlanabilir bir numune boşluğu açılabilir. Çıkıntısız numune montajı olarak isimlendirilen bu bağlama şekli ile kenar etkisi ortadan kalktığından yutum değerleri beklenildiği gibi daha düşük çıkmaktadır [74]. Bu yöntem ile 800 Hz üzerinde büyük çınlama odalarına daha yakın sonuç elde edilmektedir (Şekil 3.15).

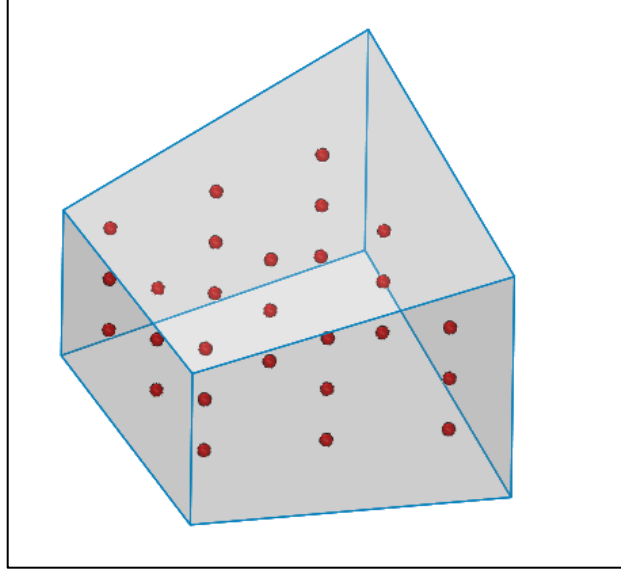
3.5 Tasarım Doğrulamaları

Üretilen kabin yapısal ve akustik gereklilikler açısından doğrulanmıştır. Yapısal gereklilikler sızdırmazlıkla ilgili olup akustik gereklilikler kavitenin modal davranışı, dağınık alan ve çınlama özellikleri ile ilgilidir.

Kabin sızdırmazlığının yeterli seviyede olup olmadığını belirlemek amacı ile ses kaynağı açık iken kabin içinden ve dışından ses basınç seviyesi ölçümleri yapılır. Kabin dışında her bir duvardan bir metre mesefeye mikrofon yerleştirilerek her duvarın ses yalıtım kabiliyeti kontrol edilmiştir. Bu ölçümlerde, kabin içi ile dışı arasında 400 Hz – 10 kHz aralığında her frekans bandı için en az 50 dB ses basınç seviyesi farkı aranmıştır. Her bir duvar ve kapı bölgeleri için yapılan ölçümlerde gereklilik sağlanmıştır.

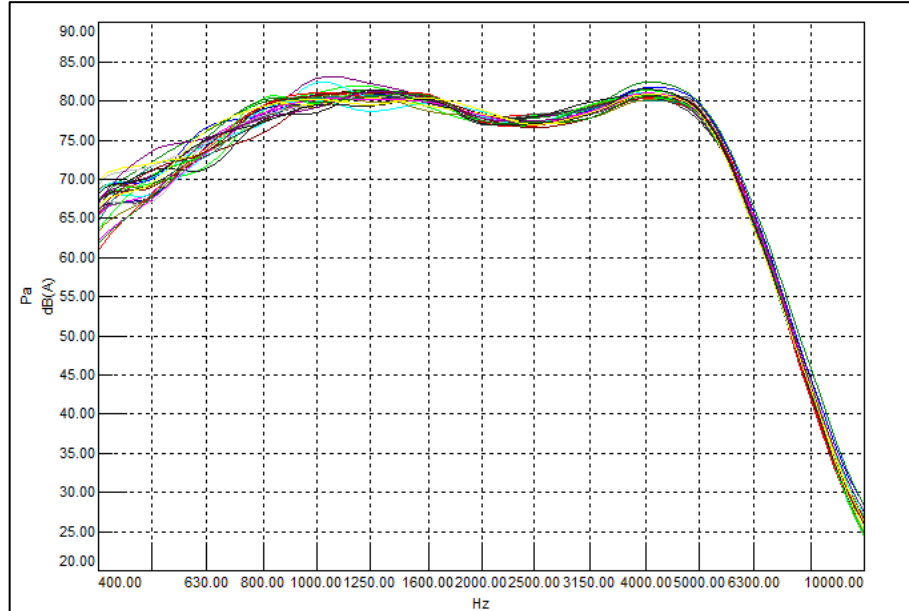
Çınlama odalarının akustik tasarımında en önemli ister ses alanının tam dağınık olmasıdır. Ses alanının dağınıklık kalitesinin belirlemek için birçok deneysel ve teorik yöntem literatürde sunulmuştur. En çok kullanılan iki yöntem çapraz ilgileşim ve konumsal tekdüzelik yöntemleridir.

Kabin içi basınç alanının doğrulanması çalışmaları kapsamında kabin içerisinde 27 noktadan basınç seviyesi ölçümü yapılmıştır (Şekil 3.16). Ölçümler 400 Hz – 10 kHz aralığında band-pass butterworth filtresi ile filtrelenmiş beyaz gürültü uygulanarak yapılmıştır. Bu ölçümler, dağınık alanın oluşup oluşmadığı hakkında fikir vermektedir. Schroeder frekansı üzerinde dağınık ses alanı karakteristiğinin oluşması beklenmektedir. Tasarım kabini için Schroeder frekansı 1246 Hz olarak hesaplanmıştır.



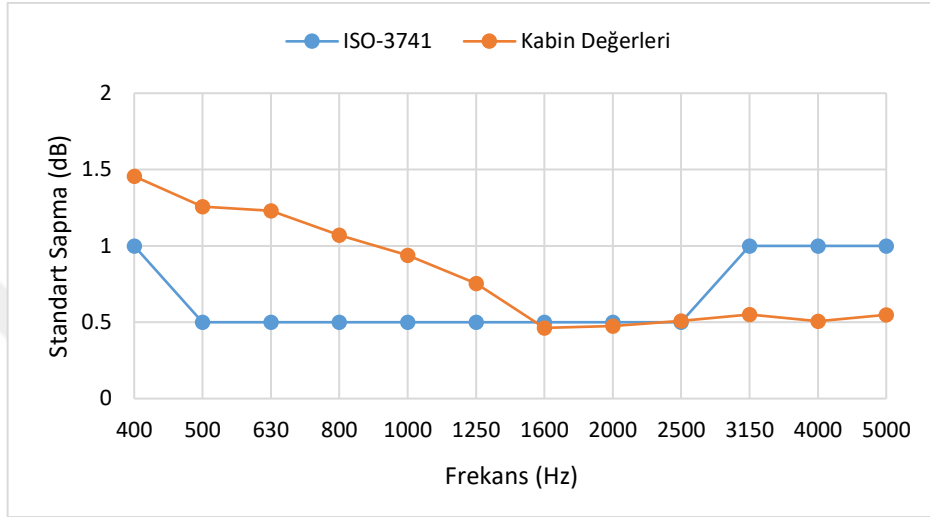
Şekil 3.16 Kabin içi ses basınç seviyesi ölçüm noktaları

Şekil 3.17’de hedef frekans aralığı için her bir ölçüm noktasının 1/3 oktav bantlarında ses basınç seviyelerini göstermektedir. Ses basınç seviyesi eğrilerinden görüldüğü gibi mevcut kabin için dağınık alan durumu Schroeder frekansı civarında oluşmaya başlayarak 1600 Hz üstünde baskın hale gelmektedir. Bilindiği gibi Schroeder frekansı altında kavite modları ayrışmakta ve ses alanının düzenliliği üzerinde modal etki artmaktadır. Bu yüzden, düşük frekanslar için bir düzeltme faktörü belirlenmelidir.



