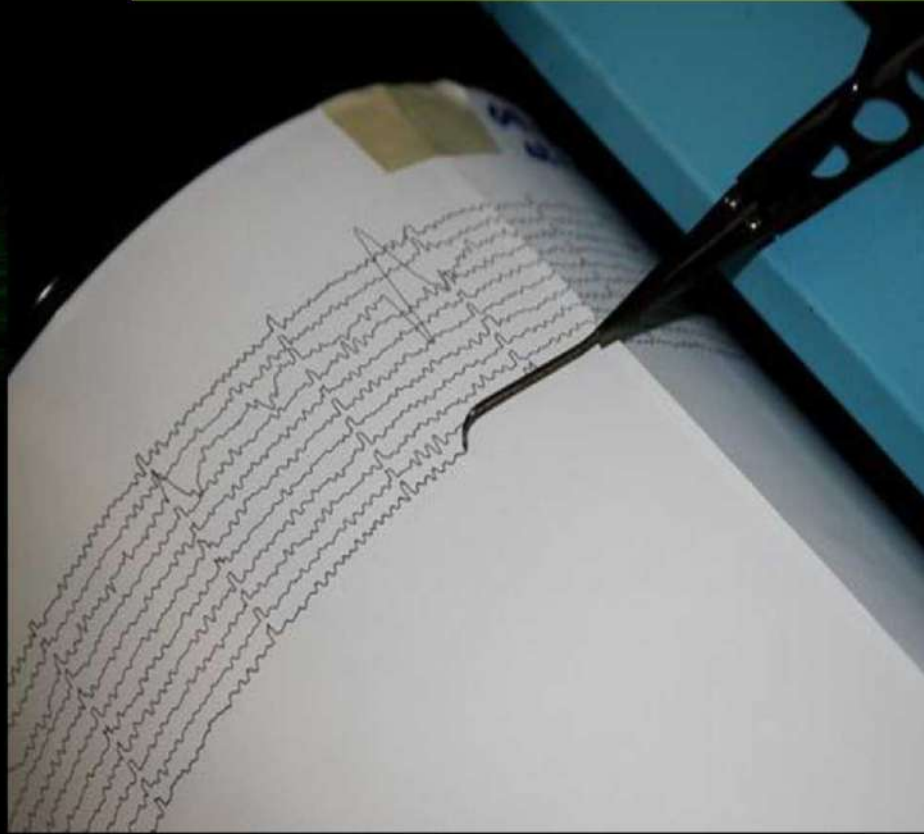


AKUSTİK VE DALGA MEKANİĞİ



Prof. Dr. Nizami AKTÜRK

ÖNSÖZ

Bu ders notlarının ilk versiyonu 2011 yılında ben ders verirken bu notları düzenleyen yüksek lisans öğrencisi Sn Taylan Mete Aksoy tarafından oluşturulmuştu. Notlar ortaya çıkmaya başlayınca ben de el yazımla yazmış olduğum notları Sn Aksoy'a vererek onları da düzenlenen notların içerisine katarak taslak bir ders notu oluşturmaya başlamıştık. Tamamlayamamış olsak bile yine de öğrencilerimizin yararlanması için bir yardımcı materyal oluşturmuştuk.

Ne yazık ki Sn Aksoy'un bilgisayarı formatlandığından notların elektronik versiyonu kayboldu. Üstelik internette notlarımızın belirsiz bir şekilde dolaştığını gören diğer bir yüksek lisans öğrencisi Sn Ahmet Yurttadur .pdf versiyonundan yararlanarak, bazı bölümleri de elinde yazarak notları tekrar oluşturdu. Son kısa bir düzeltmelerden sonra notları tekrar internet ortamına sunduk. 2012-2013 Güz Döneminde dersi alan öğrencilerim (Murat Köksal, Fettah Kodalak, Hakan Bal, Sefa Koca, Çiğdem Çay, elde mevcut olan kopyayı paylaşarak elektronik hale getirmeleri gerçekten takdiri şayan bir hareketti. Şu anda sunduğum bu ders notu baskısı onların büyük gayretleri ile gerçekleşti. Kendilerine ayrı ayrı teşekkür etmekten gurur duyuyorum. Henüz çok ham halde olmasına karşın öğrencilerimize faydalı olması açısından bu haliyle de onların kullanımına sunulmuştur. Umarım faydalı olur.

Hazırlamakta olduğumuz ders notları serisinin bir cildini teşkil edecek notları kaynak göstermek suretiyle kullanabilirsiniz. Hatalarımızı ve eksiklikleri bildirirseniz memnun olurum. Umarım notlar işinize yarar. Saygılarımla.

Prof. Dr. Nizami AKTÜRK
Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü
nakturk@gazi.edu.tr

TİTREŞİM VE DALGA MEKANİĞİ DERS NOTLARI

İçindekiler

Bölüm I: Tarihçe.....	2
Bölüm II: Dalga Nedir?.....	9
Dalga Tanımı	9
Sinüoidal Bir Dalga'nın Vektörel Gösterilişi.....	10
Harmonik Titreşimlerin Birleştirilmesi.....	13
Fourier Serisi Analizi.....	14
Harmonik Titreşim; Genlikleri Farklı Frekansları Çok Yakın İki Harmoniğin Toplamı,.....	17
Bölüm III: Dalga Denkleminin Elde Edilmesi.....	18
Halat Titreşimi	18
Çubukların Uzunlamasına Titreşimleri.....	20
Akış Sistemlerinde Dalga Denklemi.....	22
3 Boyutlu Dalga Denklemi	29
Silindirik Koordinatlarda Dalga Denkleminin Bulunması	39
Bölüm IV: Dalga Denkleminin Çözülmesi.....	44
Dalga Denkleminin Ayrıştırma Metodu İle Çözülmesi.....	44
Dalga Denkleminin d'Alambert Metodu İle Çözülmesi	49
Bölüm V: Harmonik Küresel Dalgalar.....	53
Bölüm VI: Akustik Yüzey Dalgaları	66
Bölüm VII: Sizin Sıvılar İçindeki Hızı.....	68
Bölüm VIII: Basit Bir Kaynaktan Küresel Yayılma	81
Bölüm IX: Akustik İletim Ve Akis	88
Örnek Problemler.....	120

1. AKUSTİĞİN TARİHÇESİ

1.1. İlk Bulgular ve Tahminler

Müzik aletlerinin neden olduğu titreşimlere ve bu titreşimlerin neden olduğu havadaki basınç değişimlerinin insan kulağı tarafından algılanılarak beğenilmesine iyi titreşimler (good vibration) veya iyi sesler (good sound) adı verilmektedir. İnsanların ne kadar süredir yeryüzünde tam olarak bilinemezken, insanların müzik aletlerini M.Ö. 4000'den beri kullanmakta olduğu bile iddia edilmektedir. 2012 yılında yapılan kazılarda şimdiye kadar bulunmuş en eski müzik aleti ele geçmiştir. Bu çalışmalar sonucunda Tuna nehrinin 4000-4500 seneleri arasında insanların ve teknolojik icatların Avrupa'nın merkezine doğru hareketliliğinde kilit bir rolü olduğunu iddia edilmiştir. Fakat bu iddiaların diğer çalışmalarla desteklenip desteklenmeyeceğini zaman gösterecektir. Yapılan son kazılarda ortaya çıkan insanlık tarihinin şu ana kadar bulunabilmiş en eski müzik aleti olduğu düşünülen flüt Şekil 1.4'de görülmektedir.



Şekil 1.6. Hayvan kemiğinden yapılmış flüt (MÖ 4500)

Eski Çin'de, Hindistan'da ve Mısır'da (Şekil 1.5) müzik aletlerinin kullanıldığı ve insanların müziğe meraklı olduğu bilinmektedir. M.Ö. 2600 yılında yapıldığı tahmin edilen mağara resimlerinde bugün Irak sınırları içinde olan Mezopotamya'nın parçası olan Ur şehrinde kullanılan müzik aleti Şekil 1.6'de görülmektedir.

Diğer yandan M.Ö. 1500 yıllarında kullanıldığı tahmin edilen *nanga* olarak adlandırılan müzik aleti günümüzde

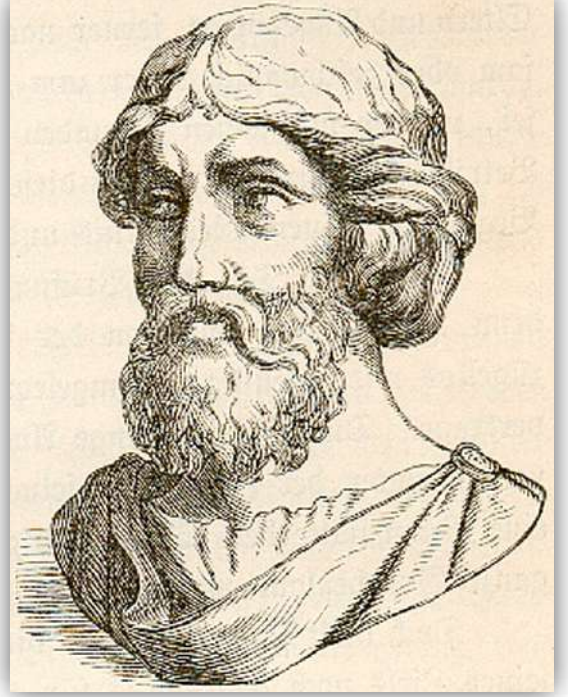
Britanya Müzesi'nde (British Museum) görülebilir. Bu müzik aletlerinin imalatında ortak bir teknoloji kullanmadığını iddia etmek çok yanlış olacaktır. Bu müzik aletlerinin şekilleri ve onlara gösterilen özen dikkate alındığında (hem Mısır piramitlerindeki hem de Ur'dan kalan kral mezarı resimlerinden müzik aletlerinin güzelliği görülmektedir.) bu müzik aletlerini imal eden ustaların tellerin boyları ile onların ürettiği seslerin arasındaki bağıntıyı elde ettikleri ortadadır.

Şekil 1.7 Mısır Harbî (M.Ö. 3000)



Sesin perdeleri (pitch) arasındaki fark; müzik hakkındaki temel bilgilerden olup, akustik biliminin ilk başından beri bilinmektedir. Musiki aletlerinin M.Ö. 1500'den beri kullanıldığı bilinmekle beraber, müzik ve sesin anlaşılması M.Ö. 3000 yıllarına gider. Bu yıllarda Çin'de felsefeci Fohi iki tane risale yazarak müziğin ve sesin teorisini açıklamıştır. Pitogoras ise müziğin bilinen teorisini kendi sayılar teorisi ile birleştirmeye çalışmıştır. Boethius, Pitagoras'ı da içine alan bir hikaye anlatmaktadır:

“Pisagor bir gün demirciler çarşısından geçiyordu. Çekiçlerin sallandıkça o gürültülü hengâme içinde bir nebze de olsa düzenli sesler çıkardıklarının farkına vardı. Uzun zamandır aradığı şeyi bulmuştu. İçeri girerek çalışanları izlediğinde bu seslerdeki iraksamayı çekiç vuran ustaların vuruş şiddetlerinin farklı olmasının oluşturduğunu gördü. Bunu teyit etmek için ustalara çekiçleri değiştirtirdi. Fakat bu değişiklikten sonra da ses aynı kaldı. Böylece sesin ustaların gücü ile ilgili olmadığını farkına vardı. Daha sonra da çekiçlerin tartılmasının istedi. Beş tane çekiç vardı. İki farklı oktavı üreten çekiçlerin ağırlıkları biri diğerinin iki katı kadardı. Büyük olan çekici aldığında, bunun ağırlığının $\frac{1}{4}$ vuruş veren çekicinin ağırlığının $\frac{4}{3}$ 'ü olduğunu gördü. Aynı çekicinin $\frac{1}{5}$ vuruş veren çekicinin ağırlığının $\frac{3}{2}$ 'si olduğunu tespit etti. 5. Çekiç ise diğerleri ile bağlantısı kurulamadığından kullanılmadı. Bu iki çekicinin kendileri ile $\frac{4}{3}$ ve $\frac{3}{2}$ oranları bulunan iki çekicinin ise $\frac{9}{8}$ ağırlık oranları olduğu tespit edildi. Evine dönen Pisagor bütün vuruşların bu oranlardan elde edilip edilemeyeceğini araştırmaya başladı. İplerin ucuna çeşitli ağırlıklar asarak onların seslerinin kulağıyla ayırmaya çalıştı. İplerin uzunluklarını değiştirerek araştırmalarına devam etti. Sonuçta tatmin edici doğrulukta sonuçlara ulaştı.”



Şekil 1.10 Pisagor'un temsili resmi



Şekil 1.11 [Raffael](#)'in Pisagor resmi

Böylece Pisagor mantıklı bir metotla müzik aletlerinde kullanılan seslerin frekanslarını (en azından basit seslerin bölünleri veya çarpanları olarak) elde etmeyi başardı. Akort için standart sesler ise tecrübeli müzisyenlerin algılamasına kalmıştı ve bu da o zamanlar için yeterliydi. Bunun sonucunda Pitagoras yalnızca akustiğin teorisini değil, titreşimlerin temelini de atmış oldu. Çünkü onun okulunda ses ile titreşim arasındaki ilişki gayet iyi biliniyordu.

Çekiç seslerinde ritmi yakalamasında hareketle Pisagor notaların matematiksel formüllere dönüştürülebileceğini keşfetmiştir. Böylece matematik ve müzik arasında bağlantı kurmuştur. Ayrıca ses perdesi ile tel uzunluğu arasında bir ilişki olduğunu bulmuştur. *Ondan sonrakiler sayı oranlarında seslerin gizli bağlantılarını aramaya girişip bir sesin niteliği ile ses dizisindeki yerini bu sese karşılık olan sayının niteliği ve sayılar dizisindeki yeri ile bir tutmuşlardı.* Matematik ile böylesine yakından uğraşan Pisagorcular, ifratta bulunarak sayılardan edindikleri bilgileri genelleştirerek sayıları bütün varlığın ilkeleri (*arkhe*) yapmışlardır. Adeta sayılara tapmışlardır. Hatta karşı bilim adamları numerolojiyi Aristo'ya kadar geri getirmektedir.



Şekil 1.12 Pisagor laboratuvarında çekiçlerle çanlara vurarak deney yapıyor (Boethius'un kaleminden)



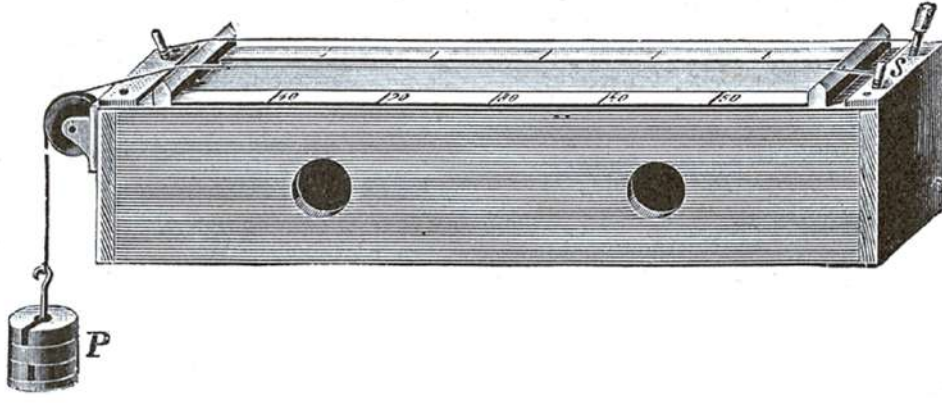
Şekil 1.13 Temsili bir resimde Pisagor

Pisagor Yunanistan'da, Ege Denizi'nde, [Dilek Yarımadası](#)'nın karşısında bir ada olan [Sisam](#) adasında doğmuştur. Yüzük taşı yapımcısı Mnesarkhos'un oğludur. İlk eğitimini doğduğu adada aldı. Ticaret için babasıyla farklı şehirlere gitti. [Tales](#)'in öğrencisi oldu. Tales, Pisagor'un daha iyi gelişmesi için [Mısır](#)'a gitmesini istiyordu çünkü Mısır, dönemin matematikte öncü ülkesiydi. Yurdundan ayrılarak Mısır'a gitti. [Antiphon](#)'un "*Erdemde Sivrilenenler Üzerine*" adlı eserinde söylendiğine göre, Mısırlıların kullandıkları dili öğrendi. Daha sonra Sisam adasına geri döndüğünde yurdunun tiran [Polykrates](#)'in baskısı altında olduğunu görünce İtalya'nın güneyindeki bir Yunan kenti olan Kroton'a gitti. Burada efsanevi şarkıcı Orpheus'un kurduğu [Orfeuşçuluğun](#) etkisinde gizli dinsel bir topluluk kurdu. Kroton'da kurduğu bu topluluk siyasi bir rol de üstlenmişti. Topluluktakiler kendilerini matematikçiler (*mathematikhoi*) olarak adlandırıyorlardı.

Pisagor çekiçlerle, tellerle, borularla ve levhalarla çeşitli deneyler gerçekleştirdi. İlk titreşim laboratuvarını kurdu. Bunu Boethius Şekil 1.11'deki gibi çizmiştir.

Şekil 1.14 Pisagor titreşimlerle ilgili çeşitli deneyler yaparken





Şekil 1.15 Monokord

Pisagor'un monokord kullanarak çok sayıda deney yaptığı bilinmektedir. Monokord üzerinde bir kiriş olan ve hareketli bir köprüden oluşan müzik ve deney aletidir. Kirişin bir ucu bir noktaya bağlanıp diğer ucuna değişik ağırlıklar asılarak kirişin gerginliği ayarlanmaktadır. Pisagor monokordun serbest ucunda kirişin ucuna ağırlıklar asarak onları aynı gerilmeye getiriyor, köprülerin yerlerini ayarladıktan sonra onların titreşimlerini inceliyordu. Değişik belirli sesler için köprünün yerini işaretleyen ve bunların arasındaki ilintiyi araştıran Pisagor sesler ve sayılar arasındaki ilişkiyi keşfetmiştir.

Pisagor köprünün bir tarafındaki kiriş uzunluğu öbür tarafın iki katı veya yarısı olduğunda müzik oktavlarının gerçekleştiğinin farkına vardı. Müzik oktavları belirli bir sesin (veya başka bir ifadeyle

notanın en yüksek ve en düşük perdesinin (pitch) arasında kalan bölgedir. Böylece Pisagor 2:1 veya 1:2 oranını elde etmiş oldu. Pisagor insanların en hoşuna giden harmoninin ikinci tarafta kalan kirişin uzunluğunun birinci taraftakinin $3/2$ si veya $3/4$ 'ü olduğunda oluştuğunun da farkına vardı. İkinci hoş giden harmoninin ise ikinci taraftaki kiriş uzunluğunun birinci taraftakinin uzunluğuna oranının $4/3$ veya $2/3$ olduğunda oluştuğunun farkına vardı. Pisagor ayrıca aynı gerilime sahip kirişin titreşimlerinin kirişin titreşen kısmının boyuna bağlı olduğunu bulmuştur. Buna Pisagor Kuralı denir. Pisagor bu çalışmalarlarıyla akustiğin temellerini atmıştır.

Her ne kadar Batı'da Pisagor'un bütün oktav bantları incelediği ve notaları oluşturduğu gibi bilgiler ortaya sürülse de bunu destekleyen bir bulgu yoktur. Tarihi gelişimi ve kronolojiyi tarafsız gözle takip ettiğimizde bu konudaki çalışmaların yıllar sonra Kindi tarafından yapıldığı görülebilir.



Şekil 1.16 Aristo (M.Ö. 384- 322)

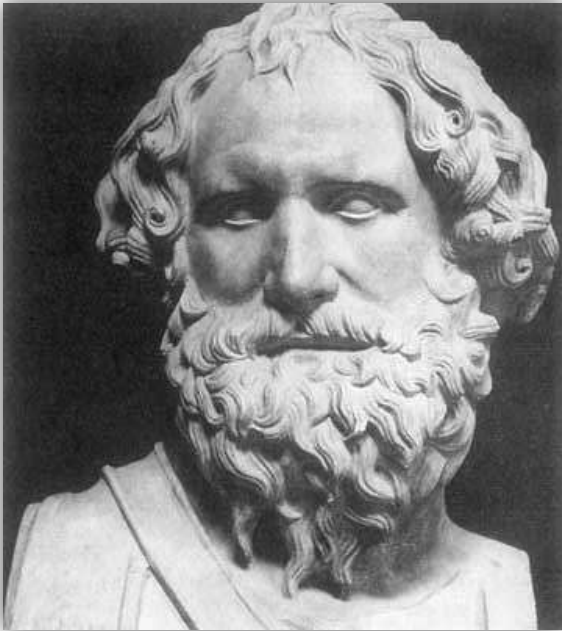


Şekil 1.17 Aristo (M.Ö. 384- 322)

Genel olarak sarkacın salınımını ve periyodunu ilk olarak Galileo Galilei'nin incelediği varsayılır. Fakat ondan çok daha önce Çinlilerin, Yunanların ve Müslümanların sarkaç üzerinde çalıştıkları bilinmektedir.