Şekil 3.17 Farklı miktorofon pozisyonlarında kabin içi ses basınç seviyeleri

Dağınık alan kalitesinin konumsal tekdüzelik (spatial uniformity) yöntemi kullanılarak gösterimi, farklı mikrofon pozisyonlarından alınan ses basınç seviyesi ölçümlerinin standart sapmalarının hesaplanması ile yapılır. ISO 3741 standardında 1/3 oktav bandı frekanslarına göre farklı mikrofon pozisyonlarında olması gereken maksimum standart sapma değerleri verilmiştir. Standart, minimum 6 noktadan ölçüm yapılmasını istemektedir.



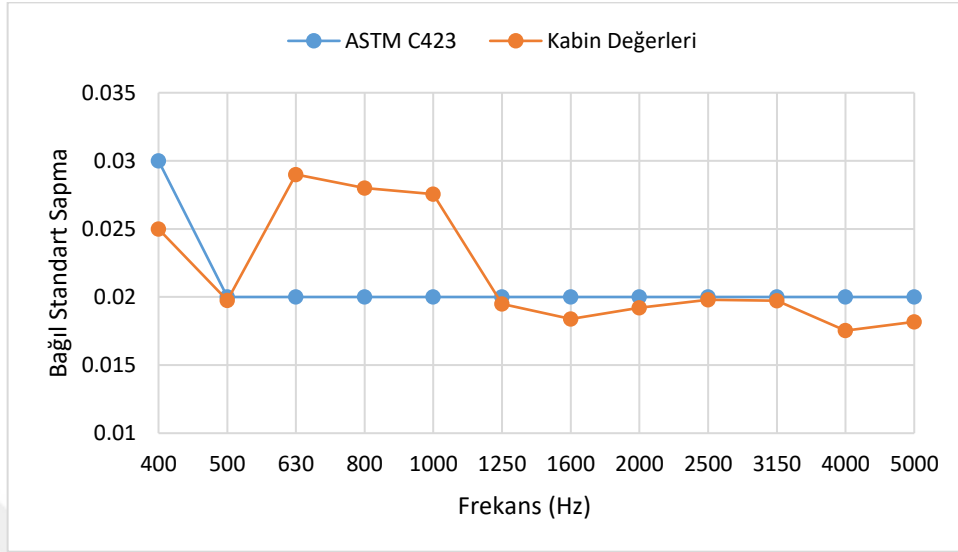
Şekil 3.18 Farklı mikrofon pozisyonlarında kabin içi ses basınç seviyelerinin standart sapmaları

Şekil 3.18’de 27 farklı mikrofon pozisyonu için yapılan ses basınç seviyesi ölçümlerinin standart sapmaları gösterilmiştir. Beklendiği gibi Schroeder frekansı üzerinde basınç dağılımının standart sapması ISO 3741 standardında verilen sınır değerlerin altında kalmaktadır.

$$s_M = \left(\frac{1}{N_M - 1} \sum_{i=1}^{N_M} (d_{Mi} - (d_M))^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

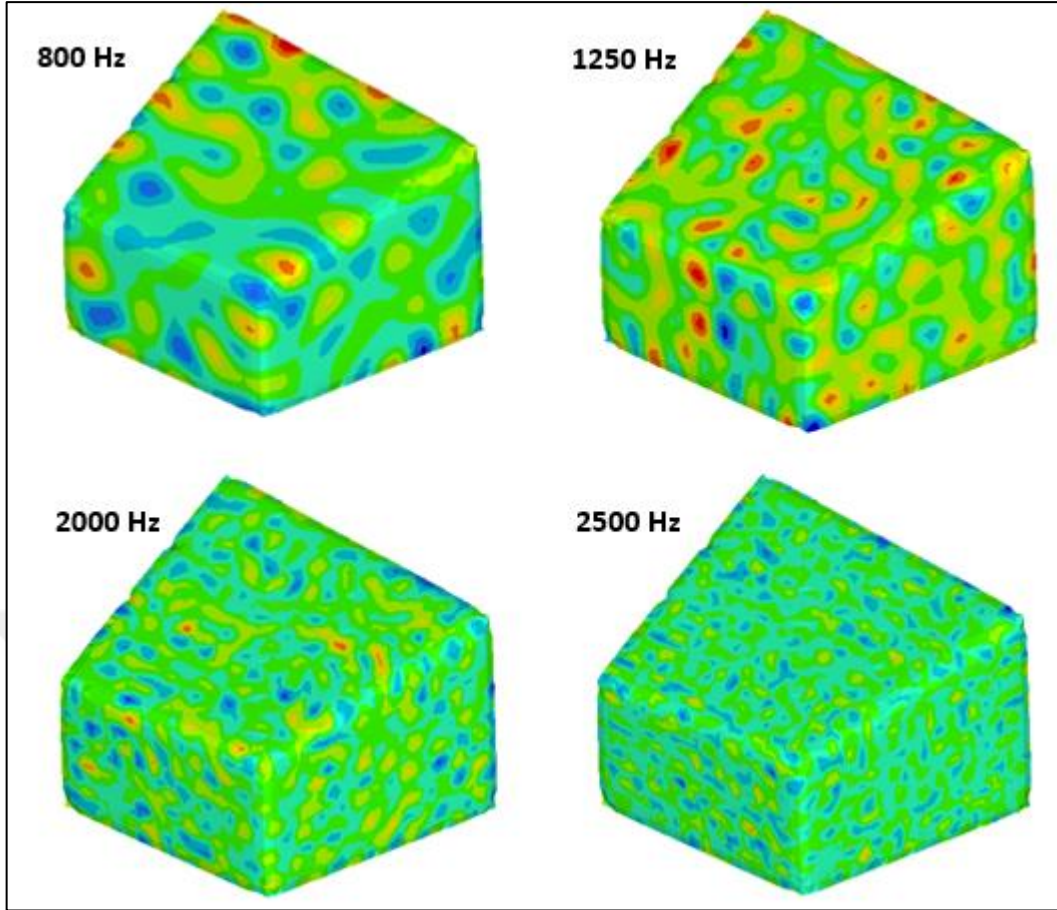
ASTM C423 standardına göre ise, dağınık alan değerlendirmesi farklı mikrofon pozisyonlarındaki çınlama sürelerinin bağıl standart sapmalarına göre yapılmaktadır. Bağıl standart sapma, hesaplanan standart sapmanın ortalama çınlama süresine bölümünü (s_M/d_M) ifade etmektedir ve denklem (3.10) ile hesaplanır. (3.10)’da s_M standart sapmayı, d_M bütün mikrofon lokasyonlarının çınlama sürelerinin ortalamasını, d_{Mi} i ’inci mikrofon pozisyonundaki ölçülen çınlama süresini ve N_M ölçüm yapılan mikrofon pozisyonu sayısını göstermektedir. Şekil 3.19’de 1/3 oktav bantlarında çınlama