Söylentiye göre sarkacı ilk keşfedenin M.Ö. 2000. yılların ortalarında Daedalus olduğu savunulabilir. M.Ö. 6. yüzyılda sarkacın vazoların şekillenmesinde (çekillenmesinde) kullanıldığı bilinmektedir. Sarkacın bir zaman ölçüm aracı olarak kullanılmasına ise Aristophanes'in (M.Ö. 450-388) eserlerinde rastlanır. Aristophanes Rane (Frogs)'unda; *müzik bir sarkaçla balanslanmaktadır* diyerek buna doğrudan referansta bulunur. Bütün bunlardan sarkacın antik insanlar tarafından bilindiğine ve kullanıldığına karar verilebilir. Balansın M.Ö. 4500 yılında bilindiği ve elde edilen resimlerdeki

orantılardan bunun frekansının da balans için gerekli olan 1 Hz olduğu ispatlanmıştır. Izokronizmin de bilindiği de elde edilen resimlerden anlaşılmaktadır. Bu zamanlarda mekanik saat de bilinmektedir. Bununla beraber Müslümanların ve Çinlilerin "escapement" mekanizmasını bilmelerine rağmen pratik olarak kullanımının yeterli olmamasından dolayı sarkacı zaman ölçümünde kullanmamışlardır. Fakat ileride görüleceği gibi aynı zamanda bir saat ustası olan İbn-i Yunus sarkacı ve sarkacın periyodunu çok iyi biliyordu.



Şekil 1.18 Arşimed (M.Ö. 287-212)

Akustik üzerine ilk kitapçık Aristo tarafından *Akustik Üzerine* başlığı ile yayımlanmıştır. Akustik kelimesini de ilk olarak Aristo (M.Ö. 384-322) kullanmıştır (Sauver'in (1653-1716) bu kelimeyi ilk olarak kullandığının bilgisi tam olarak doğru değildir).

Statik denge çok uzun zamandır bilinmesine rağmen, onu 7 tane ön teori ve teklif şeklinde ilk olarak Archimedes (M.Ö. 287-212), *Düzlemlerin Denge Konumu Üzerine* isimli çalışmasıyla ortaya koymuştur.

Daha önceleri *Mekanik* isimli kitabıyla Aristo statığın formüle edilmesine genel hareket denklemlerinden yola çıkarak çalışmıştır. Aristo

kuvvetlerin vektör olmaları özelliğini anlamış ve kuvvet toplamada paralelkenar teoremini geliştirmiştir. Statik denge formülü olan $\sum F_i x_i = 0$ formülünü ispatlamak için yapılan toplam işi $\sum F_i \delta_i = 0$ prensibini kullanmıştır. *Fizik* isimli kitabında Aristo: *Hiç kimse hareket halindeki bir cismin niçin duracağını veya neden burada veya şurada duracağını söyleyemez. Dolayısıyla bir cisim ya durağan halde veya sonsuz hareket halinde olacaktır illa üzerine kendinden daha büyük bir şey etkilemezse.* Bu Newton'un birinci teorisine veya başka bir ifadeyle D'Alembert'in dinamik denge kanununa benzeşim sağlamaktadır. Fakat Aristo bunu bir kabul olarak ileri sürmemektedir. Belki bunu çok iyi bilen Newton'un bahsettiği omuzlarda dikildiği devlerden en önemlisi Aristo'dur.

İvme de bilinmekte ve kuvvete bağıntılandırılmaktaydı. Simplicius, Aristo'nun *Gökyüzü Hakkında* (De Caelo) isimli çalışmasına yazdığı yorumda gökyüzündeki cisimler arasındaki kuvvetin onların büyüklüğüne (kütlesine) ve aralarındaki mesafeye bağlı olduğunu tartışmadan bir not olarak bildirir. Simplicius ivmenin kuvvete ve de kütleyle orantılı olduğunu da belirtir ki, bu Newton'un ikinci tezine büyük benzerlik arzeder. Aristo'nun kendisi de *kuvvetin aynı mesafeyi aynı zamanda alan ağırlıklara orantılı olduğunu (Fizik); iki cismin ızafî hızlarının onların büyüklükleri ile ters orantılı olduğunu (De Caelo)* belirtir.

Simplicius'un *Fizik* üzerine yorumunda *böyle bir ivmenin sebebi cisimler daha büyük kuvvetle çekerler* şeklinde belirtilmektedir. Newton'un ikinci kabulüne göre ise *Hareketteki değişim cismin üzerine etki eden kuvvetle orantılıdır ve değişim kuvvetin uygulandığı doğrultudadır* şeklindedir. Esasında Newton hızdaki değişim ile momentumdaki değişimi orantılı bulmuş, bu orantının da kütle olduğunu göstermiştir.

Aristo etki-tepki hakkında *etki eden cisim üzerine aynı şekilde bir tepki gelir* şeklinde açıklama getirmektedir. Bu kabulünü ısıyı ve akışkan akışını kapsayacak şekilde genişletir (De Caelo). Newton'un üçüncü kanunu ise *her etkiye aksi yönde bir tepki vardır* şeklindedir.

Hareketin potansiyel ve kinetik enerjiye olan bağlantısını incelerken Afrodisiaslı Alexander, Aristo'nun yorumcusu, enerjinin sakınımindan sözeder; *Potansiyel enerji ile kinetik enerji arasındaki yerdeştirmeler hareketin sebebidir.*

Aristo'nun görüşleri ile Newton dinamiği arasındaki fark çeşitli kavramları denkleme dökmedeki bir farklılıktan ziyade felsefi farklılıktan kaynaklanmaktaydı. Her ikisi de Allah'a Kuvvetle inanmakla birlikte Aristo dini bir dünya görüşünden kaynaklanan kâinattaki her şeyin harmonisine inanan bir felsefe yaparken, Newton için zaman ve uzay ön plana çıkmaktaydı. Fakat her ikisinin Allah'a inancında da Tanrı ilk düzen koyan formundaydı.

Bir doğrusal sistem için harmonik hareket oluşturacak bazı frekansların olduğu müzisyenler tarafından uzun zamandır bilinmesine rağmen, bunun değişmez kuralları olduğu ilk olarak Pisagor (M.Ö. 560-407) tarafından ortaya kondu. Buna ilaveten Pisagor çekiçlerle yaptığı deneyler sonunda tabii frekansın sistemin bir özelliği olduğunu ve zorlama genliğinden bağımsız olduğunu ortaya koydu. İzmirli (Smyrnalı) Theon'un M.S. ikinci yüzyılda bildirdiğine göre Pisagor deneysel olarak aşağıdakileri ispatlamıştır:

1. Bir telin tabii frekansı telin uzunluğu ve çapı ile ters orantılıdır. Telin gerilmesi tabii frekansı artırır. Büyük ihtimalle Pisagor tabii frekansın gerilme ile değişiminin doğru kurallarını da biliyordu.
2. Bir çubuğun boyuna titreşimlerinin tabii frekansı çubuğun uzunluğu ile ters orantılıdır.
3. Yukarıda çubuk için verilen kural kanallar için de geçerlidir. (Pisagor kanalların içine su doldurarak onların tabii frekanslarını değiştirdi.)
4. Pisagor'un disklerle de deney yaptığı fakat bunların sonuçlarını bilmediği biliniyor. Fakat Plato'nun Phadeon (M.S. 108) 'unda Pisagor'un bir öğrencisi olan Hippasos'un (Patagoranya'nın

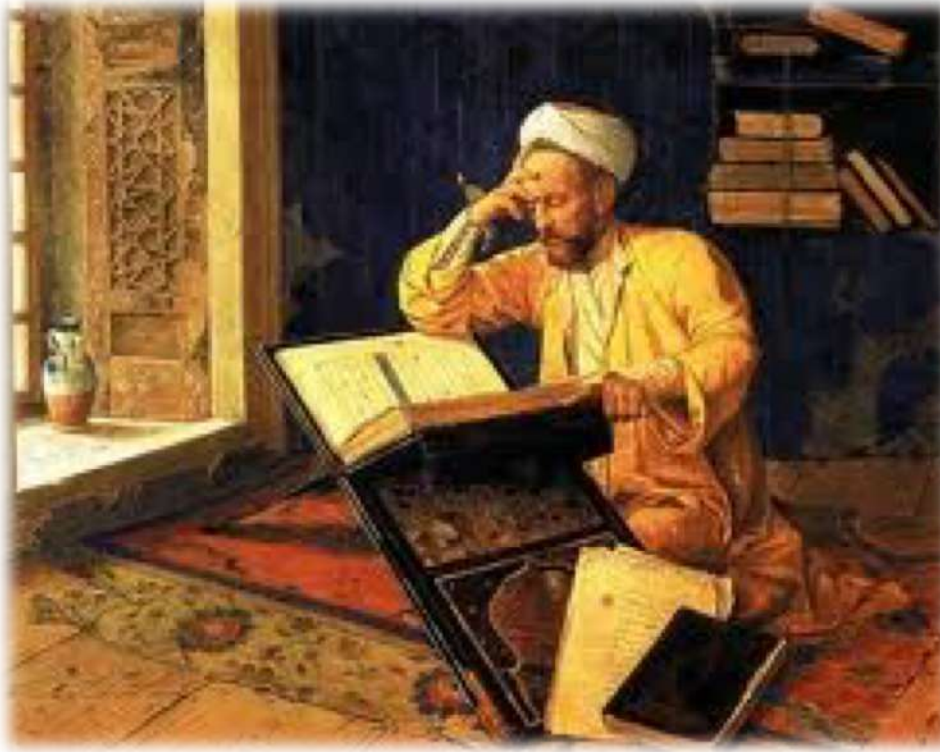
sırlarını ifşa ettiği için öldürülmüştür) disklerle deneyler yaptığı ve disklerin tabii frekanslarının disklerin kalınlıkları ile ters orantılı olduğunu ortaya koyduğu bilinmektedir.

İncil’de bahsedilen bir hikâye olan Jericho ‘nun hikâyesinde şöyle bir olay geçer; Jericho ‘nun duvarları bazı müzik aletlerinin oluşturduğu rezonansla yıkılır. Belki de bu sembolik bir olaydır. Fakat bu hikâye Joshua’nın zamanında mühendislerin rezonansla ilgili olayların farkında olduklarını göstermektedir.

Kur’an-ı Kerim’de de sesin yıkıcı ve öldürücü etkisinden bahsederek bazı kavimlerin ses ile helak edildiği anlatılır.

Eski tarihlerde, titreşim teorisinide önemli ölçüde gelişmeler olmuş, tabii frekans, titreşim yalıtımı, titreşim ölçümü ve rezonans gibi konular detaylı şekilde anlatılmıştı. Fakat üretim teknikleri yeterince gelişmemiş olduğundan bu bilgiler fazlaca tatbik sahası bulamamıştı.

Antik çağın Atina’daki büyük öğrenim merkezleri Academy ve Lyceum MS 529.da Bizans İmparatoru Justinian tarafından kapatıldı. İskenderiye Müzesi yıkıldı. Bunların etkisiyle Avrupa’daki bilimsel etkinlikler hemen hemen tümüyle durdu. Hellenistik dönem ile Rönesans arasında kalan boşluğun, MS 700 ile MS 1500 arasında gelişen İslam kültürü tarafından doldurulduğu görülmektedir. Sözü edilen bu dönemde İslam uygarlığı, metamatikten astronomiye kadar bilime ve mühendisliğe katkılarda bulunmuştur. Müslümanlar sadece yeryüzündeki mevcut bilgiyi koruma altına almamış onu geliştirmiştir.



Dünyada yazılmış olan titreşim veya bilim tarihi kitaplarında genelde eski çağ anlatılıp, özellikle de antik Yunan uygarlığını katkıları verildikten sonra büyük bir boşluk bırakılıp 16. yy.’a geçilmektedir. Bunun sebebi bu aradaki zaman dilimi için yeterli araştırma yapılmamış olmasıdır. Buna batılıların bağnazlığını da eklemek gerekir. Batı biliminde Müslümanlar ve Türkler barbar olarak

algılandığından aradaki dönem dikkate alınmamış veya fazlaca bir araştırmaya gerek duyulmamıştır. Ne yazık ki bu boşluğu doldurmak için son zamanlarda başlanmış olan çalışmalar yeterli seviyeye ulaşmamıştır. Hamed A. Ead’ın George Sarton’un yazdığı Bilim Tarihi kitabının Müslümanların Bilime Katkıları bölümünde ortaya koydukları, Avrupa’da Edward Said Kennedy ve İran’da [Seyyed Hossein Nasr](#), Türkiye’de Ekmeleddin İhsanoğlu ve Almanya’da Fuat Sezgin’in yaptığı çalışmalar bu konunun sadece başlangıcı ve tanıtılmasıdır. Bunun en büyük sebebi çalışacak konunun çok kapsamlı olması ve

eldeki belgelerin ve gereçlerin fazlalığı yanında araştırmacı sayısının çok az olmasıdır. Imperial College'de doktoramı yaparken hemen yanımda olan şu anda da Imperial Merkez Kütüphanesi'nin parçası durumuna gelmiş olan Bilim Müzesi Kütüphanesi'ndeki İslami bilim eserlerinin çokluğu karşısında şaşkına uğramıştım. Daha sonra Cambridge ve Oxford üniversitelerinin merkez kütüphanelerinin konuyla ilgili bölümlerinin de bir kütüphane büyüklüğünde olduğunu gördüğümde iyice şaşırmıştım. Bugün Türkiye'deki, İran'daki, Mısır'daki vs kitablara da işin içine katınca bu işin ne kadar uzun bir çalışma istediğini kolayca söyleyebiliriz.

Özellikle son zamanlarda eski yazıyı okuyabilen bilim adamı (Fizikçi, matematikçi, mühendis vb.) çok nadir yetiştiğinden, tarihçiler de kendi çalışma alanlarındaki yoğunluklarından bu konulara zaman ayıramamaktadırlar. Ne gariptir ki El-Cizeri Anadolu'nun değeri olmasına ve yazdığı eserlerin asılları İstanbul Kütüphanesi'nde bulunmasına rağmen, İngilizceye bile tercüme edilmiş kitabı Türkiye'de Türkçe olarak mevcut değildir. İçerik hakkında bazı bilgiler Türkçeye tercüme edilmiştir. Bugün Leonardo Da Vinci'nin hemen hemen bütün tasarımları tekrar inşaa edilmiş olmasına rağmen, El-Cezeri'nin birkaç makinası dışında yeniden üretilmiş çalışan makinası mevcut değildir. Bilim tarihi incelendiğinde M.S. 200'den sonra batı dünyası büyük bir kargaşaya maruz kalmış ve bilimsel faaliyetler durmuştur. Buna Hristiyanlığın sebep olduğunu iddia edenler bulunsa bile bu tam olarak doğru bir teşhis değildir. Roma İmparatorluğunun yükselişi ve Romalıların savaşa, eğlenceye ve lükse düşkünlüğü ve kurdukları askeri imparatorluğun bilimsel gelişmeyi engellediği kabul edilmektedir.

Abbasilerin yedinci halifesi Halife Me'mun 813 ile 833 yılları arasında halifelik yapmıştır. Annesi ve hanımı İranlı olan Me'mun tam bir Mutelize taraftarıydı. Çok sayıda insanı katletmiştir. Bu kadar bağnaz olmasına karşın Mutezile fikrine karşı çıkmayanlara çok müsamahalı idi. Bağdat'ta Hikmet Evi olarak bilinen bilimsel bir akademi kurmuştur. Bu akademinin bir de rasathanesi vardı. Harun Reşit'ten bile fazla bilime ve sanata önem verdiği bilinmektedir. Toplanabilecek bütün Yunan eserlerinin toplanmasını emretmiş, onlar gelir gelmez akademide tercümeleri yapılmıştır. Hatta Bizans İmparatoruna elçiler göndererek ülkesindeki bilimsel kitapların bir kopyasını resmi olarak istemiştir. Onun zamanında yapılan bilimsel faaliyetler çok fazladır. Onun zamanının önemli âlimlerinden biri Ebu Yusuf Ya'kub ibni İshak el-Kindî idi.



Şekil 1.23 Kindî (801-866)

Kindî'nin yaklaşık 801 yılında doğduğu ve 866 yılı civarında öldüğü tahmin edilmektedir. [Abbasi](#) halifelerinden özel ilgi ve destek gören Kindi, eserlerinin önemli bir kısmını aralarında hoca-talebe ilişkisinin ötesinde dostluğa dayanan bir yakınlık bulunan veliaht halifenin isteği üzerine kaleme almış ve ona it'af etmiştir. [Ortaçağ Avrupası](#)'nda *Alkindus* adıyla tanınan Kindî ilk [İslam felsefecisi olarak da kabul edilmektedir](#). Felsefesinde, [Platon](#), [Aristo](#) ve [Platon](#)'un görüşlerinin bir sentezini yapmıştır.

Soylu bir ailenin çocuğu olarak [Kûfe](#)'de doğdu. Dedesi Eş'as, [Güney Arabistan](#)'ın en büyük kabilelerinden biri olan Kinde'nin hükümdarıydı. [Müslüman](#) olduktan sonra kabilesinin ileri gelenleriyle [Kûfe](#)'ye yerleşmişti. Babası İshak bin Sabbah yıllarca Kûfe valiliği yaptı.

Küçük yaşta babasını yitirdi. Çocukluk ve ilk gençlik yılları [Kûfe](#) ve [Basra](#)'da geçen Kindî, geleneksel temel eğitimden sonra dil ve edebiyat alanında eğitim gördü. Halife Me'mun'un 830'da kurduğu [Beytül-hikme](#)'deki (Hikmet Evi) âlimler topluluğu arasında yer aldı. [Mutezili](#) devlet yöneticilerinden destek gören Kindi [Ehl-i Sünnet](#) yanlısı Mütevekkil-Alellah'ın iktidarında saraydan uzak kaldı.

Kindî felsefeden tıbbı, [matematikten astronomiye](#), [ilahiyattan](#) siyasete, [psikolojiden diyalektiğe](#), [astrolojiden](#) kehanete ve [optikten kimya ve müziğe](#) kadar yirmi ayrı dalda eser vererek sayıları 277'yi bulan bir [külliyat](#) oluşturmuştur. Sadece Hindu rakamlarının kullanımıyla ilgili dört kitabı bulunmaktadır.

Akla büyük bir yer veren [Meşşai felsefe akımını](#) ilk başlatan kişi de olan Kindi'nin 17 eseri [Latince](#)'ye, 4'ü [İbranice](#)'ye tercüme edilmiştir. Mekân ve hareketin izafi olduğunu, zamanın cisim ve hareketten ayrı düşünülemeyeceğini söylemiş ve *'Yavaş dediğimiz şey, uzun zaman içinde belli bir mesafenin kat edilmesidir. Hızlılık ise kısa zaman içinde aynı mesafenin kat edilmesidir'* demiştir.

Kindi deneysel çalışmaya çok önem vermiştir. Kindi'nin deneylerini yapmak için çok sayıda deney aleti tasarladığı ve bunlarla deneyler yaptığı bilinmektedir. Kindi'nin bilime ve bilim felsefesine çok önem verdiği bugün bütün araştırmacılar tarafından kabul edilmektedir.

'Biz doğruyu ve hakikatı kabul etmekte ve bunu söylemekte asla tereddüd göstermemeliyiz. Bu doğru ve hakikatın kimden geldiği önemli değildir; tarih öncesinden de gelebilir, yabancılardan da gelebilir. Benim gayem eski insanların ortaya koydukları ve bize bıraktıkları bilgileri tamamını önüme koyduktan sonra bizim zaman ve kapasitemizin yettiği kadar onların tamamlayamadıkları ve eksik bıraktıkları kısımları net bir şekilde ortaya koyup onları da Arapça olarak kayıt altına almaktır'

diyerek kendini ifade eden Kindi ne yapmak istediğini ortaya açık bir şekilde koymuştur. Kindi'nin özellikle Aristo'ya çok saygı duyduğunu ve eserlerini incelediğini onunla aynı fikirde olmadığı noktaları açıkladığını biliyoruz.

Kindi, kriptoloji biliminde Jül Sezar (MÖ 50) tarafından bulunan ve uygulanan tek alfabeli yerine koyma şifreleme yöntemini geliştirerek frekans analizini bulan ilk kişidir. Müslüman bilim adamları arasında müzikle ilgili ilk çalışmaları yapan da Kindî'dir. Yunancaya ve Latinceye çok vakıf olan Kindi'nin Pisagorun ses üzerine yaptığı çalışmaları bilmemesi mümkün değildir. Zamanımıza kadar gelen eserlerinde Kindi sesin perdelerini belirlemek için bir notasyon kullanmıştır. Daha önce Pisagor bahsinde vermiş olduğumuz bilgiler elinde olan Kindi aynı şekilde monokord kullanarak çalışmalara devam etti. Kindi'nin belki de akustiğe en önemli katkısı oktav bölümlerini gerçekleştirmesidir. Kindi insan kulağının duyabildiği aralıkta alt perdesi üst perdesinin yarısı olan sesleri aramaya başladı. Monokordla insanın yaklaşık 80 Hz civarında duymaya başladığı dikkate alınır, insanın duyabileceği 18000 Hz'e kadar alanı merkezi 1000 Hz olacak şekilde uygun bantlara böldü. 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 Hz olarak bölümleyen Kindi bu bölümlerin herbirini tanımlamak için de Arap

alfabesinin bir harfini kullandı: Dal, re, mim, fe, sad, lam, sin ve dat. Bu ayrıca ince do ile kalın do arasındaki farkı ve ikisine de Batı'da do denilmesini anlamlı kılmaktadır.

Kindi her bir nota aralığını da 24 parçaya bölerek bugün hala kullandığımız Türk ve Arap makamlarına ilk yolu açan bilim adamıdır.

Kindi'nin eserleri şöyle sıralabilir: Risale fil Akl, Risale fi Mahiyetin Nevmi ver Rüya, Risale fil Cevahiril Hamse, Risale fil illetis Selci vel Berdi vel Berki ves Savaiki ver Radi vez Zemherir, Risale fiş Şuaat, Risale fi İhtiyaratil Eyyam, De Intellecto Secundum Aristoteles et Platonem, Risale fi İhtilafil Manazır ve Fi Marifeti Kuval Edviiyetil Murekkebe.

Bu dönemde matematik ve astronomi üzerinde çok fazla çalışma yapılmıştır. Bütün matematikçiler aynı zamanda astronomi üzerine çalışmışlardır. O dönemin bütün bilim adamlarının aynı zamanda çok iyi birer filozof oldukları da unutulmamalıdır. Haccac ibni Yusuf, Euclid'in Elements adlı eserini Arapça'ya tercüme etmiştir.



Şekil 1.28 Farabi (870-950)

“Evrenin tümünü kavramak isteyen bir kişi, önce insana bakmalıdır. Çünkü bütünüyle varlık kavramı ruhta belirmiştir. Allah, varlıkların en büyüğü ve en son kademesidir. Bütün insanlık onun özünde birleşmektedir. Varlığı başka varlıklarla kıyaslanmayacak kadar mükemmeldir. Akıl, Allah'ın özünden gelir. Ahlâkın temeli ise bilgidir...”

Türk asıllı İslam felsefecisi (Maveraünnehir, Farab, 870-Şam, 950). Asıl adı Ebu Nasr Muhammed bin Muhammed bin Tahran bin Uslug olan ve Batı kaynaklarında Alpharabius adıyla anılan Farabi (Türkistan'ın Farab [Otrar] kentinde doğduğu için Farabi [Farablı] diye anılır). İlköğrenimini Farab'da, medrese öğrenimini

Tahran v Bağdat'ta gördükten sonra, Harran'da felsefe araştırmaları yaptığı yıllarda tanıştığı Yuhanna bin Haylan'la birlikte Aristoteles'in yapıtlarını okuyarak gezimciler okulunun ilkelerini öğrendi. Halep'te Hemedani hükümdarı Seyfüdevle'nin konuğu oldu. Arap ülkelerinde yaşamış, Türk kimliğini ve Türk törelerini ölünceye kadar bırakmamış olan Farabi'yi anlatan kitaplar, İslam âleminde Ebul Hasan el-Beyhaki, İbn-el-Kıfti, İbn Ebu Useybiye, İbn el-Hallikan adlı yazarlar tarafından Farabi'nin ölümünden birkaç yüzyıl sonra gerçekleştirildi. Ama bu yapıtlar, birer araştırma olmaktan çok, Farabi'yle ilgili söylenceleri derliyor, bir felsefeciyle değil, bir ermişi açıklıyordu.

Aristo'nun ortaya attığı madde ve suret kavramını hiçbir değişiklik yapmadan benimseyen, eşyanın oluşumunda, yani yaradılıştaki madde ve sureti iki temel ilke olarak gören Farabi'nin fiziği de, metafiziğe bağlıdır. Buna göre, evrenin ve eşyanın özünü oluşturan dört öge (toprak, hava, ateş, su) ilk madde olan el-aklül-faalden çıkmıştır Söz konusu dört öge, birbirleriyle belli ölçülerde kaynaşır, ayrışır ve içinde bulunduğu evreni (el-alem) oluştururlar.

Farabi, ilimleri sınıflandırdı. Ona gelinceye kadar ilimler trivium (üçüzlü) ve huatrivium (dördüzlü) diye iki kısımda toplanıyordu. Nahiv, mantık, beyan üçüzlü ilimlere; matematik, geometri, musiki ve

astronomi ise dördüzlü ilimler kısmına dahildi. Farabi ilimleri; fizik, matematik, metafizik ilimler diye üçe ayırdı. Onun bu metodu, Avrupalı bilginler tarafından kabul edildi.

Hava titreşimlerinden ibaret olan ses olayının ilk mantıklı izahını Farabi yaptı. O, titreşimlerin dalga uzunluğuna göre azalıp çoğaldığını deneyler yaparak tespit etti. Bu keşfiyle musiki aletlerinin yapımında gerekli olan kaideleri buldu. Aynı zamanda tıp alanında çalışmalar yapan Farabi, bu konuda çeşitli ilaçlarla ilgili bir eser yazdı.



Şekil 1.29 Kanun çalan müzisyen

Farabi insanı tanımlarken “alem büyük insandır; insan küçük alemdir” diyerek bu iki kavramı birleştirmiştir. İnsan ahlakının temeli, ona göre bilgidir; akıl iyiyi kötüden ancak bilgiyle ayırır. İnsan için en yüksek en yüksek erdem olan bilgi, insan beyninin çalışması sonucu elde edilemez; çünkü tanrısaldir, doğuştandır (vehbi). Bilimin ise üç kaynağı vardır: Duyu; akıl; nazar. Bilimler ikiye ayrılırlar: Kurumsal (nazari) bilimler; uygulamalı (ameli) bilimler. Ahlak, siyaset,

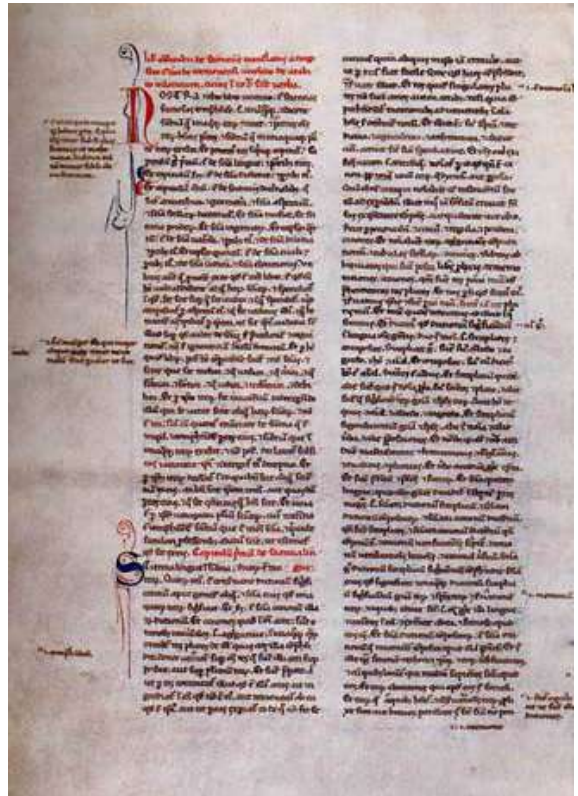
müzik, matematik uygulamalı bilimlere girer. Topumlarda öz bakımından ikiye ayrılırlar: Erdemli toplumlar: erdemsiz toplumlar. Bu toplumları yönetecek en kusursuz devletse, bütün insanlığı kapsayan dünya devletidir.

Farabi'yi anlatan kitaplar, İslam âleminde Ebul Hasan el-Beyhaki, İbn-el-Kifti, İbn bu Useybiye, İbn el-Hallikan adlı yazarlar tarafından Farabi'nin ölümünden birkaç yüzyıl sonra gerçekleştirildi. Ama bu yapıtlar, birer araştırma olmaktan çok, Farabi'yle ilgili söylenceleri derliyor, bir felsefeciyle değil, bir ermişçi açıklıyordu.

Aristo'nun ortaya attığı madde ve suret kavramını hiçbir değişiklik yapmadan benimseyen, eşyanın oluşumunda, yani yaradılıştta madde ve sureti iki temel ilke olarak gören Farabi'nin fiziği de, metafiziğe bağlıdır. Buna göre, evrenin ve eşyanın özünü oluşturan dört öge (toprak, hava, ateş, su) ilk madde olan el-aklül-faalden çıkmıştır. Söz konusu dört öge, birbirleriyle belli ölçülerde kaynaşır, ayrışır ve içinde bulunduğumuz evreni (el-âlem) oluştururlar.

Farabi, ilimleri sınıflandırdı. Ona gelinceye kadar ilimler trivium (üçüzlü) ve quadrivium Nahiv, mantık, beyan üçüzlü ilimlere; matematik, geometri, musiki ve astronomi ise dördüzlü ilimler kısmına dâhildi.

Şekil 1.30 Farabi, Kitab ihşa' al-'ulum, Cremonalı Gerard'ın Latince tercümesi

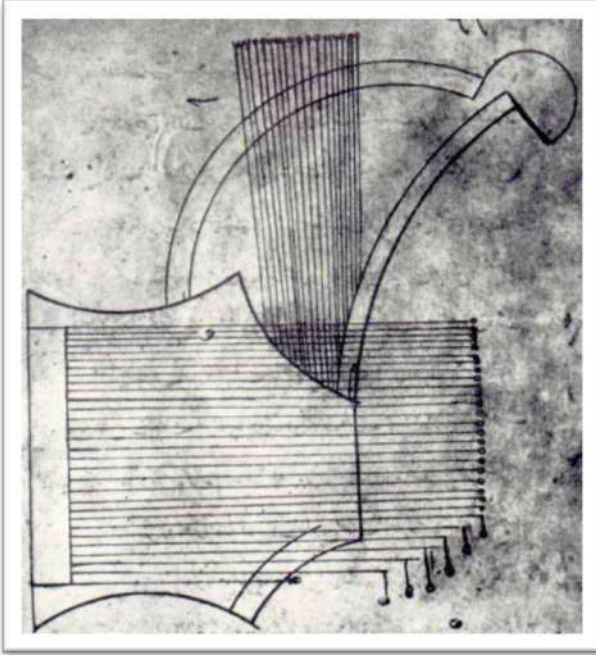


Farabi ilimleri; fizik, matematik, metafizik ilimler diye üçe ayırdı. Onun bu metodu, Avrupalı bilginler tarafından kabul edildi.

Hava titreşimlerinden ibaret olan ses olayının ilk mantıklı izahını Farabi yaptı. O, titreşimlerin dalga uzunluğuna göre azalıp çoğaldığını deneyler yaparak tespit etti. Bu keşfiyle musiki aletlerinin yapımında gerekli olan kaideleri buldu. Aynı zamanda tıp alanında çalışmalar yapan Farabi, bu konuda çeşitli ilaçlarla ilgili bir eser yazdı.

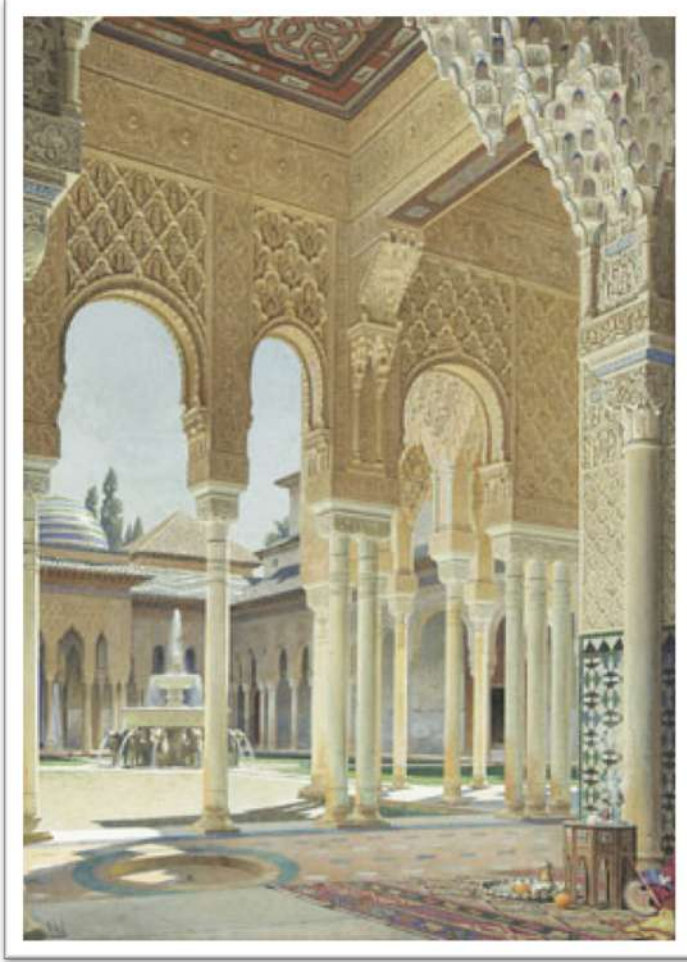
Farabi insanı tanımlarken “alem büyük insandır; insan küçük alemdir.” Diyerek bu iki kavramı birleştirmiştir. İnsan ahlakının temeli, ona göre bilgidir; akıl iyiyi kötüden ancak bilgiyle ayırır. Farabi'nin günümüze kadar ulaşan eserleri aşağıda verilmiştir.

- Et-Ta'limü's-Sanî ve İhsâu'l-Ulûm (İlk İslam Ansiklopedisi)
- El-Medinetü'l-Fazıla (Fazilet Şehri: Toplumun İlkeleri Üstüne Kitap)
- Es-Siyaset-ül Medeniyye
- Risale fi Ma'anii'l-Akl (Aklın Anlamları)
- İhsa el-Ulûm musiki el-Kebir (Büyük Müzik Bilimleri)



- Kitâb El Mûsikî El Kebir (Müzik Üzerine Büyük Kitap)
- Kitâb Fi'l Mûsikî (Müzik Kitabı)
- El Müdhal Fi'l-Mûsikî
- Kitâb Ustukusat
- İlm El-Mûsikî (Müzik Bilimi)
- İhsa'el-Ulûm
- Kitâb Fi'lhsâ'el-İkâ
- Kitâbü'l-Mûsiki
- Kitâb At Advar
- Kitâbü'l Farab

Şekil 1.31 Farabi'nin Kitâb El Mûsikî El Kebir'inden bir müzik aleti (Şahrut)



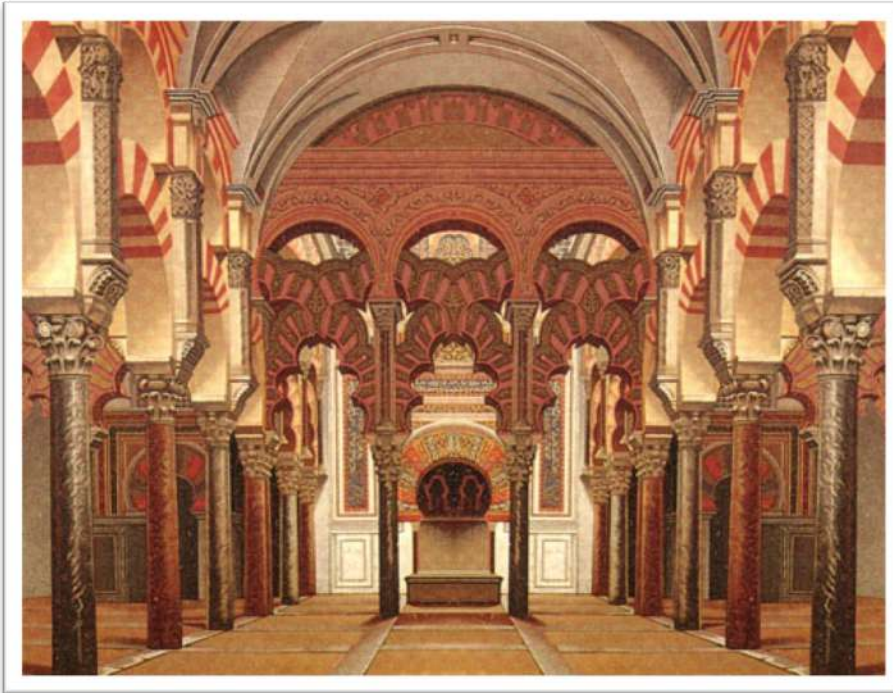
Endülüs Emevilerinin yapmış olduğu bir toplantı odası kitabın yazarı tarafından ziyaret edilmiştir. Günümüzde Fısıltı Galerisi olarak adlandırılan yapıların ilk örneklerinden olan ve hakkında detaylı bilgi verilmeyen bu yapılar araştırıldığında insan eliyle yapılanların en eskilerinden birinin El Hamra sarayındaki fısıltı galerisi olduğu görülmektedir. Zamanında sultanın danışmanlarının sultanın bulunduğu mekânda fikir paylaşımlarını ve sultanın da onların hepsini dinlemesine imkân veren bir yapı şeklinde yapılmış olan bu toplantı odası kare bir zeminle başlayıp bir kubbeyle tamamlanmış olan bir taş yapı şeklindedir.

Şekil 1.38 El Hamra Sarayı Arslanlı Havuz

Şekil 1.39 Kurtuba Camii (İçine bir Kadetral inşaa edilmiş olduğu halde hala muteşem ve dünyanın en büyük camileri arasında)

köşelerdekiler birbirlerini duyabildikleri halde diğer çapraz köşelerdekiler onların ne dediğini duyamamaktadırlar. İlginç olan odanın tam ortasına yerleştirilmiş olan koyu renkli mermerin üzerinde

Zeminin köşelerine birer kişi geçip yüzlerini duvarın köşesine dönerek fısıltı halinde konuştuklarında, çapraz köşelerdekiler birbirlerini duyabildikleri halde diğer çapraz köşelerdekiler onların ne dediğini duyamamaktadırlar. İlginç olan odanın tam ortasına yerleştirilmiş olan koyu renkli mermerin üzerinde duran kimse dört köşede konuşulanların tamamını duyabilmektedir. Garip şekilde siyah taşın üzerinde durulmadığında ise herhangi bir şey anlayamamaktadır. Bunu beş arkadaş iki saat kadar test ettik. Binanın köşesinden başlayan çizgi kubbenin ovali üzerinden kendini çapraz köşeden gelen çizgi ile insicam içinde tamamlamaktadır.



Şekil 1.40 Kurtuba camiinin içinden bir görünüş



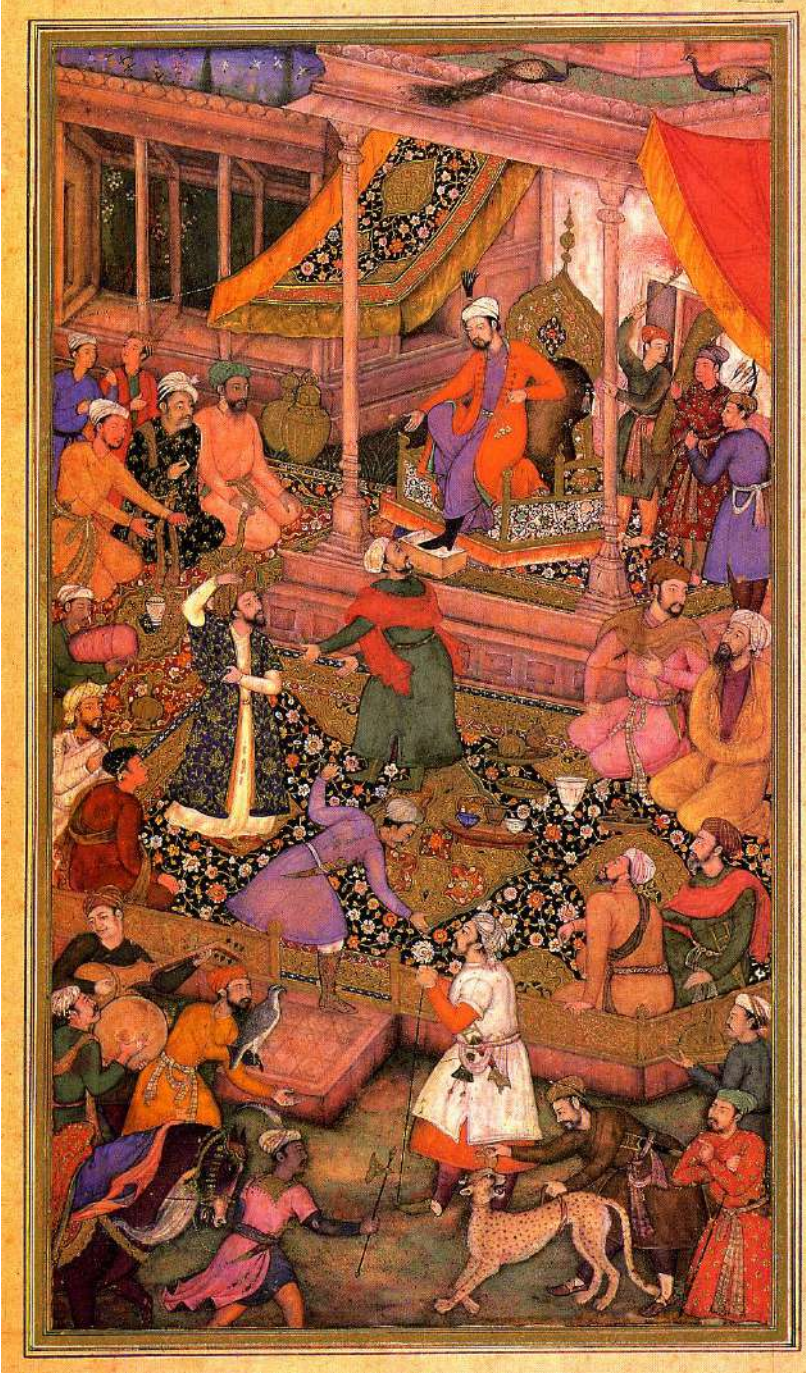
Şekil 1.41 Selimiye Camii

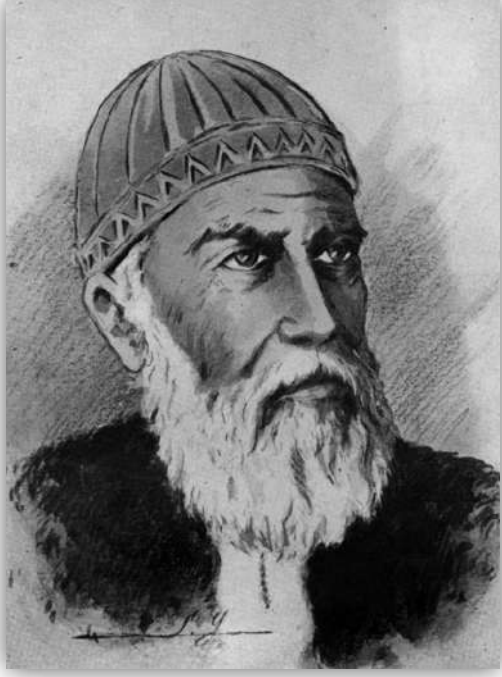
Dolayısıyla detaylı bir matematik analiz sonucunda bunun nasıl çalıştığı akustik olarak anlaşılmış ve 12. yüzyılda inşaa edilmiş bu yapının benzerleri inşaa edilmiştir. Mimar Sinan'da Selimiye Camiinden benzer bir fisiltı galerisini inşaa etmiştir. 17. Yüzyılda Londra bir fisiltı galerisi inşaa etmiş

olan İngilizler bunu bir reklam ve turistik gelir vasıtası görürken bizde üniversite me'zunları bile El Hamra'daki fisiltı toplantı odasından veya Selimiye'deki fisiltı galerisinden haberdar değildir.