sürelerinin bağıl standart sapma eğrisi verilmiştir. Yine buradan da görüldüğü gibi Schroeder frekansı üzerinde, standarda göre dağınık alan oluşmaya başlamaktadır.



Şekil 3.19 Bağıl standart sapma eğrisi

Schroeder frekansı altında, ses basınç dağılımında modal etkinin baskın olduğu yukarıda belirtilmişti. Düzensiz şekilli odalarda analitik yöntemlerle modal etkinin hesaplanması mümkün değildir. Sonlu elemanlar yöntemi gibi nümerik yöntemler kullanılarak düzensiz şekilli odalarda modal dağılım görülebilir. Şekil 3.20’de bu çalışma kapsamında tasarımı yapılan kabin için modal analiz sonuçları görülmektedir. Modal etkinin görüldüğü Schroeder frekansı altında basınç dağılımı bölgesel olarak ayrılmışken, üzerinde ise basınç dağılımının daha homojen olduğu görülmektedir. Düşük frekanslarda tekil modlar etkilidir. Schroeder frekansı üzerinde ise modlar çakışmakta ve tekil modların etkisinden bahsedilememektedir.



Şekil 3.20 Kabin içi doğal frekans dağılımı

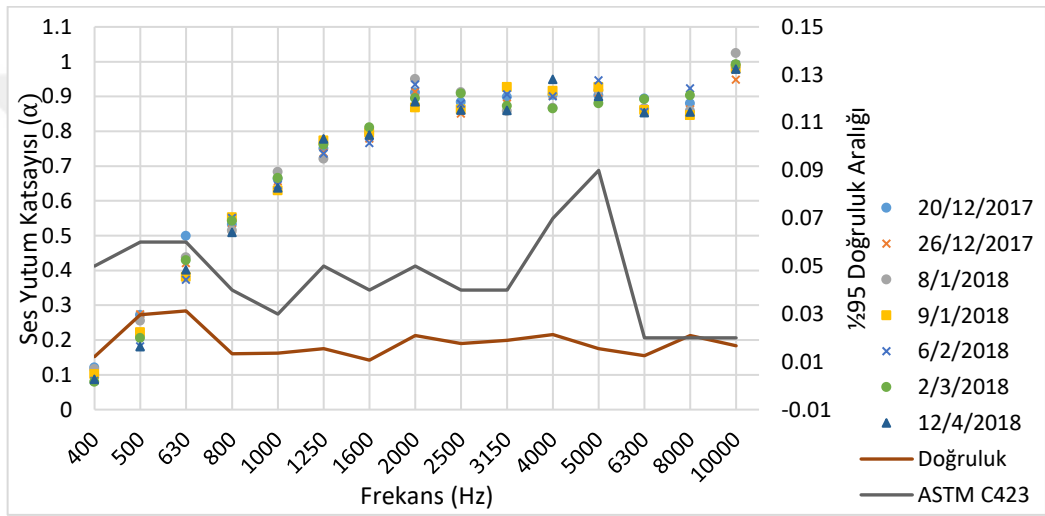
Tasarımı yapılan kabinin ortalama yüzey yutum katsayısının belirlenmesi için boş kabinde ölçümler yapılmıştır. İdeal dağınık alanın simüle edilebilmesi ve numune tarafından oluşturulan doğrudan ses alanının baskıladığı bölgeleri minimize etmek için kabin yüzeyleri düşük yutum özelliğine sahip olmalıdır. Çizelge 3.1’de toplam ve 1/3 oktav frekans bantları için yapılan yutum katsayısı ölçümleri verilmiştir.

Çizelge 1.1 Kabin içi ortalama yüzey yutum katsayıları

	Toplam	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Alfa(α) (Yüzey Ortalaması)	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03

Kabin içerisinde numune herhangi bir yutucu kaplama malzemesi olmadığı için beklendiği gibi ortalama yüzey yutum katsayısı 0.1’den küçük çıkmıştır. ASTM C423-07a standardına göre, 250 Hz – 2500 Hz aralığında oda yüzeylerinin ortalama yutum katsayısı 0.05’den küçük olmalıdır. 2500 Hz üzerinde ise 0.1’e eşit veya küçük olmalıdır [8]. Çizelge 3.1’de verilen sonuçlar standardın isterleri ile örtüşmektedir.

Ölçümlerin tekrarlanabilirliği sağlıklı ölçümler yapılabilmesi açısından önemlidir. Standart çınlama odaları için istenen laboratuvarlar arası tekrarlanabilirlik round robin çalışmaları ile standartlarda belirlenmiştir. Hem laboratuvarlar arası hem de aynı laboratuvardaki kabin için %95 doğrulukla tekrarlanabilirlik istenmektedir [8]. Alfa kabinlerde ise standart bir üretim yöntemi belirlenmediğinden laboratuvarlar arası tekrarlanabilirlik daha düşük olabilir. Ancak aynı kabinde yapılan ölçümlerin tekrarlanabilir olması gerekmektedir. Kabin tekrarlanabilirliğinin gösterilmesi amacı ile aynı numune üzerinde farklı zamanlarda ses yutum katsayısı ölçümü yapılmıştır (Şekil 3.21).



Şekil 3.21 Farklı zamanlarda yapılan ses yutum katsayısı ölçümlerinin %95 doğruluk aralığı

ASTM C423 standardında tekrarlanabilirlik için verilen değerler, ard arda yapılan iki ölçümün mutlak farkının üst limitini vermektedir. Ayrıca tabloda verilen değerler %95 doğruluk aralığının üst limit değeri olarak da alınabilir. Şekil 3.21'de tez çalışmasında tasarımı yapılan kabinin 1/3 oktav bandı merkez frekanslarında %95 doğruluk aralığı değerlerinin standarttaki değerler ile karşılaştırılması görülmektedir [8].