Diğer yandan hala dünya üzerindeki en büyük camilerden biri olarak kabul edilen, Müslümanların kaybetmesinden sonra ortasına bir Katedral inşaa edilmiş olmasına rağmen alanının sadece dörtte birini kaybetmiş bulunan Kurtuba Camiinin mihrabında imamın rükuya gittiğinde tam ağzının hizasına gelecek şekilde yerleştirilmiş olan iç bükey koyu renkli bir taş görüp sorduğumuzda rehberin anlattıkları gerçekten çok ilginçti. Rehberin anlattığına göre yapılan çalışmalar bu koyu renkli taşın bir yansıtıcı olduğunu imamın ruku halindeye getirdiği tekbirin de mihraba yansıtıldığı ve bunun cemaat tarafından duyulabildiğini belirtti. Bizler de bunun testini yaptığımızda gerçek olduğunu gördük.

Benzer şekilde Topkapı sarayında gürültü perdelemenin değişik bir kaç çeşiti mevcutken, İstanbul, Bursa ve Edirne'deki selatin camilerde hem ses iletimiyle, hem de dalga hareketleriyle ilgili ileri teknoloji kullanıldığını görmek, cami kubbelerinde gömülü olarak bulunan Helmutz rezonatörleri, o dönemlerde bile hem akustik hem de titreşim bilgi birikiminin hiç de küçümsenemeyecek seviyede olduğunun delilidir. Bütün bunları yok saymak bağnazlıktan başka bir şekilde açıklanamaz.





Söylesem tesiri yok, sussam gönül razı değil

Çektiğim alamı bir ben bir de Allah'ım bilir...

Fuzuli

Bu noktada konumuzla doğrudan ilgisi olmasa bile bahsetmeden geçmenin büyük bir eksiklik olacağını düşündüğüm bir konuya dikkat çekmek istiyorum: Müzik ve müzik aletlerinin Müslümanların ve Osmanlıların yaptıkları katkılar.

Osmanlı döneminde, Edirne'de kurulan *Darüşşifa'da* (*Şifa Evi* yani *günümüz tabiriyle Hastane*) ruh hastalarının müzikle tedavi edildiklerini biliyoruz. II. Bayezit'in 1488'de Mimar Hayreddin'e inşa ettirdiği bu *Darüşşifa'yı* ziyaret eden Evliya Çelebi, ruh hastalarının nasıl tedavi edildiklerini şöyle anlatır: 'Müziğin insan ruhu üzerindeki olumlu etkisi konusunda yeterli bilgi ve tecrübeye sahip olan *Darüşşifa'nın* hekimbaşısı, hastalarına önce çeşitli müzik makamları dinletiyor, kalp atışlarının hızlanıp ya da yavaşladığına bakıyor, yararlandıkları uygun melodiyi belirliyor, şikayetleri ve benzer hastalıkları bir araya getiriyor, *Darüşşifa'nın* müzik ekibine haftanın belirli günlerinde konserler tertipletiyordu.' Ayrıca Evliya Çelebi'nin Seyahatname'sinde hangi müzik makamının insanda ne tür etkileri olduğuna örnekler de verilmektedir: *Zihni açma, hafıza ve hatıraları güçlendirmede "isfehan"; aşırı hareketli, heyecanlı hastaları sakinleştirmede "rehavi", sıkıntılı, karamsar, durgun ve neşesiz hastalarda "kuçi" makamının fayda sağladığı belirtilmektedir.*

'Kânun'un bazı kaynaklara göre büyük Türk bilginlerinden Farabi (870-950) tarafından icat edildiği söylenmektedir, aynı kaynaklar Farabi'nin 'Kânun'üzerinde çeşitli değişiklikler yaptığını da öne sürmektedir.

Ancak, antik çağda Mısır ve Sümerliler tarafından kullanıldığını gösteren bazı tarihi belgelerden başka eski bir Arap rivayetine göre de 'Kânun'u, İbn-i Hallegan'ın icat ettiği ve bu bilginin Horasanlı Bermek ailesinden olup Musul'un Türklerle meskun İrbil şehrinde doğduğu söylenmektedir.

Bir efsaneye göre de: Bir ağacın üzerinde ölen kuşun, ağacın dallarından aşağıya sarkan kurumuş bağırsaklarının rüzgarın etkisiyle çıkardığı seslerden esinlenerek 'Kânun'un bulunduğu söylenir. Evliya Çelebi seyahatnamesinde, 'Kânun'un meşhur üstadlardan Ali Şah tarafından icat edildiğini ve Revanlı Mirza Haydar Bey ile Cağalazade Mustafa Bey'in 'Kânun'hakkında bilgi sahibi olduklarını yazar.

Albert Lavignac, 'Kânun'un Arap çalgısı olduğunu ileri sürer. Clement Huart, 'Kânun'u Avusturyalıların Zither ve Macarların Cymbalum'undan daha küçük bir "Arp" olarak tanımlar. "Çeng" adındaki çalgının 'Kânun'ile birlikte bulunduğu ve geliştiği Batı müzik dünyasında kabul edilmiştir.

İslamın ilk devirlerinde 'Kânun', sesler sistemini göstermek için pedagojik bir amaçla kullanılmıştı. Yunanca kökenli "Kanon", yani kural, kânun adı da buradan gelmektedir. Yakın Doğu da gördüğü ilginin sebebi de bu işlevde yatmaktadır.



Şekil 1.56 Kanun

15. asırda yaşamış bir Türk alimi olan Ahmet oğlu Şükrullah, IV. Osmanlı Padişahı Yıldırım Bayezid'in Şehzadelerinden İsa Çelebi'ye ithaf ettiği kitabında Eski Türklerin "Çalav" ismini verdikleri çalgıları hakkında geniş bilgi vardır. Ahmet oğlu Şükrullah bu kitabında yapılış ve çalınış tarzları ile birlikte bu çalgıları 'Kamil Çalgılar' ve 'Eksik Çalgılar' diye iki grupta incelemiştir. Eksik çalgılardan olduğunu bildirdiği 'Kânun'hakkındaki bilgiye göre, o zaman ki 'Kânun'un şekil ve tel düzeni bakımından bugünkü 'Kânun'dan esaslı bir farkı olmadığı anlaşılıyor. 'Kânun'daki

deri kısmından bahsetmediğine göre, mandal tertibatı gibi bu kısımda 'Kânun'a sonradan ilave edildiğini düşünebiliriz (Bu bilgiler 12. Ve 13. asırlara aittir).

Rauf Yekta'nın Türk Müsikîsi adlı kitabında 'Kânun'u anlatan bir bölümde şöyle denilmektedir: "Evvelce bu çalgıyı icra edenlerin ses perdesini az çok yükseltmek istedikleri telin üzerine bir parmak darbesinden başka başvuracakları bir çare yoktu, hem de az muvaffak olunan bu ameliyenin güçlüğüne çare bulmak üzere, bundan otuz sene evvel (kitabın yazılış tarihi:1913) her telin altına iki veya üç madeni parça (mandal)konulması düşünüldü; böylece kolayca kaldırılıp indirilen bu mandallarla istenilen perdenin tizliği veya pestliği elde edilmektedir". Mahmut Ragıp Gazimihal de mandal tertibatı hakkında şöyle demektedir: Asrın başlarında yarım perdeler için mandal sistemi yine İstanbul'da tatbik edilmiştir.

Günümüzde ise her üçlü tel için 6 ile 15 mandal görülebilmektedir. 'Kânun', yukarıda bahsedilen mandal tertibatının bulunuşuna kadar çok güç olan şekliyle, sol elin baş parmağının tırnağı ile tellerin çeşitli yerlerine bastırıp perdeleri bulmak suretiyle çalınıyordu. 'Kânuni Hacı Arif Bey' (1862-1911) 'Kânun'un mandalsız olarak çalındığı devrin en büyük 'Kânun'virtüözü olarak bilinir.



Şekil 1.57 Kanun

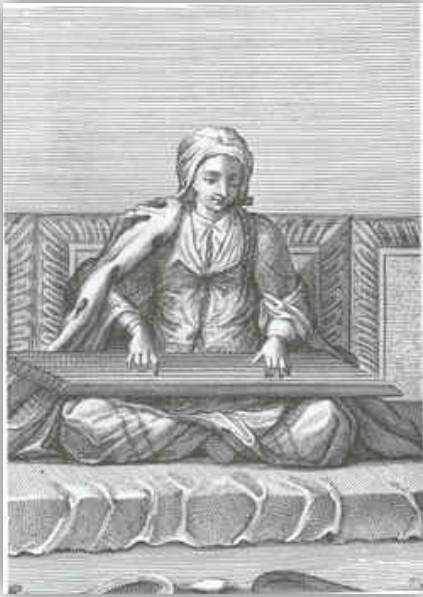
'Meragalı Abdülkadir' (1350-1435) İslam Müsikîsi tarihinde, döneminde kullanılan çalgıların teknik özelliklerini en düzgün biçimde açıklayan kişidir. Abdülkadir, çalgıları bilimsel bir tasnife tabi tutmuş, yapım şekillerini, teknik özelliklerini, bazen akortlarına kadar anlatmıştır. 'Kânun' hakkında şöyle demektedir: 'Kânun'sazı "Mutlakat" grubuna dahil edilmiş olup şöyle tanıtılmıştır; teknesi ve göğsü üçgendir, sapı yoktur, telleri kiriştir ve üçer üçer akort edilir, yani her üç tel aynı sese çekilir, bir oktava sekiz mülayim ses gelecek şekilde düzenlenir.

'Kânun' için 20. asır başlarına kadar bağırsaktan yapılmış ve kiriş olarak adlandırılan teller kullanılıyordu. Bu kirişler, naylon tellerin daha dayanıklı olmaları ve daha güçlü ses vermeleri ayrıca çeşitli kalınlıklarda bol miktarda bulunması nedeniyle tamamen terkedilmiş ve yerini naylon tellere bırakmıştır. Bu tellerin bildiğimiz balık mesinaları ile hiçbir ilgisi olmayıp saf naylondan imal edilen cinsleri kullanılır.

Büyük müsikî bilgini Rauf Yekta yüzyılımızın ilk çeyreği ile ilgili olarak şöyle yazmıştı:

Daha evvel de gördüğümüz gibi, 'Kânun' Türklerin eski çalgıları arasında yer alıyordu; bununla beraber bir zaman geldi ki (18. yüzyıl boyu) 'Kânun', Türklerce tamamen unutuldu. Şöyle ki: Türk Müsikîsi'nin en parlak devri olan III. Selim'in saltanatı sırasında bu çalgıyı icra edene rastlanmıyor.

II. Sultan Mahmud (1818-1839) devrinde Şam'lı bir müsikîşinas olan Ömer Efendi, 'Kânun'u İstanbul'a getirmiş ve o zamandan beri bu çalgı, aralarında bilhassa Türk hanımlarının da yer aldığı birçok amatör icracı bulmuştur. Henry George Farmer'ın (Turkish Musical Instruments in the fifteenth century) haklı olarak itiraz ettiği gibi, 'Kânun'un 18. yüzyılda unutulduğu yahut ihmale uğradığı görüşü hayli tartışmalıdır. Çünkü G. Scottin'in 1707-1786 yıllarında yaptığı, 1723'te de Bonanni'nin bir kopyasını yayımladığı 'Kânun' çalan Türk kızı resmi ile 1781-1786 yıllarında İstanbul'da bulunan Toderini'nin oda müsikîsi çalgıları arasında 'Kânun'u da sayması Rauf Yekta'nın görüşlerini çürütmektedir. Üstelik Toderini 'Kânun'un saraydaki kadınlarca da çalındığını söylemeyi de ihmal etmemiştir, demek ki, 'Kânun'o dönemde bir piyasa çalgısı değildi.



Bir başka 18. yüzyıl yazarı Laborde, 'Kânun'u konser çalgıları arasında saymıştır. Bir başka önemli belge veya resim de 1738-1742 yılları arasında İstanbul ve İzmir'de bulunan İsviçreli ressam J. E. Liotard'ın çizdiği saz takımındaki 'Kânun'lar bu çalgının 18. yüzyılda da kullanıldığını gösteren canlı bir belge niteliğindedir. Yine de, 'Kânun'un yaygın bir çalgı olduğunu söylemek zordur, ama şunu rahatlıkla söyleyebiliriz: Ömer Efendi 'Kânun'u İstanbul'a getirmiş değildir, O bu çalgının sevilip yayılmasına öncülük etmiş olabilir.

Kânuni Ömer Efendi'den sonra Kânuni Hacı Arif Bey'in de bu çalgının yayılmasında çok büyük hizmetleri olmuştur.

Şekil 1.58 Kanun çalan bir saray kadını

'Kânun'eğik kenarı uzun bir yamuk şeklindedir, bu şekilde yapılmasının amacı, tellerinin boyunun ayarlanmasındandır. Akort yapmaya yarayan burguların bulunduğu bu sol tarafa daha sonra mandallar eklenmiştir. Şekil yönünden kalınlığı az olan tahta bir kutuya benzer. Teller göğüs üzerine birbirine paralel olarak üçer üçer gerilmiştir. 'Kânun' boyu 95-100 cm., eni 38-40 cm. ve kalınlığı 4-6 cm. arasında sağ tarafı iki dik açılı bir yamuk şeklindedir. Genellikle yapımında Köknar veya Ladin, Çınar(göğüs tahtası olarak), Ihlamur, Gürgen ve Kayın v. b. ağaçlar kullanılır. Sağ tarafta ise teller eşik denilen bir köprü üzerinden Geçer ve bu köprünün altında rezonansı sağlayan deri bulunur, bu deriler de oğlak veya balık derisi kullanılır. Tellerin geriliminden dolayı deri üstünde büyük bir kuvvet oluşur. Kendine özgü gösterişli ve ahenkli sesiyle yer eden, her türlü duyguyu zengin bir şekilde ifade etmeye uygun 'Kânun', bütün parmaklar kullanılarak ve Arp , Gitar tekniğine yakın bir teknikle çok sesli çalışmalara da en açık bir çalgı olarak Türk Müsikişinin piyano'su olarak adlandırılabilir.

Müzik aletleri ve müzik teorisi üzerine Müslümanların etkileri uzun süredir tartışılıyor. Her ne kadar Batı bu konuda tutucu davranıyor olup, Müslümanların etkilerini inkar ediyor olsa, diğer taraftan bazı Müslüman bilim tarihçileri de her şeyi Müslümanların bulduğunu iddia edip, Müslüman olmayan bilim adamlarını da Müslüman kabul ederek yorum yapsalar da, bu konudaki bilgileri incelemekte fayda vardır. Batıda genel kanı Müslümanların müzik aletlerini biraz geliştirdikleri ve değişik müzikler icra ettikleri fakat müzik teorisine herhangi bir katkı yapmadıkları şeklindedir.

1780 yılında Fransız bilim adamı Laborde aykırı bir ses olarak çıkmış ve 'Essai sur la Musique ancienne et moderne' isimli kitabında müzik notalarını Müslümanların icat ettiğini söylemiştir. Daha önceleri solmizasyonun St. John ilahisinin ritminden geldiğine inanılıyordu. Bunu da İtalyan müzisyen Guido Arezzo (995-1050) dökümante ettiği kabul görüyordu. Laborde solmizasyonda kullanılan notalara karşılık gelen ifadelerin esasında Arapça alfabesinin harfleri olduğunu iddia etti.

Arab Alfabeti	Mim	Fe	Sad	Lam	Sin	Dal	Re
Müzik Notaları	mi	fa	sol	la	si	do	re

1839'da konu üzerine detaylı araştırmalar yapan Villoteau, Müslümanların etkisinin kabul edilmesi gerektiğini belirtti. Guido'nu müzik skalası daha önce Müslümanların kullandığı skala (solmizasyon) ile karşılaştırıldığında Müslümanların etkisinin inkar edilmesinin mümkün olmayacak bir benzerlik olduğu Villoteau tarafından açıklanmıştır. Yukarıda verilen solmizasyon tarafsız bir şekilde incelendiğinde Villoteau'nun haklılığının ortada olduğu açıktır.

Notaların Müslüman eserlerindeki kayıtları incelendiğinde 833 yılında Al-Mamun ve 850 Isak Musuli zamanlarında kullanıldığı görülmektedir. Kindi (874), Yahya bin Ali (912), Farabi (870-950), İbni Sina (1037) gibi çok sayıda Müslüman bilim adamının eserlerinde notaların bilindiği ve kullanıldığı açık olarak görülmektedir.

Dominucus Gundissalinus (1151) de müzik notalarını ve müzikle ilgili tanımlamaları eserlerinde Arapça olarak kullanmaktadır. Count Souabe Hermanus of Reichenau'ın Kindi'nin müzik teorisi ve nota kullanımıyla ilgilendiği bilinmektedir. İbni Sina ve İbni Rüşd'ün Avrupa müzik tarihini ve bilgisini derinden etkilediği bütün bilim adamları tarafından kabul edilmektedir. Farabi'nin müzikle ilgili çalışmalarının Avrupa'da 18. yüzyıla kadar kullanıldığı da unutulmamalıdır. Farabi'nin 5/4 major tierce ve 6/5 minor tierce'i Avrupaya öğreten bilim adamı olduğu kabul edilmektedir. Dolayısıyla dünyanın bilgi birikiminde katkısı olanları inkâr etmek, yok saymak veya gereğinden fazla önemsemek kimseye bir şey kazandırmayacaktır. Aradan 1100 yıl geçmiş olmasına rağmen Kindi'nin seviyesinden geride kalmak kabul edilemez görünmektedir. Kindi'nin daha önce zikrettiğimiz fikirlerini bir kere daha alıntılarla yerinde olacaktır:

'Biz doğruyu ve hakikati kabul etmekte ve bunu söylemekte asla tereddüd göstermemeliyiz. Bu doğru ve hakikatin kimden geldiği önemli değildir; tarih öncesinden de gelebilir, yabancılardan da gelebilir. Benim gayem eski insanların ortaya koydukları ve bize bıraktıkları bilgileri tamamını ölüme koyduktan sonra bizim zaman ve kapasitemizin yettiği kadar onların tamamlamadıkları ve eksik bıraktıkları kısımları net bir şekilde ortaya koyup onları da Arapça olarak kayıt altına almaktır'.

Günümüzde bu konuda tarafsız araştırma yapılmasına büyük ihtiyaç olduğu açıktır. Bilgi akıcıdır. Boşluk bulunan her yere akar. Bilginin dolaşımını engellemek mümkün değildir. Örneğin Soriano, Guido'nun Endülüs Medreselerinde eğitim gördüğünü belirtmektedir. Onun kendi eğitim gördüğü dönemde genel olarak bilinen, hakkında kitaplar yazılmış olan müzik teorisini ve nota bilgisini öğrenmemiş olduğunu ve bunları tekrar kullanmadığını iddia etmek gülüçtür. Monte Cassino'da yazılmış olan Latince eserlerde Arapça hecelerin ve notaların kullanıldığı belirlenmiştir. Burası birkaç sefer Müslümanlar tarafından ele geçirilmişti ve ünlü Tunus'lu bilim adamı Constantine Africanus emekliliğini burada geçirmiştir. Diğer taraftan aynı dönemde birçok Hristiyan bilim insanı Müslüman ülkelere ziyaretlerde bulunmaktaydı. Bunların orada öğrendiklerini kendi ülkelerinde kullanmalarından doğal bir şey yoktur.

Daha önce Endülüs Medreselerinde eğitim veren hocaların bir kısmının Yahudi ve Hristiyan olduğunu belirtmiştik. İbni Farnes (888) Endülüs Medreselerinde *quadrivium* (bu yedi liberal sanatın üst sınıfı olarak öğretilen Aritmetik, Astronomi, Geometri ve Müzik'in genel adıdır) yerleşmesini sağladığı ve müzik eğitimini verdiği bilinmektedir. Aynı dönemde Zariyab (789-857)'in İspanya'ya müziği öğrettiği ve sevdirdiği kabul görmektedir. Zariyab İspanya'da dünya üzerindeki ilk konservatuvarı kurmuştur.