Standartta, büyük çınlama odaları için 5 kHz'e kadar tekrarlanabilirlik değerleri verilmiştir. Tasarım kabini için 5 kHz üzerinde 0,2 değeri alınmıştır. Beklendiği gibi küçük kabinde düşük frekans bölgesinde tekrarlanabilirlik düşük olmaktadır. Ayrıca düşük frekans bölgesinde ortam şartlarındaki değişimler de tekrarlanabilirlik üzerinde etkilidir. Bu yüzden, ard arda yapılacak ölçümlerde veya aynı numunenin farklı zamanlarda yapılacak ölçümlerinde ortam şartlarının aynı olmasına dikkat edilmelidir.

ALFA KABİN İLE SES YUTUM VE SES İLETİM ÖZELLİKLERİNİN ÖLÇÜMÜ

Otomotiv endüstrisinde malzemelerin ses yutum özelliklerinin belirlenmesi yolcu konforunu artırma çalışmalarında önemli bir aşamayı oluşturmaktadır. Otomotiv endüstrisinin yanında mimari ve makine endüstrisinde de gürültü kontrolü çalışmalarında önemli bir yer tutmaktadır. Malzemelerin akustik özelliklerinin belirlenmesi amacı ile kullanılan yöntemler hali hazırda uluslararası kuruluşlarca düzenlenerek standardize edilmiştir. Her ne kadar standartlaştırma çalışmaları yapılmış olsa da, yöntemlerin geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

Bu bölümde, üçüncü bölümde tasarımı ve doğrulama çalışmaları yapılan alfa kabin ile ses yutum ve ses iletim katsayısı ölçümlerinin gerçekleştirilme aşamaları anlatılacaktır.

4.1 Ses Yutum Ölçümü ve Yutum Katsayısının Belirlenmesi

Ses yutum ölçümleri için otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan üç farklı malzeme seçilmiştir (Şekil 4.1). Çizelge 4.1’de seçilen malzemelerin kalınlık ve yoğunluk bilgileri verilmiştir. Bu tez çalışması ile tasarlanan küçük çınlama odasında 400 Hz-10kHz arasında ses yutum katsayısı ölçümü yapılabilmektedir.

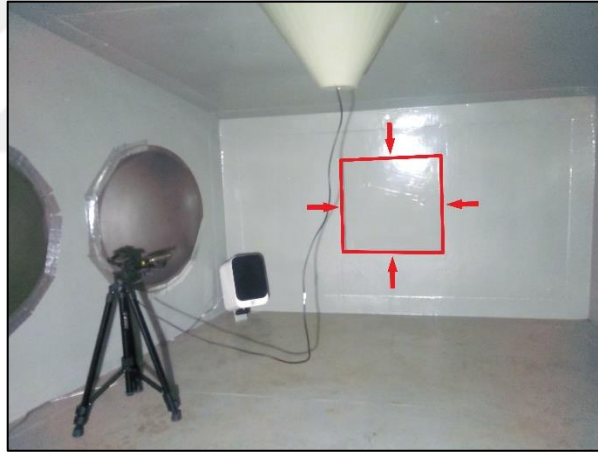


Şekil 4.1 Akustik malzemeler

Çizelge 1.1 Test numunesi malzeme bilgileri

Malzeme Adı	Ölçüler	Yoğunluk
M1: Keçe 450 gsm hardlayer + 600 gsm recycl	100x120x2 cm	1500 gr/m ²
M2: %60 PET - %40 PP	100x120x2 cm	1300 gr/m ² – 1000 gr/m ²
M3: %35 Bico – %20 Cotton - %45 Wste	100x120x2 cm	1200 gr/m ²

Kabin, ses iletim kaybı ölçümlerinin de yapılabilmesi için ikiz kabin olarak tasarlanmıştır. Her iki kabin de ses yutum ölçümleri için kullanılabilir. Ses yutum ölçümleri yapılacağı zaman, kabin duvarında bulunan ses iletim kaybı ölçüm aralığı sızdırmazlık sağlanacak şekilde kapatılmalıdır. Kapağın kabin iç yüzeyinde kalan kısmı ile çerçeve arasında, yapıdan kaynaklı bir boşluk oluşmaktadır. Ölçüm esnasında bu kısım alüminyum kaplı bitüm bant ile kapatılmalıdır (Şekil 4.2). Bu sayede kapak ile çerçeve arasındaki boşluktan dolayı oluşacak ek yutum etkisinin önüne geçilmiş olur.



Şekil 4.2 STL numune penceresi kapağı

Tasarlanan kabinde kullanılan donanımlar, enstrümantasyon bölümünde belirtilmiştir. Ses alanının tahrik edilmesi için sinyal üreticiden 400 Hz – 10 kHz aralığında yedinci dereceden band-pass butterworth filtreli gürültü oluşturulmaktadır. Ses yutum ölçümü, kabin yüzeylerinin toplam yutumu ile çınlama süresi arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Ölçümler, kabin için özel olarak oluşturulan alfa kabin yazılımı ile kontrol edilmektedir. Numune kabine yerleştirilmeden önce, boş kabin ölçümleri yapılarak T_0 boş kabin çınlama süreleri tespit edilir. Numune, kabine numune çerçevesi kullanılarak yerleştirilir

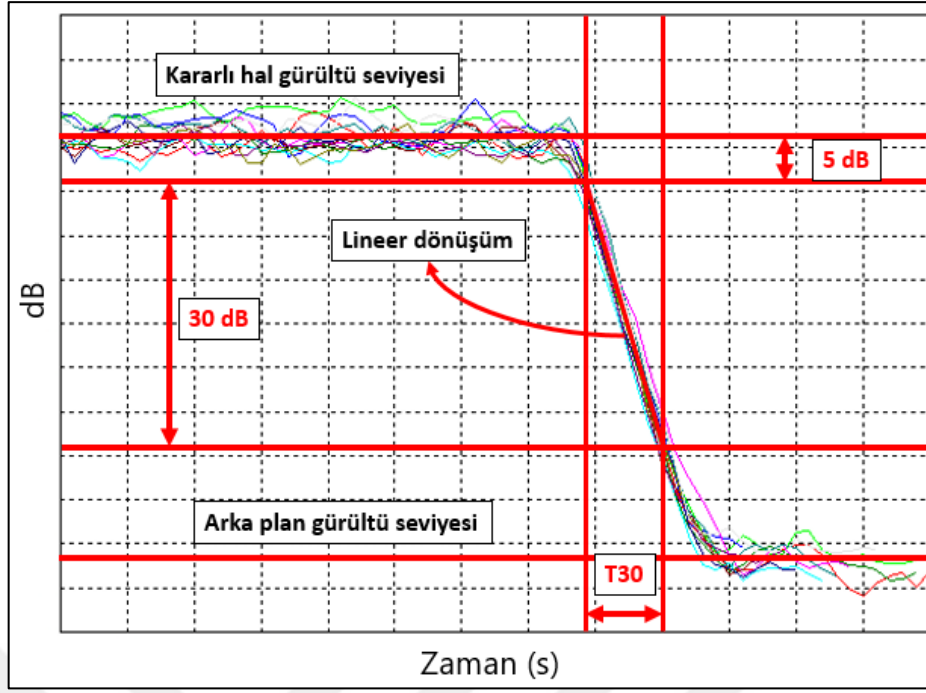
(Şekil 4.3). Numune yerleştirildikten sonra, numune çerçevesinin kenarları alüminyum bant ile kapatılmalıdır.



Şekil 4.3 Numunenin, numune çerçevesine ve oda tabanına yerleştirilmesi

Çınlama sürelerinin belirlendiği ses düşüm eğrilerinin ölçümünde iki metod kullanılmaktadır; kesilmiş gürültü (interrupted noise) yöntemi ve tümleşik impuls cevabı (integrated impulse response) yöntemi. Bu çalışmada tasarlanan alfa kabinde ses seviyesi düşüm eğrileri kesilmiş gürültü metodu kullanılarak belirlenmiştir. Kesilmiş gürültü yöntemi istatistiksel bir yöntem olup, ses düşüm eğrileri bir mikrofon pozisyonundan toplanan birden fazla verinin ortalaması alınarak elde edilir [7].

Ölçümün başlatılması ile kabin içerisinde 8 mikrofon pozisyonundan ses basınç seviyesi verisi toplanmaktadır. Her mikrofon pozisyonunda, ses alanının kararlı hale gelmesi için 8 saniye boyunca gürültü verilir ve bu süre sonunda gürültü aniden kesilerek 5 saniye süre ile veri toplamaya devam edilir. Bütün mikrofon pozisyonları için veriler toplanıp işlendiğinde Şekil 4.4'deki gibi ses düşüm eğrileri elde edilmektedir.

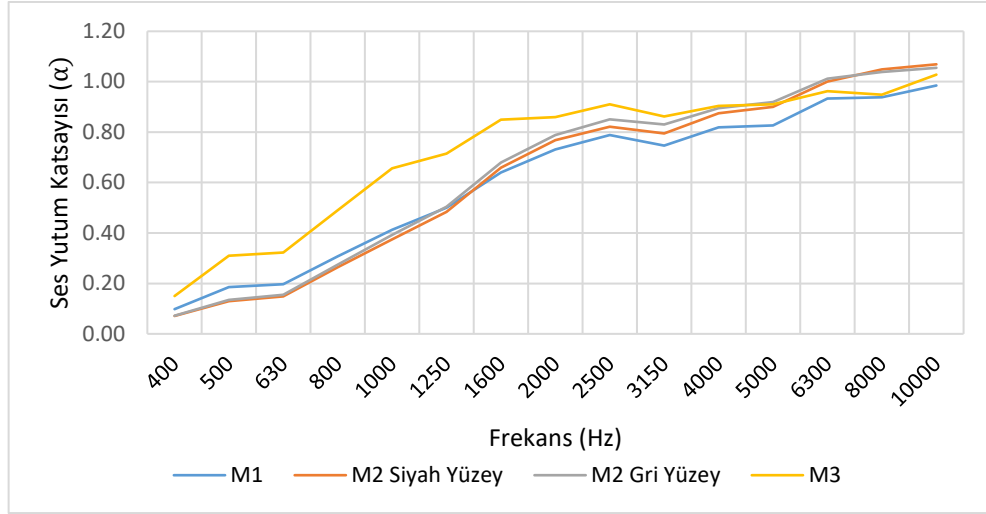


Şekil 4.4 Ses düşüm eğrisi

Toplanan veriler, Python programlama dili ile oluşturulan yazılım aracılığı ile işlenmektedir. 50.000 örnekleme hızı ile toplanan veri, hareketli ortalama yöntemi ile 1200'e indirilmektedir. Hareketli ortalama işlemi, belirlenen büyüklükteki örnekleme penceresi ile genel rms ses basınç seviyesi hesaplanarak yapılmaktadır. Burdaki amaç daha yumuşak basınç eğrilerinin elde edilmesidir. 8 mikrofon pozisyonundan toplanan verilerin ortalaması alınarak 1 eğri elde edilir.

Boş ve numuneli kabinde çınlama süresi, kararlı hal ses basınç seviyesinden 60 dB düşüm için geçen süreyi ifade etmektedir. Ancak ses üretici donanımdan kaynaklı olarak arka plan gürültüsü ile oda içerisindeki oluşturulan gürültü seviyesi arasında 60 dB'lik bir fark oluşmayabilir. Fark genellikle 40-45 dB seviyelerinde kalmaktadır. Bu durumda 20 dB veya 30 dB düşüm için geçen süre (T_{20} , T_{30}) ölçülür ve buradan T_{60} süresi bulunur. Bu durumda, ses düşümünün başladığı noktadan 30 dB'lik düşümün olduğu noktaya kadar eğrinin doğrusallaştırılması gerekmektedir. Şekil 4.3'de görüldüğü gibi ses kaynağının kapatılma anından sonra, kararlı hal gürültü seviyesi ile düşüm anı arasında bir boyun bölgesi oluşmaktadır. Doğrusallaştırma işlemi ses kaynağı kapatıldığı andan itibaren yapıldığında bu boyun bölgesinden dolayı doğrusallaştırma işlemi hatalı olmaktadır. Bu yüzden T_{30} düşümü, kararlı hal ses basınç seviyesinin 5 dB altından başlatılır. Bu işlem, yazılım tarafından gerçekleştirilmektedir.

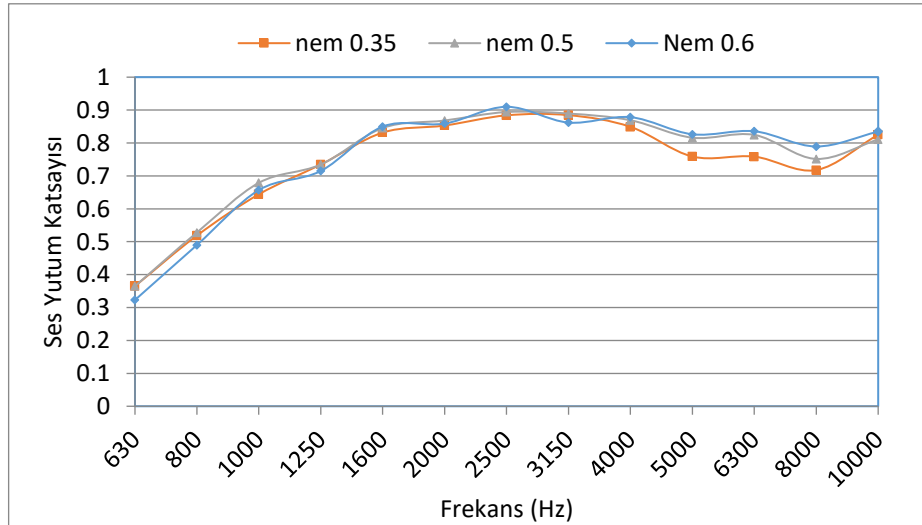
$$\alpha = 0,92 * 0,16 \frac{V}{S_n} \left(\frac{1}{T60_n} - \frac{1}{T60_b} \right) \quad (4.1)$$



Şekil 4.5 3 farklı yutucu malzemeler için ses yutum katsayısı eğrileri

Denklem (4.1) ses yutum katsayısının hesabı için kullanılmaktadır. Standart büyük çınlama odalarından farklı olarak formüle kenar etkisi için bir düzeltme faktörü eklenmiştir [52]. Alfa kabin yazılımı 1/3 oktav bandı merkez frekansları için ses yutum katsayısı değerlerini hesaplayarak grafiğini oluşturmaktadır (Şekil 4.5).