Aurillac'yalı Gerbert (daha sonra Sylvester II olarak papalık yapmıştır) (1003), Endülüs Medreselerinde Arap rakamlarını ve müzik teorisi eğitimi veren bir profesördü. Onun lakabı *Müzişyen* idi. Onun papalık döneminde Avrupa'da bilimsel düşüncenin yenilediği kabul edilir.

Müziğin alfabetik olarak notasyona tabi tutulmasını ilk olarak Kindi bulmuştur. Kindi (874), Farabi (870-950) ve Farabının 'İhsan' Al-Ulum' isimli eseri Latinceye çevrilmesinin Hermann Contract (1054)'i derinden etkilediği bilinmektedir. Öbür yandan Hermann'ın birçok buluşun sahibi sayılmasını ve müzikle ilgili üç kitabının bulunmasını bir tesadüf olarak görmek ancak bağnazlıkla açıklanabilir. Pseudo Hucbald, Pseudo Bernelinus and Notker Labeo (1022) Kindi'nin kullandığı fonetik (alfabetik) müzik notasyonunu kullanışlardır. Yani tarihi kronolojinin takip edilmesi bile bize bilginin dolaşımıyla ilgili ip uçları vermektedir.

Kindi ve Farabi başta olmak üzere müziğin yazım sistemi olarak notaların kullanıldığı bilinmektedir. Bundan yaklaşık 1100 yıl önce Kindi ud çalgısının perdelerinin bağlanmasına ilişkin tafsilatlı bir eser hazırlamıştır. Kindi'nin bu eserinde Yunanlardan gelen ses bilgilerini geliştirdiğini alfabetik yazım sistemini bir sekizli için kullandığını ve müziğin kozmolojik yönlerinden de bahsettiğini görmek mümkündür. Hatta bugün birçok batı ülkesinde de kabul gören do-re-mi-fa-sol-la-si-do şeklinde müzik gamı için kullanılan solmizasyon heceleri Arapça'da Kindi ve Farabi tarafından kullanılan Dal-Re-Mim-Fa-Sad-Lam-Sin-Dal gamı ile büyük benzerlik gösterdiğinden Müslüman kökenli olduğu iddiaları da mevcuttur. Batı dillerinde hiç kullanılmayan bu hecelerin Arapça ses sistemi ile olan benzerliği batılılar tarafından kabul görmese bile ortadadır.

Müziğin iyileştirici özelliğini ilk fark edenlerin birinin de Kindî olduğu bildirilmektedir. Dönemin tanınmış hekimlerine gitmesine rağmen sonuç alamayan baba, felçli çocuğunu son çare olarak Kindî'ye getirir. Çocuğu gören Kindî, onun vücudundaki kasılmaları görerek onu rahatlatacağını öngörerek müzik öğrencilerini yanına çağırarak onlara sakin bir müzik icra etmelerini söyler. Müzik icrası esnasında rahatlayan çocuğun doğrularak oturduğu ve hatta konuşmaya başladığı belirtilmektedir. Bu iyileşmeyi gören Kindî babaya çocukla konuşmasını söyler ve baba çocukla çabuk bir şekilde iletişim kurar. Ancak müzik kesildiğinde çocuk yine eski haline döner. Müzik terapisi günümüzde fiziksel, duygusal ve zihinsel hastalıkları iyileştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kindi'den yetmiş yıl kadar sonra Farabi, keman ailesine mensup alguların atası kabul edilen rebabeyi ve sitarın yatay bir uyarlaması olan kanunu geliştirmiştir. Müzik hakkında beş eser kaleme almakla beraber Farabi'nin asıl şaheseri, müzik teorisi üzerine yazdığı Büyük Musiki Kitabı'dır. Bu eser 12. yüzyılda İbranice'ye ve Latince'ye tercüme edilmiştir. Farabi'nin bu eserinin etkisi 16. yüzyıla kadar hissedilmiştir.

Bugün klasik müzik orkestralarında ve rock grublarında kullanılan birçok müzik aletinin adı ve menşei Müslüman bilim adamlarıdır. Lavta benzeri algular uddan, rebab rebabeden, gitar kitaradan, naker ise keçi derisinden yapılan nakkare adlı davuldan türetilmiştir.

Halife El Mugira'nın vazosunun (MS968) zerindeki ud çalan sanati figürü ilginçtir.

Gezgin müzisyenler, tüccarlar ve seyyahlar tarafından Avrupa'ya ulaşan Müslüman müziği, sekiz yüz yıllık Endülüs Emevi yönetimi boyunca İspanya ve Portekiz'in kültür ve sanat hayatının ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Bu etkinin eski örneklerinden biri olarak Cantigas de Santa Maria koleksiyonudur. Kastilya ve Aragon Kralı Alfonzo X 'el sabio'nun (bilge) emriyle 1252 yılı civarında oluşturulan bu koleksiyon, Hz. Meryem hakkındaki dört yüz yirmi dini şarkının yanı sıra dönem mzisyenlerini detaylı tasvir eden 40 resim de içerir. Bazı minyatürlerde çeşitli müzisyenleri çift olarak gösterir.



şekil 1.59 Halife El Mugira'nın vazosu, Kurtuba, MS 968. Medinetü Zehra'da yapılmış olan bir sanat şaheseri. Müzisyenin algısına dikkat çekmek isterim.



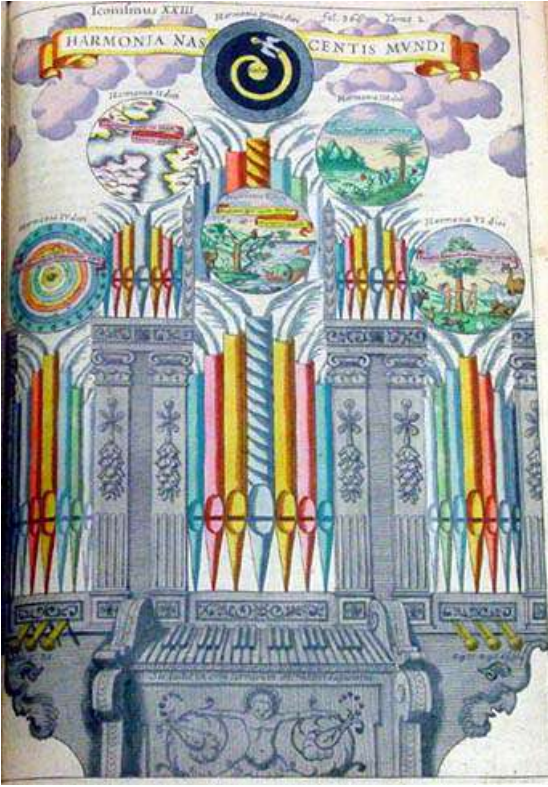
Şekil 1.60 Cantigas de Santa Maria Codex E'de müzisyenler (Müzisyenin çalgısı ile Şekil 1.**'daki çalgının benzerliği dikkat çekici)



Şekil 1.61 Cantigas de Santa Maria Codex E'de müzisyenler

Müziğin Avrupaya yayılmasında birçok kişi rol oynamıştır. Bunlar arasında koyu çehresinden dolayı Ziryab yani Karakuş lakabıyla ünlene efsanevi bir adamdan bahsedilir. Ziryab Bağdat'lı tanınmış bir müzisyenin yetenekli bir öğrencisi olup zamanla müzik bilgisi ve becerisi hocasını geride bırakmıştır. Ziryab 822 yılında II. Abdurrahman'ın davetiyle Kurtuba Sarayına yerleşti. İkiyüz dinar aylık alıyordu ve büyük imtiyazlara sahipti. Ziryab dünyanın ilk konservatuarını Kurtuba'da kurdu. Uda beşinci bir bam teli ilave etti ve Avrupa'da udun yayılmasını sağladı. Daha sonra Cantigas de Santa Maria Codex'indeki

resimlerde çok sayıda udun yer alması böylece daha anlaşılabilir olmaktadır. Serbest metrik ve ritmik parametreler tanımlamak suretiyle müzik teorisinin tamamen yeniden düzenlenmesini sağladı. Müzik tarihçisi Julian Ribera gibi birçok otorite kontrpuan ve çoksesliliğin ilk kez 1000 yılları civarında Kurtuba konservatuarında geliştirildiğini belirtir.



Şekil 1.62 Yaratılış, Harmoni ve Org

Hristiyan inanışında yaratılışın müzikle veya sesle yapıldığı konusunda bir inanış mevcuttur. Şekilde görülen resme verilen isim 'The Harmony of the Birth of the World' (Harmonia Nascentis Mundi) Dünyanın Doğuşunun Harmonisi'dir. Tabloda kosmik bir org ve bu orga ait altı tane boru görülmektedir. Bu altı borunun kainatın altı günde yaratılmasını temsil ettiği belirtilmektedir.

Klavyenin altında görülen 'Sic ludit in orbe terrarum aeterna Dei Sapientia' (thus plays the wisdom of the everlasting God in the earthly orb) 'Ezeli olan Tanrı'nın hikmetleri oluşmaya devam eder' ifadeleri ilginçtir. Ayrıca Robert Fludd tarafından çizilen altı resimde sırasıyla denizler, karalar, bitkiler, hayvanlar ve insanların yaratılışı verilmektedir.

Şekil 1.63 Yaratılış, Harmoni ve Müzik

Müziği Batılıların yaptığı gibi sadece Batı'ya veya başka bir bölgeye bağlamak mümkün değildir. Müzik evrensel olduğu gibi müzikle ilgili çalışmalar da evreseldir. Sadece bizlerin o bilgilere ulaşamadığı veya araştırmadığı onları yok saymamızı gerektirmez.





Şekil 1.65 Song Hanedanı (960–1279) döneminden bir resim

Batı'da The Night Revels of Han Xizai olarak bilinen bu resim Çinli ressam Gu Hongzhong tarafından 10. yy'da yapılmıştır. Müzisyenin icra ettiği müzik aletinin uda benzerliği ortadadır.



Şekil 1.66 Hindistan'da müzik

Akbar (1556-1605) zamanını gösteren resimlerde müzik aletleri dikkat çekicidir.

Dolayısıyla vurgulanması gereken önemli bir husus bilimsel gelişmeler ve hususan akustik konusundaki gelişmeler bir millete veya dine mal edilemez. Bütün insanlığın ortak malıdır.

Erken Modern Dönem

Marin Mersenne (1588-1648) Fransız bir keşiş, filozof, matematikçi ve müzik teorisyenidir. Galilo'nun diğer ülkelerde bilinmesi ve bilimin kendi döneminde yayılmasında katkısı çok büyüktür. Mersenne hem Galilo'yla hem de Kepler ve Descartes gibi bilim insanlarıyla irtibat halindeydi. Onların fikir ve düşüncelerinin birbirlerine iletilmesini ve tartışılmasını o sağlıyordu. O sıkıntılı zamanlarda kendisinin keşiş olması değişik ülkelere mektup gönderme işini kolaylaştırıyordu. Öklid, Apollonius ve Arşimed'in ve diğer bazı Yunanlı matematikçilerin çalışmalarını gözden geçirdi ve zamanına tercümesini yaptı.



Şekil 1.59 Marin Mersenne (1588-1648)

Şekil 1.60 Mersenne'nin 1648 yılında basılan akustikle ilgili kitabının kapağı

HARMONICORVM LIBRI XII

IN QVIBVS AGITVR
DE SONORVM NATVRA,
CAVSIS, ET EFFECTIBVS: DE CONSONANTIS,
DISSONANTIS, RATIONIBVS, GENERIBVS, MODIS, CAUSIS, COOR-
datione, ordine, et alijs huius Harmonicis Instrumentis.

Auctore F. M. MERSENNO Monacho.
M. D. C. LXXVIII. LVDVICO SEPTIMO HABSBVRGICO
ET REXIS.

Typis in officina Iohannis Baptistae, huiusmodi in officina
Clementis Spulerii, Impressor. PARISIIS, 1648.

EDITIO AVCTA.



CVRATA PARISIENSIVM.
Sumptibus GUILLELMI BAYOXY, vniuersitatis,
prope Collegium Pleiadem.

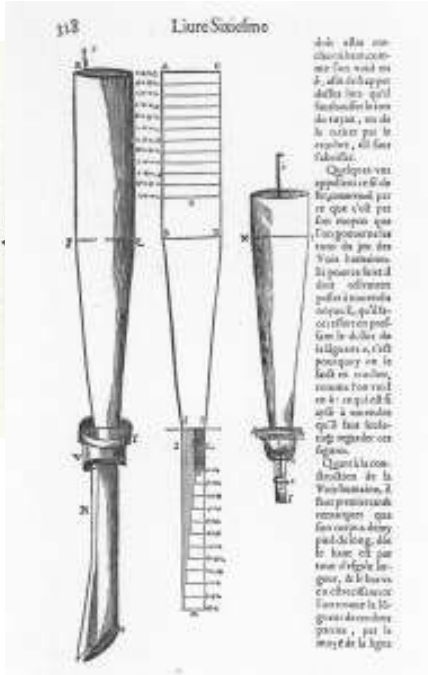
M. DC. LXXVIII.

Curavit et Typis Curavit et Typis Curavit.

Ayrıca müzik fiziğinin, müzik enstrümanlarının ve akustiğin gelişmesine önemli katkılarda bulundu. Bilimin Müslümanlardan Batı'ya transferinde, eski eserleri detaylı bir şekilde incelemesi ve bilgi birikimini gününe aktarması büyük bir hizmet olmuştur. Yaptığı detaylı deneyler ve onların mükemmel şekilde kayıt altına alması bilimsel birikim konusunda büyük fayda sağlamıştır. Keşiş olmasından dolayı hem mevcut bilgi birikimine kolayca ulaşabilmiş hem de yaptığı çalışmalar kendisinden sonra mükemmel şekilde koruma altında kalmıştır.

Mersenne tellerin titreşimi üzerine ilk detaylı yayımlanmış eseri bulunan bilim adamıdır. Zamanında pirinc tellerin ucuna princ ağırlık topları asarak deneyler yapmış ve sonuçları detaylı bir şekilde kaydetmiştir. Elde ettiği bu bilgileri 1636 yılında Harmonie Universelle eserinde yayınlamıştır. Kitabında; müsiğin teorisini ve uygulamalarını, sesin tabiatını ve sesin iletimini, harmoniklerini anlatmıştır. Titreşen telin özelliklerinde de bu kitabında detaylı olarak bahsetmiştir. Pisagor kuralını detaylı bir şekilde inceleyen Mersenne analizlerini detaylandırmıştır. Bilindiği gibi Pisagor kirisin üzerindeki gerilmeyi sabitleyerek köprünün yerini değiştirmiş

ve bu şekilde deneyler yapmıştı. Mersenne de telin boyunu (yani körünün yerini) sabit tutarak üzerindeki gerilmeleri değiştirmiştir ve aradaki ilintiyi elde etmeye çalışmıştır. Böyle bir durumda frekansı telin üzerindeki gerilmenin karekökü ile ilintilendirmiştir.



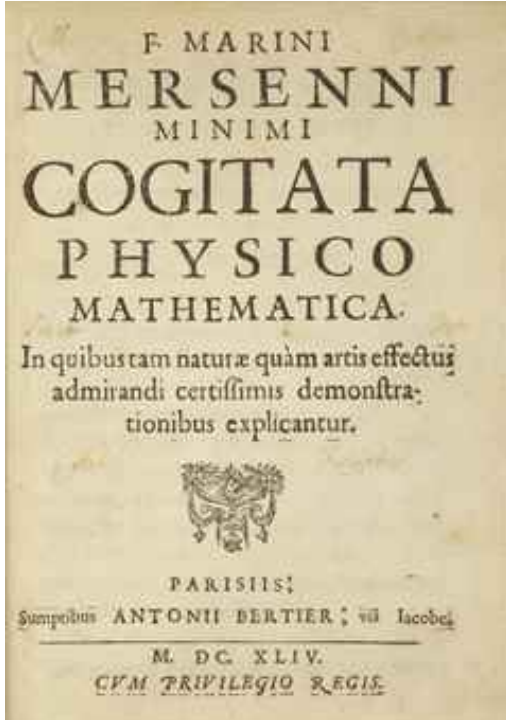
Şekil 1.61 Mersenne'nin onikili akord gösterimi

Mersenne'nin kitapları Latince olarak basılmıştır. Yandaki resimde onun 1648 tarihli *Harmonicorum Libri XII* başlıklı kitabı görülmektedir. Bu kapağın kabaca tercümesi: 'Harmonik Prensipleri İçeren 12 Kitap: Sesin Tabiatı; Sesin Nedeni ve Etkileri; Harmonikler; Oranlar; Tipler; Modlar; Şarkılar ve Kompozisyonlar; Dünyanın Harmonik Enstrümanları'

Mersenne'nin bu kitabından bir alıntı şeklinde 12 tonlu skalası görülmektedir. Bu skalayı Mersenne'nin çinli çağdaşlarından almış olduğu veya eş zamanlı olarak üzerinde geliştirme yaptığı konusunda bilgiler de mevcuttur.

Mersenne diğer yandan Galilo'nun düşen cisimlerin hareketini veren kanununu test ederek ispat etmeye çalışmıştır. 1634 yılında 147 feet (44.8 m), 108 feet (32.9 m) ve 48 feet (14.6 m) yükseklikten düşen cisimler için elde ettiği sonuçları yayımladı. Böylece Galilo'nun 1632'de yayınladığı *Dialogue* isimli eserinde

verdiği zamanın karesi kuralını deneysel verilerle desteklemiş oldu. Mersenne'nin bu deneyleri yaparken zamanı sarkacın salınımlarını sayarak yaptığı ve dolayısıyla sarkaç salınımlarının bu özelliğini bildiği belirtilmektedir. Yani kendisinden kısa süre sonra saati yapan Hugen'in bilgilerine Mersenne'nin de sahip olduğu iddia edilmektedir. Bu deneylerini 1644'de yayınladığı *Cogitata Physico-Mathematica* isimli eserinde anlatmaktadır.



Şekil 1.62 'Cogitata Physico-Mathematica' isimi kitabın ön yüzü

Mersenne hayatı boyunca birçok bilimsel potansiye sahip gendi de yönlendirmiştir. Özellikle Huygens için bir rol model oluşturmuştur. Mersenne, Huygens'in Müzik Teorisi isimli kitabı yazması için ona mektuplar yazarak onu teşvik etmiştir.

Marin Mersenne orgun icat edilmiş en mükemmel cihazlardan biri olduğunu düşünüyordu. Orgun Allah'ın yaratışına karşılık geldiği daha sonraları da bir akım olarak Batı dünyasını etkilemiştir. Batı'da özellikle belirli bir dönem içinde müziğe ilahi bir misyon yüklenmiştir. Belki bu da hem müziğin hem de müzik teorisinin gelişmesini netice vermiştir.

Yani org kainatın yaratıcısının yaratma vasıtası ve harmoninin kaynağı veya neticesi gibi algılanmıştır.

Mersenne'nin orgla ilgili deneyleri 1620'lere dayanmaktadır. Mersenne org borularının üretimini standartlaştırarak bütün

orgların aynı sesi üretmesini sağlamaya yönelik çalışmalar yapmıştır.

Mersenne boruların çapını sabit tutup boylarını değiştirerek ve daha sonra da boylarını sabit tutup çaplarını değiştirerek çok sayıda deney yapmıştır. Deneylerin sonuçlarını detaylı bir şekilde kayıt altına almıştır. Bu deneyler sonunda Mersenne universal bir org yapım boru tablosu oluşturdu. Bu tabloyu

oluştururken deneyleri, yapım ustalığını ve matematik denklemlerini birlikte kullandı. Yirmi yedi tuşlu org Mersenne tarafından icat edilmiştir ve kitabında detayları verilmiştir.

Mersenne sadece matematikçi değildi. Onun müzik teorisi ve diğer konularla ilgili eserleri de mevcuttur. Kendisi matematikçi olarak Öklid'in, Arşimed'in ve diğer Yunanlı matematikçilerin çalışmalarını geliştirmiştir. Bu arada büyük bir ihtimalle Müslüman bilimadamlarının Yunanlı bilimadamlarının eserlerine yaptıkları şerhler (açıklamalar ve geliştirmeler) de Mersenne'nin elinin altındaydı ve onlardan da yararlandı. Mersenne gibi bir bilimadamının bu konuda sessiz kalması manidardır.

Mersenne önceleri din ve felsefeyle ilgilenmiştir. Daha sonraki eserlerinde daha çok fiziğe, astronomi ve matematiğe ağırlık vermiştir. Bu kapsamda onun en bilinen çalışması 1636'da yayınladığı Harmonie Universelle'dir. Bu eserinde Mersenne müzik teorisi ve müzik aletlerinden bahsetmektedir. Bu eseri 17. yy'da Avrupa'da ve özellikle de Fransa'da müzik bilgi birikimi ve kullanılan müzik aletleri hakkında detaylı bilgi vermektedir.