Boş kabin çınlama süresi ölçümünün çevresel şartlar değişmediği sürece bir kere yapılması yeterlidir. Büyük çınlama odalarında havanın bağıl nemi ve sıcaklık gibi etkenler ölçüm üzerinde etkili olmaktadır. Küçük hacimli odalarda ise bu etki daha küçüktür. Aynı numune ile yapılacak bir birini takip eden ölçümlerde nem ve sıcaklık değerlerinin aynı olması ölçümlerin tekrarlanabilirliği için gereklidir.



Şekil 4.6 Farklı kabin içi nem değerlerinde ses yutum katsayısı

Tasarım kabininde, kabin içi farklı nem değerlerine şartlandırılarak yapılan ses yutum katsayısı ölçümlerine göre, yalnızca nemin baskın bir etkisi olmadığı görülmüştür (Şekil 4.6).

ISO 354 standardında, seri ölçümlerde kabin için nem değerinin %40'ın üzerinde olması önerilmektedir. Seri olarak yapılan ölçümler boyunca ise %40-%60 arasındaki nem değerlerinde %3'lük, %60 üzerindeki nem değerlerinde ise %5'lik bir değişim kabul edilebilir görülmüştür.

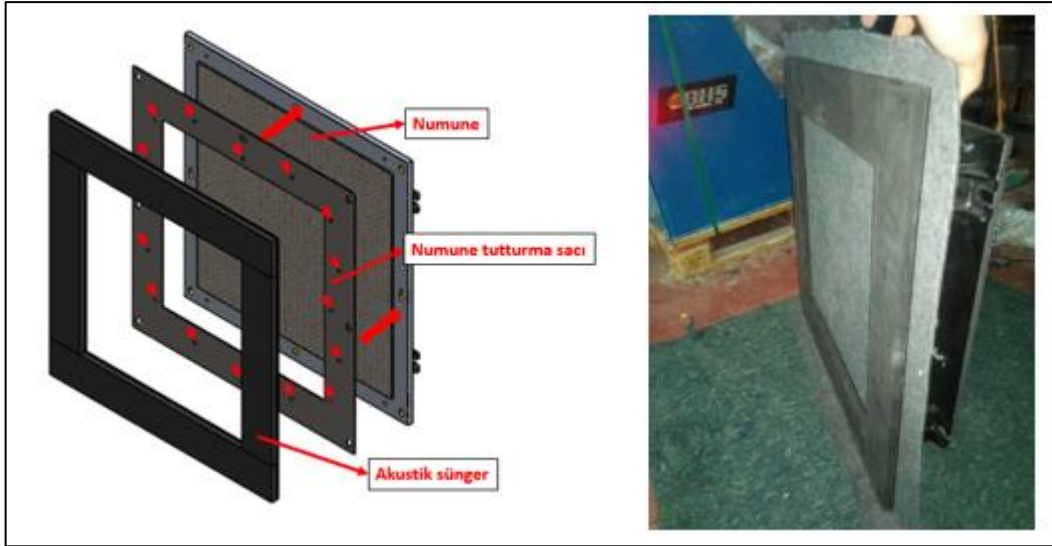
4.2 Ses İletim Kaybı Ölçümü

Bölüm 3'de tasarımı anlatılan ikiz çınlama odası ile ses iletim katsayısı ölçümleri yapılabilmektedir. İletim kaybı ölçümü yapılacağı durumda, her iki kabinde bulunan numune aralığı kapağı kaldırılarak kabinler numune tutucu aparat üzerinden birbirine birleştirilir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Ses iletim kaybı ölçümleri için birleştirilmiş kabinler

Ses iletim kaybı ölçümlerinde, numune tutucu aparat ve numune aralıkları sızdırmazlık açısından kabinin kritik bölgelerini oluşturmaktadır. Numune tutucu aparatın tasarımı ve çeşitli numune bağlantı şekilleri standartlarda verilmiştir [12], [50]. Sızdırmazlığın sağlanması amacı ile numune aparat üzerine tutucu bir sac ile 16 cıvata kullanılarak bağlanmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Numune tuturucu aparat

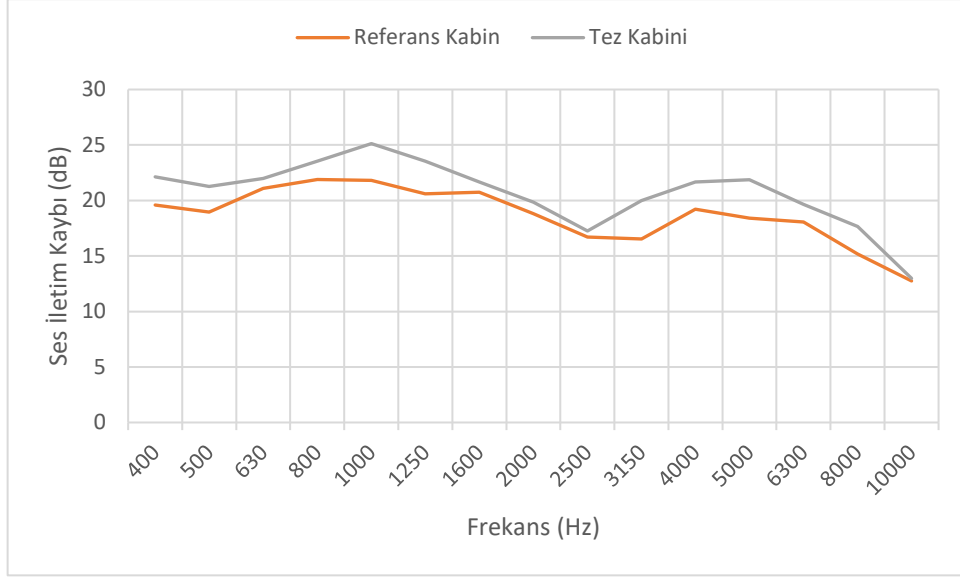
Tutturucu sacın (numune bağlama sacı) üzerine ise akustik sünger yapıştırılarak, kabin duvarına bu yüzey gelecek şekilde monte edilmektedir. Böylece, kabin ile aparat arasında sızdırmazlık sağlanır. İkinci kabin de aparat üzerindeki kulaklardan aparat aracılığı ile birinci kabine bağlanarak test düzeneği oluşturulmuş olur.

Düzenekteki her iki kabin de çınlama odasıdır. Bir oda ses kaynağı odası diğer oda da alıcı odadır. Her iki oda da aynı karakteristikte olduğundan kaynak ve alıcı oda yer değiştirebilir. Ölçüm başlatıldığında hem gürültünün verildiği ses kaynağı odasından hem de alıcı odadan, hareketli mikrofonlar ile zaman ve konuma bağlı ortalama ses basınç seviyesi verileri toplanır. Her iki odada 8 farklı mikrofon pizisyonundan 3'er veri toplanmaktadır.

$$TL = L_k - L_a + 10 \log \frac{S_n}{A_a} \quad (4.1)$$

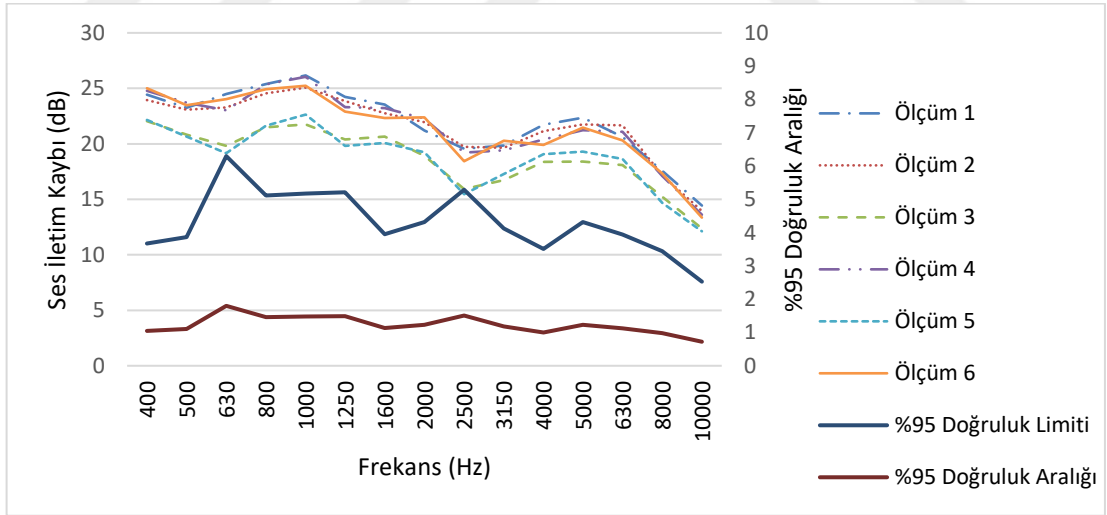
Denklem (4.1)'de L_k kaynak odasındaki konuma ve zamana bağlı ortalama ses basınç seviyesini, L_a alıcı odanın ses basınç seviyesini, A_a alıcı odanın ortalama ses yutumu yüzey alanını ifade etmektedir.

Alfa kabin test düzeneği yazılımı denklem (4.1) ile 400 Hz 10 kHz aralığında 1/3 oktav bandı merkez frekansları için ses iletim kaybı miktarlarını hesaplar. Şekil 4.8'de numune tutucu aparata bağlı olarak görülen 5 mm kalınlığındaki ağır bariyer malzemenin ses iletim kaybı test düzeneği ile ölçülerek Şekil 4.9'daki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.9 5 mm kalınlıktaki ağır bariyer malzemenin ses iletim kaybı ölçüm sonuçları

Aynı numunenin farklı bir laboratuvardaki referans kabin ile ölçümü de gerçekleştirilmiştir. Referans kabin ölçümleri ile -%10-15'lik bir fark elde edilmiştir. Kabinin laboratuvar içi tekrarlanabilirliğinin belirlenmesi için arda arda 6 ölçüm yapılarak %95 doğruluk aralığı değerleri hesaplanmıştır (Şekil 4.10). %95 doğruluk limiti eğrisi standart sapmanın 2.8 katı olarak alınmıştır [12].



Şekil 4.10 Ses iletim kaybı ölçümleri için %95 doğruluk aralığı

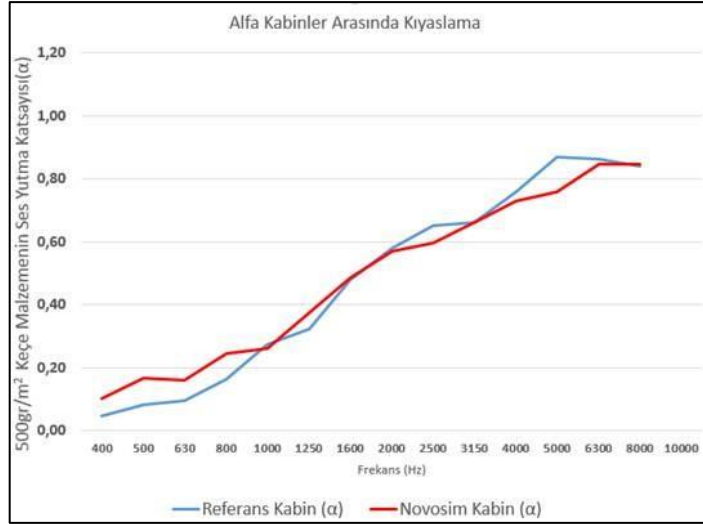
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, malzemelerin akustik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan alfa kabin tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Alfa kabinler otomotiv endüstrisinde, kullanım partikliği açısından standart çınlama odalarına tercih edilmektedir. Standartlaştırılmamış bir yöntem olduğundan yöntemin doğru sonuçlar verip vermediği araştırma konusudur. Daha çok geriye dönük kıyaslama çalışmalarında kullanımı uygundur.

Çalışma kapsamında, alfa kabin içerisindeki akustik alanı etkileyen faktörler incelenmiştir. Bu faktörlerden birincisi alfa kabin geometrisidir. Oda kenar ölçülerinin birbirine olan oranları ve düzensiz şeklin akustik alan üzerindeki etkisi numerik analizlerle görülmüştür. Laboratuvarlar arası ölçümlerde oluşan varyasyonun sebeplerinden biri de bu geometrik farklılıklardır. Tam dağınık alanın sağlanması için dağıtıcı kullanımının gerekliliği de çalışma sonucunda görülmüştür (Şekil 3.9). Dağıtıcılar özellikle düşük frekans performansını etkilemektedir.

Akustik alanı etkileyen geometrik faktörlerin yanında, yeterli sızdırmazlığın sağlanması da tekrar üretilebilir ses yutum değerlerinin elde edilmesinde oldukça önemlidir. Kabinin kapı ve ses iletim kaybı ölçüm penceresi bölgeleri sızdırmazlık için özellikle dikkat edilmesi gereken bölgeler olarak görülmektedir.