Euler ve Jacop Bernoulli titreşen plakaları ve kabukları analitik olarak çözmeye çalışmışlardır. Euler elastik bir zarı (membranı) birbirine dik olarak gerilmiş iki tel şeklinde analitik olarak modelleyerek zar diferansiyel denklemini elde etmiştir. Jacop Bernoulli (1655-1705) ise birbirine dik iki elastik çubuk şeklinde bir modelleme ile bir elastik plakanın (plate) diferansiyel denklemini elde etmiştir. Euler çeşitli titreşim problemleri için küçük salınımlar ve süperpozisyon prensiblerinin doğrusal momentum kuralının direkt sonuçları olduğunu ve birbirinden bağımsız kabuller olmadığını gösterdi. Daha sonra Euler, Jacop Bernoulli'nin rotasyonel momentum prensibini daha da ilerleterek doğrusal momentumla birlikte mekaniğin temel kabullerini (axioms) ortaya koydu.

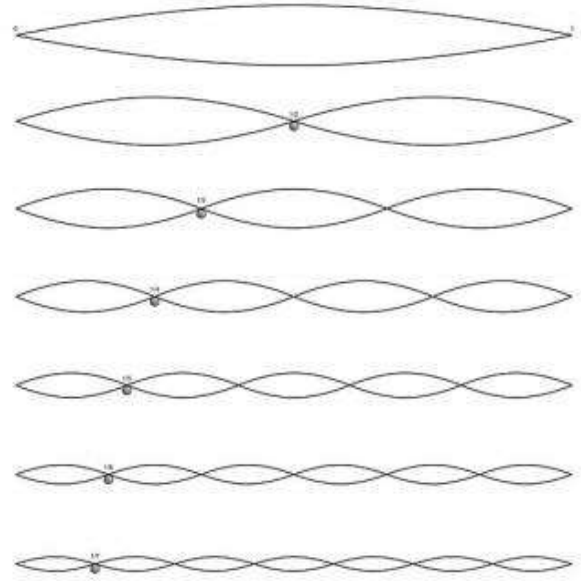
Chladi özelde ziller olmak üzere genelde plakaların ve kabukların davranışlarını daha da detaylı inceledi. Onun çalışmaları konuyu yoğun bir ilgi doğmasını sağladı. Chladi'nin deneylerini izleyen Napakon bu gösteriden çok etkilendi ve Fransız Akademisi'nin plakaların titreşimlerini bir ödül ve yarışma konusu olarak seçmesini sağladı. Sophie Germain'in (1775-1831) bir prosedürden ve anlaşmazlıktan sonra ödüle layık görüldü. Onun elde ettiği diferansiyel denklemlerin doğruluğu şüphe götürmüyordu fakat sınır şartlarının doğruluğu ve ispatı konusunda tartışma çıkmıştı. Bu çözüme Poisson ve Kirchhoff ilave katkılar ve geliştirmeler yaptılar. Fakat eğilmeye çalışan plakaların titreşimleri konusundaki tartışma teoriyi Navier (1785-1863) ortaya koydu. Daha sonra Navier genel denge denklemlerinin ve elastik katıların titreşimlerini inceledi. Navier küçük bir yer değiştirme için bütün kuvvetlerin yaptığı iş için geçerli ifadeyi elde etti ve varyasyon kalkulus'u yardımıyla hareket denklemini elde etti.

Şekil 1.74 Joseph Sauveur (1653-1716)



Bir diferansiyel denklemlerin çözümleri elastik katılar için Poisson ve titreşimlerin genel teorisini kuran Clebsch (1853-1872) tarafından da çalışılmış olmasına rağmen ince çucukların titreşim teorisi (özellikler burulma titreşimleri teorisi) elastik katıların genel titreşim teorisi adı altında Poisson tarafından ortaya konulmuştur.

Şekil 1.75 Bir Telin titreşim modları



Joseph Sauveur (1653-1716) Akustik teriminin temelini oluşturanlardandır. Titreşimlerin harmoniklerden oluştuğunu keşfetmiştir.

Joseph Sauveur 1653'ün Mart ayında doğdu. Doğuştan işitme engelli idi. Sauveur yedi yaşına kadar konuşamadı. Bundan sonra da konuşması çok zor anlaşılıyordu. Bu sessizlik onu matematikle arkadaş yaptı. Matematik sevgisi onu College Royal'de öğretmen yaptı. Sauveur akustikle ilgilenmeye

başladı. Sauveur'un asistanı onun yerine seleri dinlemeye ve ona anlatmaya başladı. O sesleri oluşturan titreşimleri incelemeye başladı ve titreşen telin kütle sinin telin frekansını da belirlediğini gördü. Bu müzik aleti yapımcıları için çok önemliydi çünkü değişik maddelerden aynı frekansını veren teller yapmak bu sayede mümkün oldu. Böylece piyanoların aynı kalitede ses ve müzik üretmesi mümkün oldu. Sauveur harmonikler, temel harmonik, node gibi kelimeleri ilk kullanan kimsedir. Akustik biliminin öncüsü ve kurucusu olarak kabul edilir. Fakat daha önceki kısımlarda bahsedildiği gibi bu çalışmaların bazıları çok daha önceleri Müslüman bilim adamları tarafından yapılmıştı.



Şekil 1.79 Ernst Florens Friedrich Chladni (1756-1827)

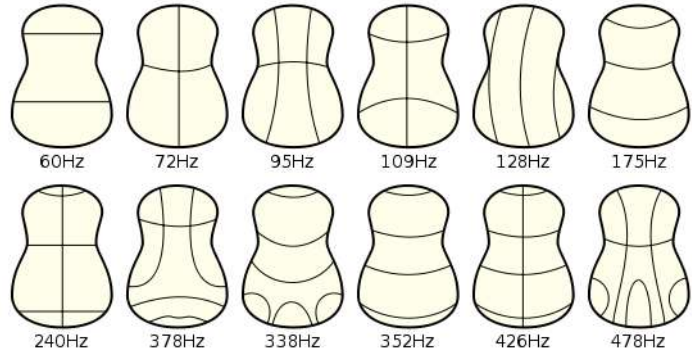
Ernst Florens Friedrich Chladni (1756–1827) Alman fizikçi ve müzisyendir. Onun en bilinen çalışması plakaların titreşimleri ve değişik gazlar için ses hızının hesaplanmasıdır. Bu nedenle bazı bilim tarihçileri onu Akustiğin Babası olarak adlandırırlar.

Chladni Almanya'da doğmuş olmasına rağmen ailesi Merkezi Slovanya'nın bir maden şehri olan Kremnica'dan gelmişlerdir. Şehir o zamanlar Maceristan İmparatorluğu'nun bir parçası idi. Bu nedenle Chladni, Alman, Macar ve Slovak olarak anılır. Zaten tarih böyle başarılı insanın paylaşamadığını göstermiştir.

Chladni'nin dedesi ve dedesinin babası, amcaları da tarihte bilinen meşhur profesörlerdir. Fakat onların tamamına yakını teoloji, hukuk gibi zamanın beğenilen konularda başarı gösterirken Friedrich'in bilimle uğraşması babasını çok üzmüştür. Bu nedenle Friedrich, Wittenberg'de ve Leipzig'de hukuk okumuştur. 1782'de babası öldükten sonra Chladni tekrar bilim çalışmalarına dönmüştür.

Chladni'nin en fazla bilinen başarısı rijit bir yüzeyin titreşim nodlarını gösterme tekniğini bulmasıdır. Resonans frekanslarından birinde titreşen plaka veya zarf araları sınır çizgileriyle ayrılmış (node) bölümler halinde titreşmektedir.

Chladni bu konudaki öncü Robert Hooke (Oxford University'in deneyleri 1680 de tekrar etti. Deneylerde cam plakalar kullanan Chladni onun üzerine un serperek nodal noktaları görüntüledi. Bu teknik ilk olarak 1787'de Ses Teorisinde Buluşlar (*Entdeckungen über die Theorie des Klanges*) isimli kitabında yayınladı. Bu tekniğin değişik versiyonları halen müzik aletlerinin imalatında kullanılmaktadır. Özellikle Violin, gitar ve çello üretiminde eski ustalar bu teknikten vazgeçmezler. Her ne kadar şu anda elektrik sinyal jeneratörleri ve hopörler veya ivme ölçer kullanımı da yaygınlaşmış olsa da eski teknikler halen kullanılmaktadır.



Şekil 1.80 Chladni modes of a guitar plate

Şekil 1.81 Jean Baptiste Joseph Fourier

Jean Baptiste Joseph Fourier, (1768-1830), Fransız matematikçi ve fizikçi.

Bir terzinin oğlu olarak dünyaya gelen Jean Bapliste Joseph Fourier, henüz dokuz yaşındayken hem annesini ve hem de babasını yitirince Auxerre'deki askeri okula gönderildi. Fourier kendisini bu okulda çok iyi bir şekilde yetiştirdi. On iki yaşındayken yazdığı dini yazıları, Paris kiliselerinde okunuyor ve benimseniyordu. Güç beğenen, titiz, inatçı, hırçın, sert bir karakteri vardı. Fourier, Saint-Benoit manastırına gitti. Subay olmayı istemesine karşın terzi oğluna subaylık diploması verilmediğinden, askeri papaz olmayı seçmişti. Eski arkadaşları Fourier'yi Auxerre'e



çağırıldılar ve onu matematik öğretmeni olması yönünde ikna ettiler. 1789'da ihtilal patlak verdiğiğinde yirmi bir yaşında idi ve denklemlerin sayısal çözümüne ait bir çalışmayı Akademiye sunuyordu.

Fourier, Ecole Normale'in matematik kürsüsüne öğretmen olarak atandı. Fourier, 1787 ile 1794 yıllarını orta dereceli okullarda öğretmenlik yaparak geçirdi. Fransız devrimi sırasında önemli görevler aldı. 1794'de bir ara hapse girdi. Hapisten çıktıktan sonra, Ecole Normale'de ve École Polytechnique'te matematik öğretmenliği yaptı. Denklemler kuramı ve uygulamalı matematikte bazı araştırmalarda bulundu. Fourier serilerini ve Fourier analizini oluşturdu.

1798 yılında Napolyon Mısır'a giderken, Fourier'yi de yanına aldı ve onu bilim heyetinin başına atadı. Yukarı Mısır'da araştırma yapma, kayıtları, yazıları inceleme ve tapınaklarda araştırma yapmalarını istedi. 1801 yılında Mısır'dan Fransa'ya dönen Fourier'ye Napolyon tarafından yöneticilik görevleri verildi. 1803 yılında Baron unvanını aldı. Isı taşınımının matematiksel esasları üzerine araştırmalar yaptı. En önemli çalışması "*Isının Analitik Kuramı*" adlı yapıtıdır. Bu yapıtı 1807 yılında Akademiye sundu. Eser çok tartışıldı ve beğenilmedi. 1812 yılındaki ödül için başka bir çalışma sunması istendi. Fourier bu ödülü aldı. Fakat daha önce sunduğu çalışmasının dönmesine çok kırıldı. Onun tartışmasız olan eseri, halen yaşayan Fourier analizidir. 1807 yılında kaleme aldığı eseri nihayet 1822 yılında yayımlandı. Fourier'nin ısı iletimi konusundaki araştırmalarının, fizik ve matematiğin gelişimine büyük katkıları olmuştur.

İktidarların sürekli el değiştirmesi ve karşılıklı ihtilaller Fourier'yi güç durumlara soktu. Bu çalkantılı dönemlerden sonra eşyalarını rehine verecek kadar kötü durumlara düştü. İstatistik Bürosuna müdür olarak atandı. 1816 yılında Akademiye üye seçilmesine hükümet karşı koydu. Ancak ertesi yıl üye seçilebildi.

16 Mayıs 1830'da bir kalp hastalığından (bazılarına göre de damar çatlamasından) öldü.

Akustik bilimi konusundaki ilk kitap John William Strutt (*Lord Rayleigh*, 1842 -1919) tarafından 1894 yılında kaleme alındı.

Çocukluğu ve gençliğinde zayıf bir beden yapısı vardı. Eğitimi sürekli hastalıklarla kesildi. Erişkinliğe erişebilmesi zor gibi görünüyordu. Eton'da 10 yaşındayken kısa bir süre geçirip sonra, üç yıl Wimbledon'da özel bir okulda okudu. Biraz Harrow'da kalıp, sonraki dört yılını George Townsend Warner ile geçirdi.

1861'de Cambridge Trinity College'e matematik okumak için girdi. Başlangıçta yaşlılarıyla aynı başarıyı elde edemediyse de, daha sonra özel yetenekleri sayesinde rakiplerini geçti. 1865'te Mathematical Tripos'dan mezun oldu. 1866 yılında 1871'e kadar sürdüreceği Trinity üyesi oldu. 1872'de romatizmal ağrıları yüzünden kışı Mısır ve Yunanistan'da geçirdi. Döndükten kısa bir süre 1873'de babası öldü.

Şekil 1.115 Lord Rayleigh

John William Strutt, 3. Lord Rayleigh Baronluk rütbesi aldı. Daha sonra ailesinin oturduğu, Witham, Essex'deki Terling Place'a yerleşti. Burdaki zamanının bir kısmında arazilerinin bakımıyla ilgilenmek zorunda kaldı. Bilimsel kültürü, tarımdaki bilgisi ve hızlı kavrama yeteneği sayesinde tarla işlerinde çok deneyim kazandı. Ancak 1876 yılında arazi işlerini küçük kardeşine bıraktı ve bütün zamanını bilime ayırdı.

1879'da, deneysel fizik profesörü ve Cavendish Laboratuvarı başkanı James Clerk Maxwell'in asistanı olarak atandı. 1884'te Essex'de deneysel çalışmalarını sürdürmek için Cambridge'den ayrıldı. 1887'den 1905'e kadar Royal Institution of Great Britain'de felsefe profesörü olarak çalıştı. Daha sonra altı yıl Government Committee on Explosives'e başkanlık yaptı.

John William Strutt Rayleigh'in ilk bilimsel çalışmaları optikle ilgi matematik konuları üzerineydi. Fakat daha sonraki çalışmaları fiziğin bütün alanlarını kapsadı. Bunlar arasında ses, dalga teorisi, renk görünümü, elektrodinamik, elektromagnetizm, ışığın yayılımı, sıvı akışkanlığı, hidrodinamik, gazların yoğunluğu, viscosity, esneklik ve fotoğrafçılık sayılabilir. Sabırlı ve duyarlı deneyleri ile direnç akım ve elektromotive kuvveti'nin standartlarını belirledi. Sonraki çalışmalarını ise elektrik ve manyetizma üzerine yoğunlaştırdı.

Rayleigh çok iyi bir eğitmendi. Etkili danışmanlığı ile Cambridge'de deneysel fiziğin sistematik kuralları geliştirildi. "Theory of Sound" adlı yayımı 1877-1878 yıllarında iki cilt olarak yayımlandı. Diğer çalışmaları 1889-1920 yıllarında basılan altı ciltlik bilimsel yayımlarda basıldı. Ayrıca Britannica Ansiklopedisi'ne katkıda bulundu. Yayınlarında anlaşılması güç konularda bile akıcı bir dili vardı. Telafuzuyla yalınlık ve sadelikte bir model olarak gösterilir.

Rayleigh, Royal Society'nin bir üyesiydi. 1885'den 1896'ya kadar sekreteryaya görevini yürüttü. 1905-1908 yılları arasında ise başkanlığını yaptı. 1902'de Order of Merit sahibi oldu. Royal Society'nin Copley, Royal, ve Rumford Madalyaları ile ödüllendirildi.

John William Strutt babası Terling Place'ın ikinci Baronu idi. Annesi ise Clara Elizabeth Latouche Vicars'dır. Esasında Rayleigh'nin ailesi tarımla uğraşan insanlar olduğundan bilime bir ilgileri yoktu. Aileden bir istisna Robert Boyle idi.

Rayleigh çocuk yaşlarda sağlık problemleri nedeniyle hem Eton'da hem de Harrow'da eğitimine ara vermek mecburiyetinde kalmıştır. Her iki okulu da başladıktan kısa bir süre sonra terketmek zorunda kalmıştır. Daha sonra Reverend Warner yatılı okulunda geçen 4 sene onu üniversite hayatı için hazırlamıştır. Bu okulda onun matematik konusundaki kabiliyetleri görülmeye başlamıştır. Bu dört yıl boyunca kendisine özel dersler veren bir hocası da olmasına rağmen ortalama bir öğrencisinin başarısından daha fazla bir başarı gösterememiştir.

1861 yılında Cambridge Trinity College üniversitesine girdi ve orada matematik sınavında başarı gösterdi (Cambridge Mathematical Tripos). Bu sınav o dönemde bilinen en zorlu sınavlarda biriydi. Bu



sınavlardaki en meşhur hoca ise Edward John Routh (1831-1907) idi. Edward Routh matematiği dinamiğe uyarlayan önemli bir matematikçiydi ve Rayleigh'nin matematik danışmanlığını yapmıştır.. Aynı zamanda dinamik sistemlerin analizi ve kararlılığı üzerine çalışmalarıyla da meşhur olmuştur. Routh-Hurwitz teorisi onun makine mühendisliğine büyük katkısıdır.

Rayleigh'nin Routh'dan öğrenmiş olduğu harika matematik teknikleri onun daha sonraki akademik hayatında ve yaptığı çalışmalarda kendisine çok büyük kolaylık sağlamıştır. Ayrıca harika bir dinamikçi olan Routh, Rayleigh'ye hangi tür problemlere hangi tür matematik yaklaşımları nasıl uygulayacağı konusunda da önemli ipuçları vermiştir.

Burada önemli bir hususa daha dikkat çekmek gerekir. Rayleigh Cambridge'e geldiğinde oradaki meşhur üçleme henüz hayattaydı. Bunlar Sir Stokes, Lord Kelvin ve Maxwell idi. Matematik sınavlarında da Routh Maxwell'in biraz üzerinde bir başarı göstermişti.

Rayleigh, Cavendish laboratuvarlarının kurulmasını görmüş olmanın yanında o dönemde matematikle uygulamayı en iyi destekleyen bilimadamlarından olan Sir Stokes'un vermiş olduğu derslerden de çok etkilenmiştir. Bilimin deneyle desteklenmesi gerektiği Stokes'un ışık deneylerinden sonra Rayleigh'nin dimağına adeta kazınmıştır. Bununla birlikte Stokes'un Rayleigh'yi akademik kariyer yapma konusunda cesaretlendirdiğiyle ilgili bir bilgiye rastlanmamıştır.

Her ne kadar Rayleigh ilk ve orta öğretimde sıradan bir öğrenci olsa bile üniversitede onun çok başarılı bir öğrenci olduğunu görüyoruz. 1864 yılında kendisine Astronomi Bursu verilmiş ve 1865 yılında girdiği Cambridge Mathematical Tripos sınavında Senior Wrangler (En Üst Sınıf Başarılı) olmuştur. Aynı yıl kendisine Smith's Prizeman ödülü verilmiştir. Bu üstün başarılar kendisini bir çıkmaza sokmuştu. Çünkü kendisi yakın bir gelecekte Üçüncü Baron Rayleigh olacaktı ve onun ailesinde ve çevresinde bilimsel bir kariyer tasvip görmeyen birşeydi. Fakat Rayleigh bu tür bilimsel çalışmaları çok seviyordu ve hayatını bilime adamaya karar vermişti. Rayleigh'nin Baronluk sosyal sorumluluğu engelini aşmak konusunda kararlı olduğu daha sonra görülmüştür.

Onun 1865 yılında yazmış olduğu elektromanyetik teori konusundaki ilk akademik makalesinde onun Maxwell'den etkilendiğini görmek mümkündür. Rayleigh o zamana kadar yapılmış araştırmaları inceleyerek kendisine çalışacak fazla incelenmemiş bir alan bulmak üzere araştırmalar ve okumalar yapmaya başladı. O dönemde çalışmalarını dikkatle okuduğu ve etkilendiği birdiğer bilimadamı Helmholtz'tur ve onun 1860 yılındaki yayınladığı çalışması meşhur akustik rezonatördür. Rayleigh 1866 yılında Cambridge Trinity College'e Fellow olarak seçilmiştir ve artık bilime katkı yapmaya hazırdır.

Onun döneminde onun statüsündeki genç İngilizlerin o dönemde yaptığı önemli bir olay büyük Avrupa turu yapmaktı. Rayleigh o zamana göre normal olmayan bir karar verdi ve ABD'ye seyahat etmeye karar verdi. Rayleigh'nin önemli bir avantajı böyle bir seyahatı yapmak için akademik bir kürsü kazanmaya ihtiyaç duymadan rahatlıkla ABD'ye gidebilecek olmasıydı. Amerikadan dönünce Rayleigh deney yapmak için kendi sistemlerini satın alıp bunları Terling'deki evine kurdurdu. Galvanometre üzerinde yapmış olduğu deneylerin sonuçlarını British Association'ın Norwich buluşmasında 1868 yılında sundu.

Gökyüzünün neden mavi olduğunu ilk defa doğru olarak açıklayan Rayleigh'nin saçılım teorisi 1871 yılında basıldı. Aynı yıl Rayleigh, Muhafazakar Parti'nin önemli bir politikacısı olan daha sonra İngiltere'nin başbakanlığını yapacak olan Arthur James Balfour'un kızkardeşi olan Evelyn Balfour ile evlendi. Hem Arthur'la hem de onun kızkardeşiyle Cambridge'de öğrencilik yıllarında tanışmışlardı. Evliliğinden kısa bir süre sonra bütün vücudunu şiddetli bir şekilde etkileyen ve neredeyse onun akademik çalışmalarını erken bir sona getirecek olan romatizmal bir enfeksiyon geçirdi. Onun sıcak havaya ihtiyacı olduğu ve Mısır'a gitmesinin yerinde olacağı tavsiyesine uyarak eşiyile birlikte Mısır'a

gitti. 1872 yılının sonbaharında ve 1873 yılının ilkbaharında Nil boyunca seyahatlere katıldı. Vücudu kendine gelen Rayleigh 1873 yılının yazına doğru İngiltere'ye geri döndü.