Alfa kabinlerde ve standart çınlama odalarına genellikle tekrarlanabilirlik ve tekrar üretilebilirlik sorun olmaktadır. Büyük çınlama odaları standartlaştırılmış olmasına rağmen laboratuvarlar arası ölçümlerde varyasyon görülmektedir.

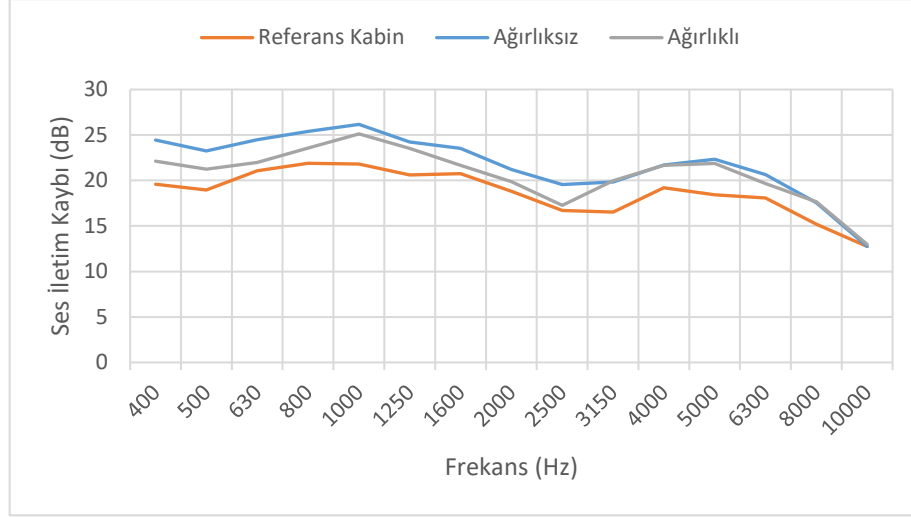


Şekil 5.1 Laboratuvarlar arası ses yutum katsayısı kıyaslaması

Tez çalışması ile üretilen alfa kabinde, standart çınlama odaları için belirtilen tekrarlanabilirlik değerlerine kıyasla oldukça iyi sonuçlar alınmıştır (Şekil 3.21). Laboratuvarlar arası ölçüm değerlendirmesi Rieter firmasının kabini referans alınarak yapılmıştır. Referans olarak tek bir kabin kullanıldığından laboratuvarlar arası tekrarlanabilirlik için sağlıklı bir istatistik verme imkânı bulunmamaktadır. Bu çalışma ayrıca yürütülecektir. Ancak, 500 gr/m² keçe malzemenin ses yutum ölçümü referans kabin ile karşılaştırıldığında tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 5.1).

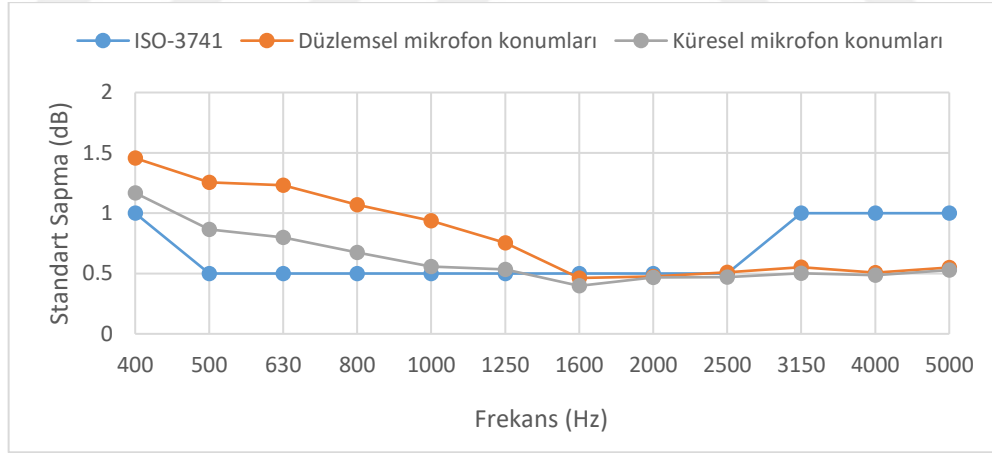
İkiz oda şeklinde tasarlanan alfa kabin çifti ile ses iletim kaybı ölçümleri de standartlarda istenen doğruluklarda gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarlar arası ölçümlerde ise %10-20 arası bir varyasyon görülmektedir (Şekil 4.9).

Kabin duvarlarının rijitliği oda içerisinde doğru ses alanının elde edilmesi için önemlidir. İlk ölçümlerin ardından referans kabin ile tez kabini arasındaki varyasyonun kaynağı taban saclarının titreşimi olarak görülmüştür. Taban panel sacları duvar saclarına kıyasla daha büyüktür ve kaynak edildikleri profil çerçevesi arasında destek profili bulunmamaktadır. Bu yüzden büyük sacların orta kısımları özellikle düşük frekanslarda rezonansa girerek oda akustik alanını etkilemektedir. Taban saclarının orta kısımlarına ağırlık yerleştirilip ölçümler tekrarlandığında özellikle düşük frekanslarda referans kabin değerlerine daha da yaklaşılmıştır (Şekil 5.2). Bu problemi çözümü için büyük sac paneller arka kısımlarından desteklenerek rijitleştirilmelidir.



Şekil 5.2 Rijitleştirilmiş kabin duvarlarının STL'e etkisi

Yapılan çalışmalar sonucunda, ses yutum ve iletim ölçümlerinde alfa kabinlerin tatmin edici sonuçlar verdiği görülmüştür. Bununla birlikte, alfa kabin ölçümleri malzemelerin akustik özellikleri ile ilgili kesin bilgi vermemektedir. Tasarlanan kabinin laboratuvar içi tekrarlanabilirlik değeri, standart çınlama odaları için belirlenen değer aralığında olması akustik malzeme geliştirme çalışmalarında ve otomotiv endüstrisinde geriye dönük kıyaslamalı akustik çalışmalarında kullanımı için yeterli görülmektedir.



Şekil 5.3 Küresel mikrofon pozisyonunda ses basınç alanı standart sapması

Düşük frekans bölgesinde ses alanından homojen veri toplayabilmek için hareketli mikrofon tek düzlemde değil küresel bir alanı tarayacak şekilde farklı düzlemlerde konumlandırılarak ölçüm yapılmıştır. Bu durumda ses basınç alanındaki konumsal varyasyon Şekil 5.3'de görüldüğü gibi düşüş göstermektedir. Bu sonuç üzerine, mikrofon kolunun hareketi küresel bir alanı tarayacak şekilde tasarlanması önerilmektedir.