Bu seyahat bir taraftan onun sağlığına kavuşmasını sağlamış, diğer taraftan da akademik olarak onun meşhur kitabı Ses Teorisi (Theory of Sound)'i yazmaya başlamasına vesile olmuştur. Bu başlangıçtan beş yıl sonra onun daha sonra klasik haline gelen eseri kitap halinde basıldı. Birinci cildi sesi oluşturan titreşen ortamların mekaniği konusunda 1877 yılında basıldı. Akustik ses iletimini inceleyen ikinci cilt ise bir sene sonra 1878 yılında basılmıştır.

Nil seyahatinden döndükten kısa bir süre sonra Rayleigh'nin babası öldü ve o zamanki ismiyle Strutt, Üçüncü Baron Rayleigh oldu. Baron olarak yaşadığı Terling'de kurdumuş olduğu laboratuvarında çalışmalarına devam etti.

Bu laboratuvarında Rayleigh'nin önemli başarılarına imza atan çalışmalar yapması onun zengin olduğu için başkalarının alamadığı pahalı ve değerli deney aletlerine sahip olduğu için böyle başarılı çalışmalar yaptığı şeklinde algılanmamalıdır. Düşünüldüğünün aksine o bu başarılı deneylerini gayet ucuz aletlerle yapmıştır. Deneylerinde sürekli ekonomik olmayı yeğleyen Rayleigh karmaşık olmayan basit deney aletleri kullanmıştır. Üstelik Baron Rayleigh düşünüldüğü kadar zengin değildi, çünkü 1870li yıllar İngiliz çiftçileri için oldukça sıkıntılı olmuştur.

1879 yılında 1884 yılına kadar Rayleigh Cambridge Deneysel Fizik İkinci Cavendish Profesörü olmuştur. Laboratuvar Stokes'un öncülüğünde beş yıl önce açılmıştı ve ilk profesörü Maxwell olmuştur. Rayleigh bu pozisyonu çok ciddiye almış ve deneysel çalışmalar konusunda önemli yenilikler ve gelişmeler uygulamıştır.

Daha önce de belirtildiği gibi o lisans eğitimini yaparken çok iyi olmayan deneysel fizik konusunda değişiklikler ve yenilikler yapmak gerekiyordu. Rayleigh herşeye yaklaştığı o enerjetik tavrıyla ısıda elektrikte, magnetizma malzemenin özellikleri, optik ve akustik konularında ders notları hazırladı.

Cavendish profesörü olduğu dönemde yaptığı önemli bir deney de ohm'un standartlaştırılması deneyidir. Daha önce Maxwell ve Cristal'in deneylerini yapmış oldukları aletler hala laboratuvarında duruyordu. Fakat bu eski aletler Rayleigh'nin istediği hassasiyette ölçüm yapmadığı için Rayleigh yeni aletler tasarladı ve imal ettirdi. Montreal'de 1884 yılında düzenlenen British Association'ın toplantısının Başkan konuşması kısmında elde ettiği sonuçları sundu.

1884 yılında Cambridge Üniversitesi'ndeki kürsüsünden istifa ederek Terling'deki evindeki çalışma ofisine döndü. Şimdi ekonomik durumu iyileşmişti ve üniversitedeki yönetim faaliyetleri yerine bilimsel çalışmalarda bulunmak onun daha fazla hoşuna gidiyordu. Birçok meslektaşı onu kararından vazgeçirmeye çalışmalarına rağmen başarılı olamadılar çünkü Rayleigh hayattan ne istediğini biliyordu. O tamamen bilimsel faaliyetlerde bulunuyordu, ara sıra da Londra'ya giderek orada da bilimsel faaliyetlerde bulunuyordu. Rayleigh 1873 yılında Royal Society'nin Fellow'u olarak seçilmişti. 1882 yılında Royal Society'den Royal Madalyası almış ve 1885 yılında da Royal Society'nin Sekreteri olmuştu. 1899 yılında Royal Society'nin Copley Madalyasını yine Lord Rayleigh almıştı. 1902 yılında Royal Society'nin Bakerian Lecture'ını verdi ve 1905 yılında Royal Society'ye başkan olarak seçildi. Rayleigh'nin başkanlığı 1908 yılına kadar devam etti. Ayrıca Rayleigh 1876-1878 yılları arasında Londra Matematik Topluluğu'nun başkanlığını da yapmıştır. Topluluğun De Morgan Madalyasını 1890 yılında Rayleigh'ye vermişlerdir. Bunlara ilave olarak Rayleigh 1887 yılında Royal Institution'da Tabiat Fesefesi Profesörü olmuştur. 1908 yılında ise Cambridge Üniversitesi'nin rektörlüğü görevine layık görülmüştür.

BÖLÜM II: DALGA NEDİR?

DALGANIN TANIMI

Dalga bir fizik terimi olarak, uzay veya uzay zamanda yayılan ve sıklıkla enerjinin taşınmasına yol açan titreşime verilen isimdir. Bununla birlikte günlük dilde farklı anlamlarda kullanılmaktadır. Ayrıca denizlerde oluşan bir su vuruntusudur. Dalgalar bir yerden başka bir yere uzanırlar. Titreşimleri, periyodik (bir kemandaki nota sesi gibi) olabileceği gibi periyodik olamayabilir (bir patlama sesi gibi). Bütün dalgalar şu özelliklere sahiptirler:

- Salınımın şiddeti genliktir.
- Salınım ne kadar sıklıkla olduğu frekanstır.
- Dalganın maksimumları arasında gittiği mesafe dalga boyudur.

Dalgalar bir materyalde belirlenmiş bir hızda gittiklerinden, dalga frekansını arttırdığınızda, dalga boyu azalır. Matematiksel olarak,

$$\text{dalga hızı} = (\text{frekans}) \times (\text{dalga boyu})$$

Yani sabit dalga hızı için, frekans ve dalga boyu ters orantılıdır. Dalgaların en ilginç özelliklerinden birisi, iki dalganın birbirinin içinden geçerken etkilerinin birleşmesidir. Bu olaya **girişim** denir.

Dalga Boyu: Lamda sembolüyle ifade edilir. İki dalga tepesi veya dalga çukuru arasındaki mesafedir.

Periyot: Dalganın bir dalga boyu kadar yol alması için geçen süreye denir.

Frekans: Dalganın 1 saniyede aldığı yola denir.



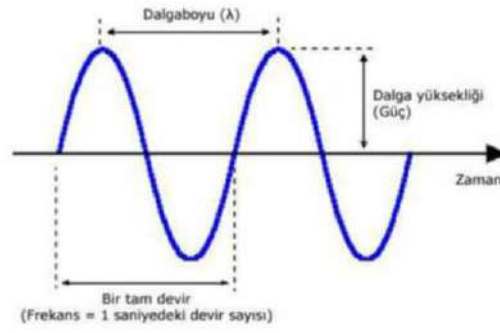
Su yüzeyindeki dalgaları gösteren bir resim

Ref: <http://tr.wikipedia.org/wiki/Dalga>

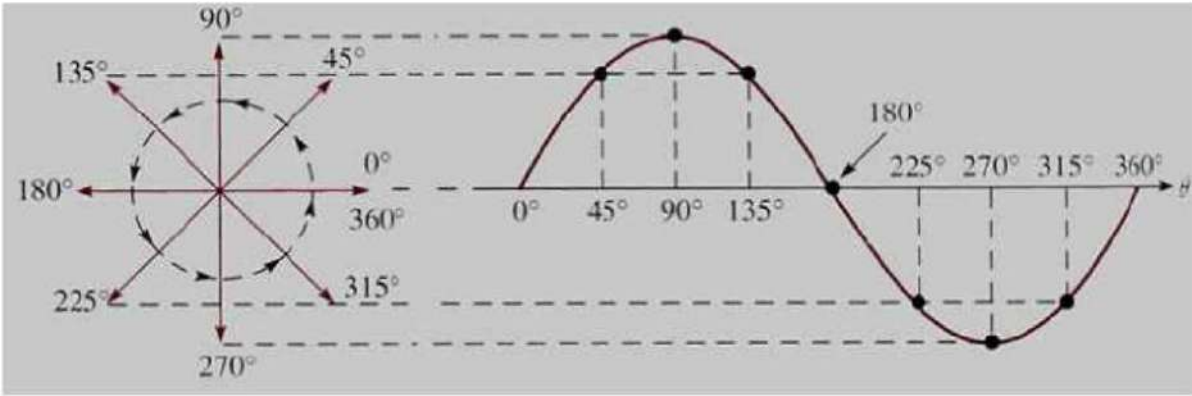
NOT: <http://en.wikipedia.org/wiki/Wave> sayfasında çok geniş bilgi var.

SİNÜSOİDAL BİR DALGANIN VEKTOREL GÖSTERİLİŞİ

Büyüklikler genellikle, skalar ve vektörel büyüklüklerdir. Yalnız genliği olan büyüklükler skalardır. Kütle, enerji ve sıcaklık derecesi gibi değerleri gösteren büyüklükler skalardır ve bunlar cebirsel olarak toplanabilirler. Genliği, doğrultusu ve yönü olan büyüklük vektörel bir değer skalar büyüklükleri ihtiva eder.



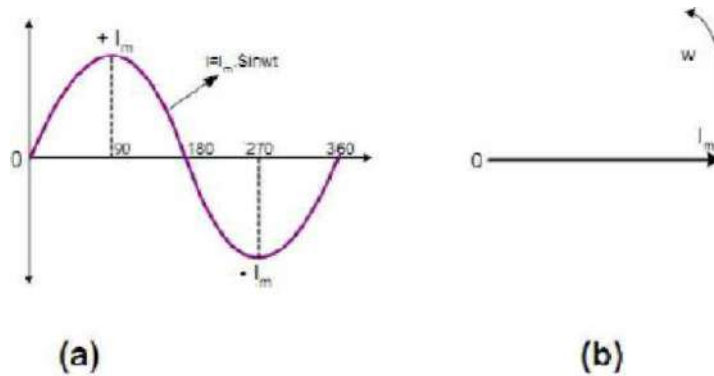
Sekil 1.7.'de görülen B vektörünün, saat ibresinin ters yönünde ω (omega) açısal hızı ile döndüğünü kabul edelim. Herhangi bir t anında, B vektörünün katettiği açı $a = \omega \cdot t$ dir. B vektörünün dik bileşeni (Y eksenindeki bileşeni) $B \cdot \sin a$ veya $B \cdot \sin \omega t$ dir. Değişik zamanlardaki B vektörünün durumunu gösteren kat ettiği açılar X ekseninde alındıktan sonra vektörün bu anlardaki düşey bileşenleri taşındığında sekil.7 (b)deki sinüs eğrisi elde edilir. Sinüs eğrisinin maksimum değeri, B vektörünün genliğine (boyuna) eşittir Şu halde bir sinüs eğrisi, ω açısal hızı ile dönen ve genliği sinüs eğrisinin maksimum değerine eşit olan bir vektörle gösterilebilir.



(a)

(b)

Şekil 1.7 Dönen vektörün oluşturduğu sinüs eğrisi



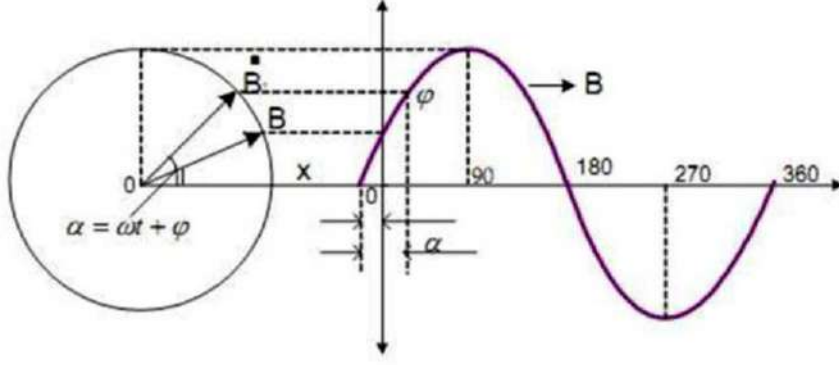
(a)

(b)

Şekil1,8 Sinüzoidal akım ve vektörel gösterimi

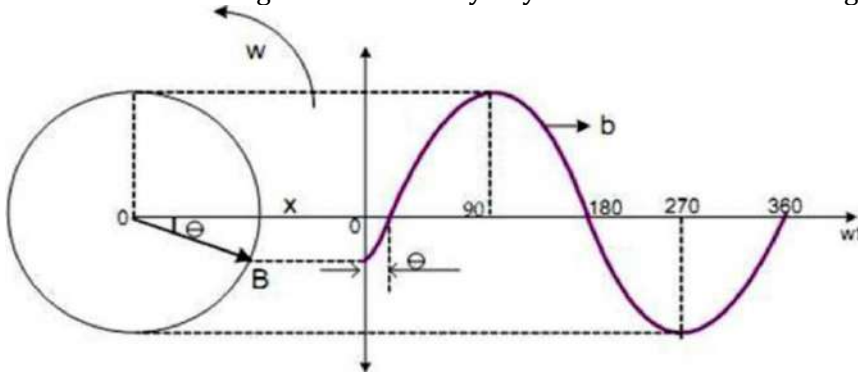
Dönen B vektörünün $t=0$ anında X eksenini (referans eksenini) ile açısını yaptığını kabul edelim. Vektörün herhangi bir t anında X eksenini yaptığı açı a' dır. Bu andaki vektörün düşey bileşeni $B \cdot \sin(\omega t + \theta)$ olur. $t=0$ anında düşey ($B \sin \theta$) olduğundan, B vektörü saat ibresine ters yönde

ω açısal hızı ile döndüğünde çizeceği sinüs eğrisi, sıfır değerinden değil ($B \cdot \sin\theta$) gibi bir değerden başlar. Sekili.10 deki sinüs eğrisinin herhangi bir andaki değeri ile $b=B \cdot \sin(\omega t + \theta)$ ifade edilebilir.



Şekil.10

X ekseninden 6 kadar geride olan B vektörünün w açısal hızı ile saat ibresinin ters yönünde dönmesi ile çizeceği sinüs eğrisi Sekili.11 de görülüyor. Sinüs eğrisi $t=0$ anında ($A \cdot \sin \theta$) gibi negatif bir değerden başlar. Bir zaman sonra $\omega t = \theta$ olduğunda B vektörü yatay referans eksenine üzerine gelir.

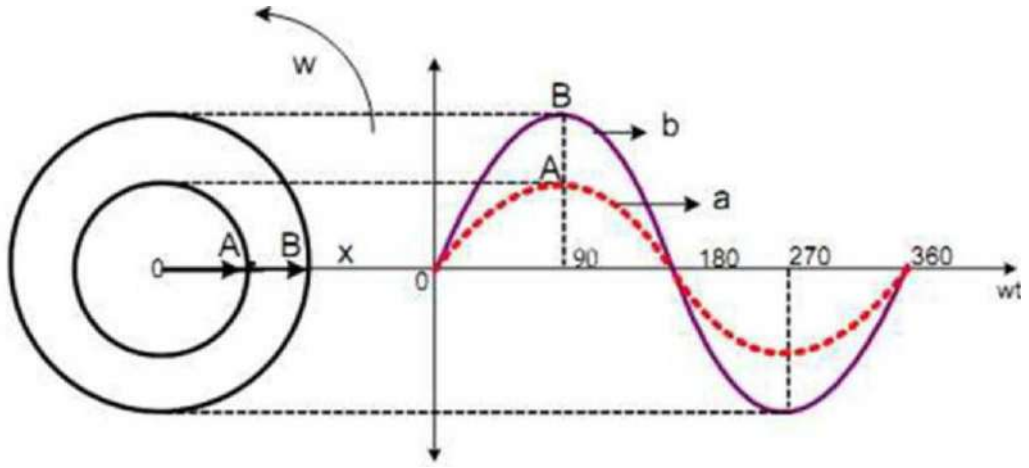


Şekil.11

A vektörünün düşey bileşeni sıfır olur. bu anda eğri de sıfırdır, t anında, B vektörünün X eksenine yaptığı açı ($a = \theta$) olur. Sinüs eğrisinin herhangi bir andaki değeri,

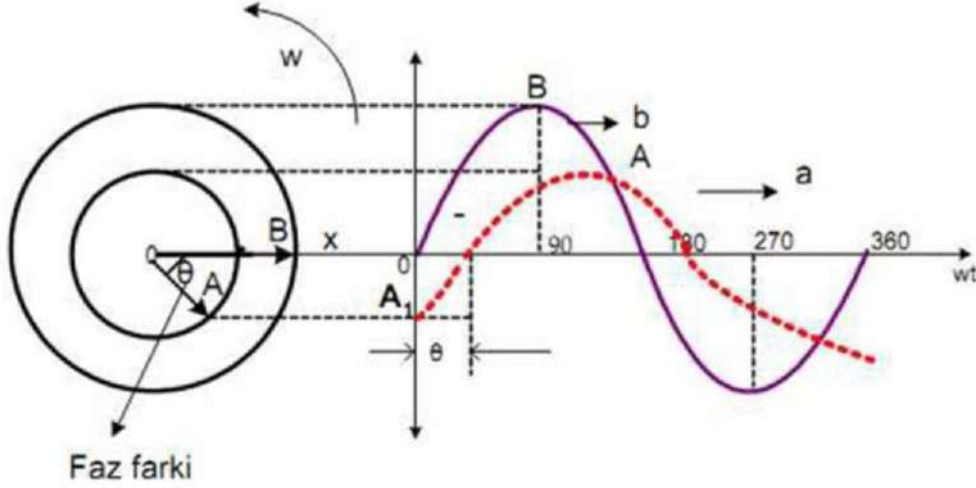
$b=B \cdot \sin(\omega t - \theta)$ ile ifade edilir.

X ekseninde bulunan genlikleri farklı A ve B vektörleri, w açısal hızı ile saat ibresinin ters yönünde döndürüldüklerinde çizecekleri sinüs eğrileri sekili.12 de görülüyor. Bu iki sinüs eğrisi, aynı anda sıfır ve aynı anda maksimum değerlerini alırlar. Sadece genlikleri farklıdır.



Şekil . 12 Aynı fazlı iki vektörün sinüs eğrisi

X eksenini üzerindeki B vektörü ve θ kadar geride A vektörü ω açısal hızı ile döndürüldüğünde çizceklere sinüs eğrileri şekli.13 görüldüğü gibi olur.

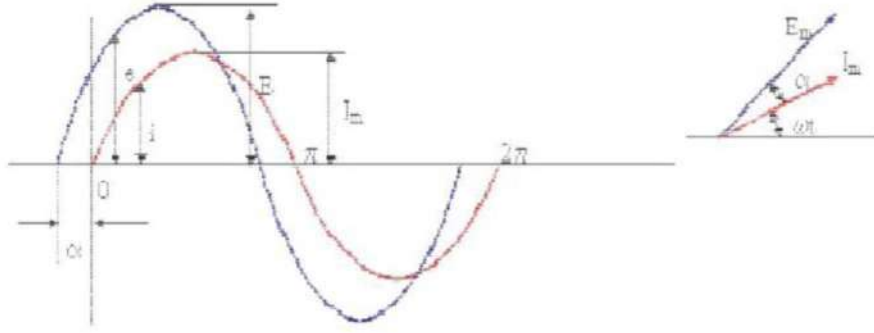


Şekil1.13 Aralarında θ açısı olan iki vektörün sinüs eğrisi

B eğrisi sıfır değerinden başladığı halde, A eğrisi $(-A_1)$ değerinden başlar, θ° kadar sonra A eğrisi sıfır değerini alır. B (+) maksimum değerini aldıktan sonra da A (+) maksimum değerini aldıktan θ kadar sonra A (+) maksimum değerine ulaşır. B ve A eğrileri şu şekilde ifade edilir.

$$b = B \cdot \sin \omega t \quad a = A \cdot \sin(\omega t - \theta)$$

Ref: <http://www.meslekidenetinn.com/e-kitap/alternatifakimesaslari.pdf>



Şekil 2. Aynı frekanslı iki sinüs değişkeninin grafiksel ve vektörel olarak gösterilmesi.

Ref:<http://bilimselkonular.com/index.php/elektronik/2225-alternatif-buevueklueklern-vekteoerel-goesterlmes-.html>

HARMONİK TİTREŞİMLERİN BİRLEŞTİRİLMESİ

Not: <http://tr.wikipedia.org/wiki/Titresim> sayfasında güzel bilgiler var.

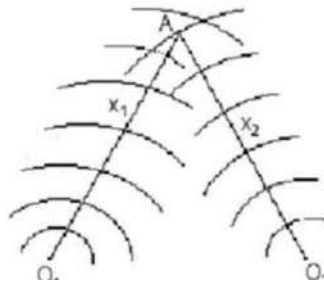
Harmonik fonksiyonlar vektörel olarak toplanabilirler, (ref: Titreşim Mühendisliğine giriş; Den Hartog chapter 1; page: 50-51)

GİRİŞİM OLAYI

Aynı cinsten iki ayrı dalganın etkisi altında kalan bir taneciğin yaptığı bileşik harekete girişim denir. Yine bu olay su dalgalarında incelensin. Aynı doğrultuda hareket eden, aynı frekansda titreşen ve her an aynı fazda olan (veya aralarında sabit bir faz farkı bulunan) iki kaynağa koherent kaynaklar denir. Bu kaynaklardan yayılan dalgalara da koherent dalgalar denir. Şekil 10.10'da görüldüğü gibi kaynaklar koherent olsun. Ortamın herhangi bir A noktasından 01 kaynağına uzaklık x_1 , 02 kaynağına uzaklık x_2 olsun, n bir tam sayı olmak üzere yol farkı ($\Delta x = x_2 - x_1$),

$\Delta x = n\lambda$ ise A noktası maksimum genlikle,

$\Delta x = (2n+1)\lambda/2$ ise A noktası minimum genlikle titreşir.



Şekil 10.10 Girişim olayı (Şeklin karışmaması için dairesel dalgaların tümü çizilmemiştir).

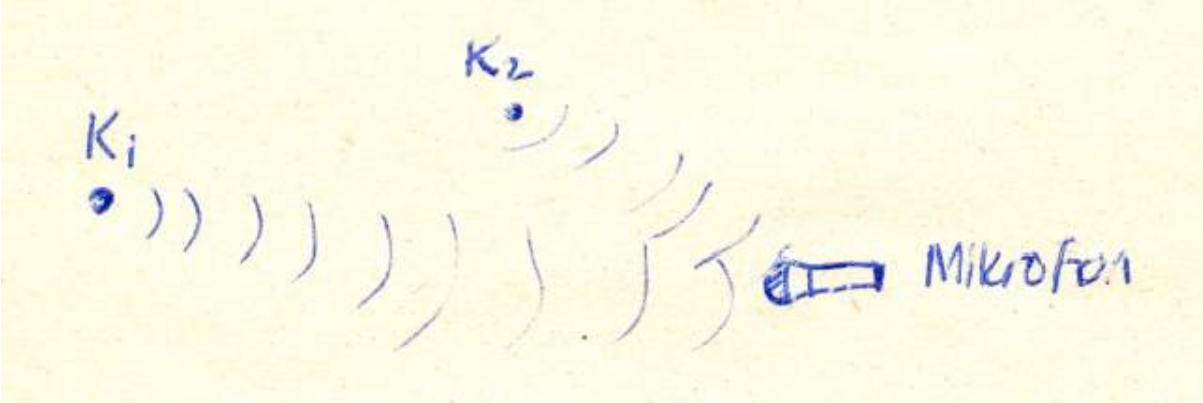
SORU: Ses basıncı seviyesi 85 dB ve 80 dB olan iki ses kaynağı toplam ses basıncı seviyesini bulunuz.

- a) Bu kaynakların frekansları farklı iken
- b) Bu kaynakların frekansları aynı iken

CEVAP:

$$P_1(t) = P_1 \cos \omega_1 t$$

$$P_2(t) = P_2 \cos(\omega_2 t + \phi)$$



$$s_b = 10 \log_{10} \frac{(P_{rms})_m^2}{P_{ref}^2}$$

$$s_{b1} = 10 \log_{10} \frac{(P_{rms})_1^2}{P_{ref}^2} = 85 \text{ dB}$$

$$s_{b2} = 10 \log_{10} \frac{(P_{rms})_2^2}{P_{ref}^2} = 80 \text{ dB}$$

a) $P_m(t) = P_1 \cos \omega_1 t + P_2 \cos(\omega_2 t + \phi)$

$$P_m^2(t) = P_1^2 \cos^2 \omega_1 t + 2P_1 P_2 \cos \omega_1 t \cos(\omega_2 t + \phi) + P_2^2 \cos^2(\omega_2 t + \phi)$$

$$P_{rms}^2(t) = \frac{1}{T} \int_0^T P_m^2 dt$$

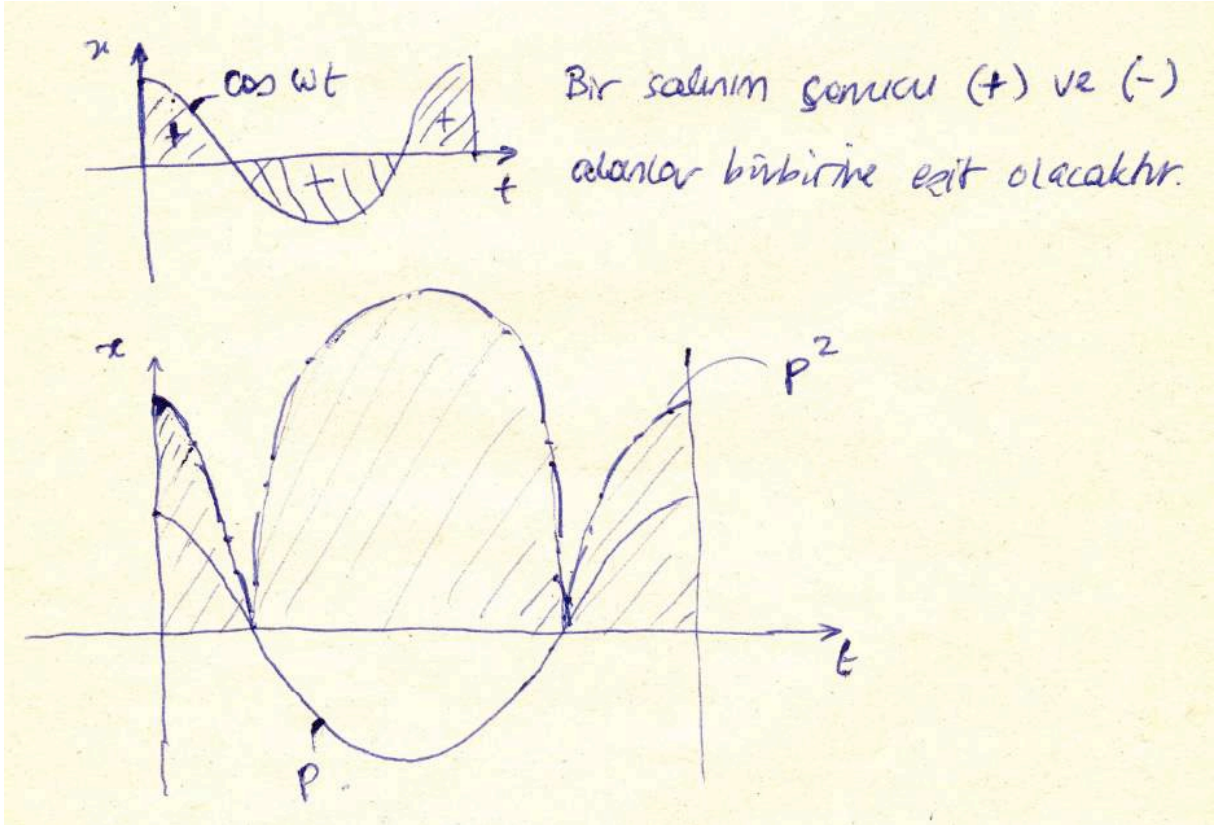
$$P_m^2(t) = P_1^2 \cos^2 \omega_1 t + P_2^2 \cos^2(\omega_2 t + \phi) + P_1 P_2 [\cos\{(\omega_1 + \omega_2)t + \phi\} + \cos\{(\omega_1 - \omega_2)t - \phi\}]$$

$$\begin{aligned} P_{rms}^2(t) &= \frac{1}{T} \int_0^T P_m^2 dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T P_1^2 \cos^2 \omega_1 t dt + \frac{1}{T} \int_0^T P_2^2 \cos^2(\omega_2 t + \phi) dt \\ &\quad + \frac{1}{T} \int_0^T P_1 P_2 [\cos\{(\omega_1 + \omega_2)t + \phi\} + \cos\{(\omega_1 - \omega_2)t - \phi\}] dt \end{aligned}$$

$$\int_0^T P_1^2 \cos^2 \omega_1 t dt = \frac{1}{2} P_1^2 T$$

$$\int_0^T P_2^2 \cos^2(\omega_2 t + \phi) dt = \frac{1}{2} P_2^2 T$$

$$\int_0^T \int_0^T P_1 P_2 [\cos\{(\omega_1 + \omega_2)t + \phi\} + \cos\{(\omega_1 - \omega_2)t - \phi\}] dt = 0$$



$$(P_1)_{rms} = \frac{P_1}{\sqrt{2}}$$

$$(P_{rms})_{mik}^2 = \frac{1}{2} P_1^2 + \frac{1}{2} P_2^2$$

ve

$$(P_2)_{rms} = \frac{P_2}{\sqrt{2}}$$

$$(P_{rms})_{mik}^2 = (P_1)_{rms}^2 + (P_2)_{rms}^2$$

$$s_{b1} = 20 \log_{10} \frac{\frac{P_1}{\sqrt{2}}}{P_{ref}} = 85 \text{ dB}$$

→ Biliyoruz ki $P_{ref} = 20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$

$$P_1 = 0,503 \text{ Pa}$$

$$P_2 = 0,283 \text{ Pa}$$

$$s_b = 10 \log_{10} \frac{(P_{rms})_m^2}{P_{ref}^2} = 10 \log_{10} \frac{\frac{1}{2}(0,503^2 + 0,283^2)}{(20 \times 10^{-6})^2} = 86,2dB$$

$$b) \int_0^T P_1^2 \cos^2 \omega_1 t dt = \frac{1}{2} P_1^2 T$$

$$\int_0^T P_2^2 \cos^2(\omega_2 t + \phi) dt = \frac{1}{2} P_2^2 T$$

$$\int_0^T \int_0^T P_1 P_2 [\cos(2\omega t + \phi) + \cos \phi] dt = P_1 P_2 \cos \phi T$$

$$(P_{rms})_{mik}^2 = \frac{1}{2} P_1^2 + \frac{1}{2} P_2^2 + P_1 P_2 \cos \phi$$

→ $\cos \phi = 1$ yani $\phi = 0$

$$(P_{rms})_{mik}^2 = \frac{1}{2} P_1^2 + \frac{1}{2} P_2^2 + P_1 P_2 \cos \phi = \frac{1}{2} (P_1 + P_2)^2$$

$$s_b = 10 \log_{10} \frac{(P_{rms})_m^2}{P_{ref}^2} = 10 \log_{10} \frac{\frac{1}{2}(0,503 + 0,283)^2}{(20 \times 10^{-6})^2} = 88,9dB$$

SORU: Ses basınç seviyesi s_{b1} olan bir ses kaynağı ses üretmektedir. Bu ses kaynağına aynı ses basıncı seviyesinde ve arasında faz farkı bulunmayan bir ses kaynağı daha ilave edilmiştir.

- iki ses kaynağının frekansları farklı ise
- iki ses kaynağın frekansları aynı ise ilave ses kaynağının toplam ses basınç seviyesinde oluşturacağı artımı bulunuz.

CEVAP:

a)

$$(P_{rms})^2 = \frac{1}{2} P_1^2 + \frac{1}{2} P_2^2$$

$$s_{b1} = s_{b2} = s_b \rightarrow$$

$$s_{bT} = 10 \log_{10} \frac{P_{rms}^2}{P_{ref}^2} = 10 \log_{10} \frac{P^2}{P_{ref}^2}$$

$$s_b = 10 \log_{10} \frac{\left(\frac{P}{\sqrt{2}}\right)^2}{P_{ref}^2}$$

$$\Delta s_b = s_{bT} - s_b = 10 \left(\log_{10} \frac{P^2}{P_{ref}^2} - \frac{\left(\frac{P}{\sqrt{2}}\right)^2}{P_{ref}^2} \right) = 3dB$$

$$b) (P_{rms})^2 = \frac{1}{2}P_1^2 + \frac{1}{2}P_2^2 + P_1P_2 \cos\phi$$

$$\phi = 0$$

$$(P_{rms})^2 = \frac{1}{2}(P_1 + P_2)^2 = \frac{1}{2}(P)^2 = 2P^2$$

$$\Delta s_b = s_{bT} - s_b = 10 \log_{10} \frac{(2P)^2}{\frac{P^2}{2}} = 6dB$$

VURU OLAYI

Dalgaların cinsleri ve etki doğrultuları aynı, frekansları farklı ise A noktasının genliği periyodik olarak artar ve azalır. Bu olaya vuru olayı denir. Birim zamanda genliğin maksimumdan geçme sayısına vuru frekansı, bunun tersine de vuru periyodu denir. Vuru periyodu T_d ise, T_d saniyede birinci dalga n titreşim, ikincisi $n+1$ titreşim yapmış olacaktır. Bu durumda,

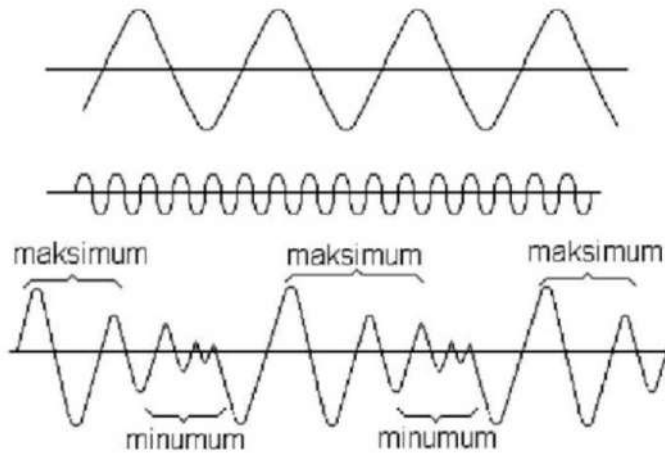
$$n = f_1 T_d$$

$$n+1 = f_2 T_d$$

olur. Buradan,

$$f_d = f_2 - f_1$$

bulunur.



Şekil10.11 Vuru oluşumu

FOURIER SERİSİ, ANALİZİ



En önemli çalışması "Isının Analitik Kuramı" adlı yapıtıdır. Bu yapıtı 1807 yılında Akademiye sundu. Eser çok tartışıldı ve beğenilmedi. 1812 yılındaki ödül için başka bir çalışma sunması istendi. Fourier bu ödülü aldı. Fakat daha önce sunduğu çalışmasının dönmesine çok kırıldı. Onun tartışmasız olan eseri, halen yaşayan Fourier analizidir. 1807 yılında kaleme aldığı eseri nihayet 1822 yılında yayımlandı. Fourier'nin ısı iletimi konusundaki araştırmalarının, fizik ve matematiğin gelişimine büyük katkıları olmuştur.

Jean Baptiste Joseph Fourier, (d. 21 Mart 1768, Auxerre-Fransa - ö. 16 Mayıs 1830, Paris). Fransız matematikçi ve fizikçi.

Fourier Analizi;

Zamana bağlı herhangi bir periyodik fonksiyon sonsuz sayıdaki sinüs ve kosinüs terimlerinin toplamından oluşan Fourier serileriyle temsil edilebilir.

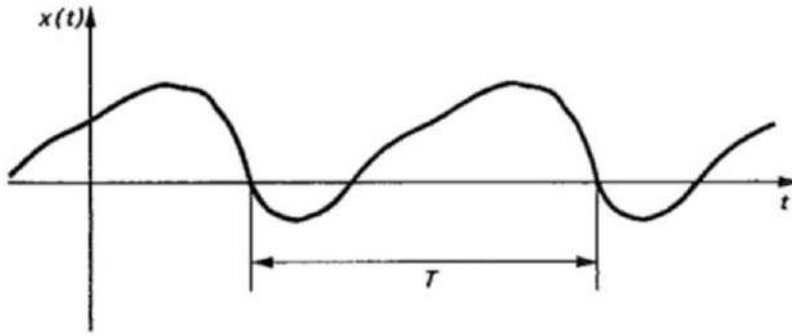


Fig. 4.1

Arbitrary periodic function of time

$$x(t) = a_0 + a_1 \cos \frac{2\pi t}{T} + a_2 \cos \frac{4\pi t}{T} \dots + b_1 \sin \frac{2\pi t}{T} + b_2 \sin \frac{4\pi t}{T}$$

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos \frac{2\pi kt}{T} + b_k \sin \frac{2\pi kt}{T} \right)$$

Ref: An introduction to Random vibrations, spectral and wavelet analysis; D.E.NevvIand, chapter 4, page; 33-34)

Burada a_0 , a_k ve b_k sabitleri Fourier katsayıları olup aşağıdaki gibi elde edilir:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos \frac{2\pi kt}{T} dt$$

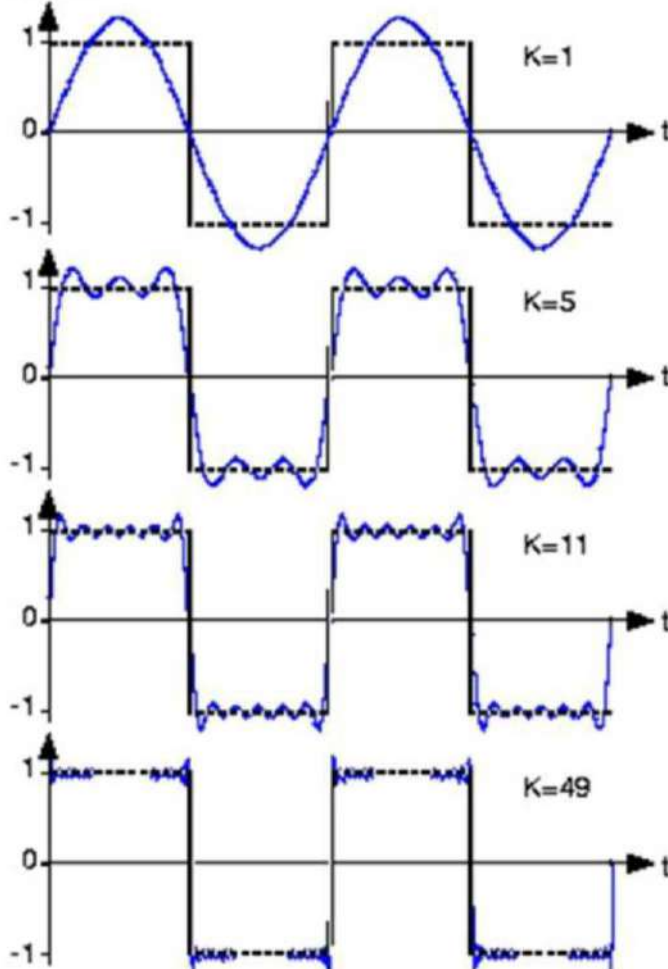
$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin \frac{2\pi kt}{T} dt$$

Gibbs Fenomeni;

When a periodic function is represented by a Fourier series, an anomalous behavior can be observed. As the number of terms (n) increases, the approximation can be seen to improve everywhere except in the vicinity of the discontinuity. Here the deviation from the true wave form becomes narrower but not any smaller in amplitude. It has been observed that the error in amplitude remains at approximately 9 percent, even when k goes to infinity. This behavior is known as Gibbs phenomenon, after its discoverer.

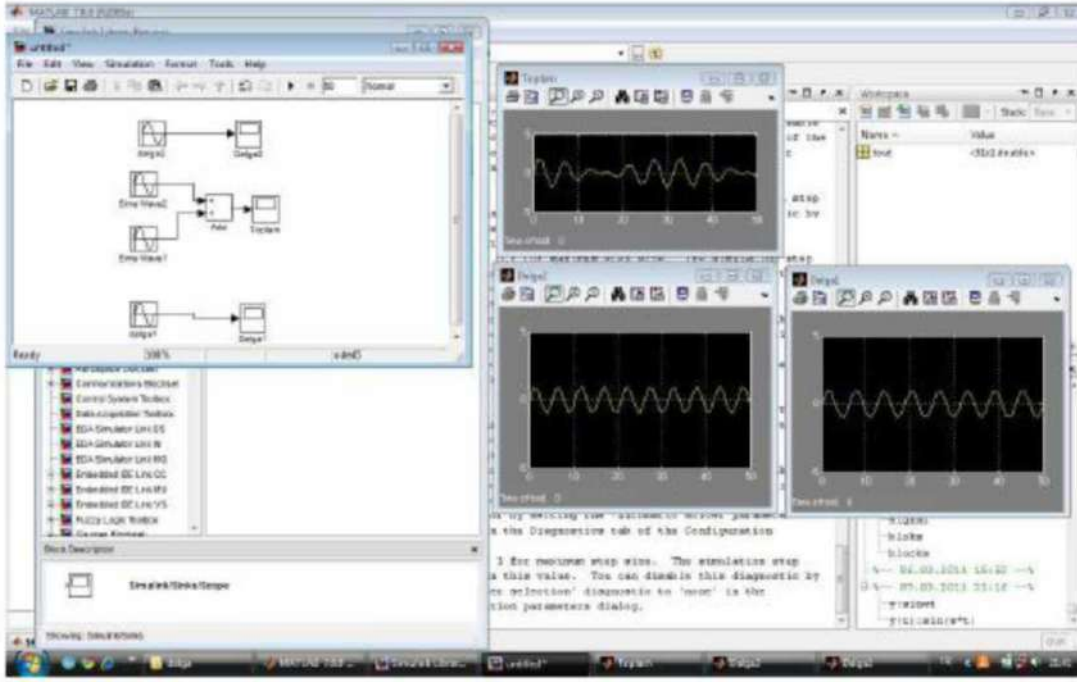
Ref: Titreşim Mühendisliğine giriş; Den Harbog chapter 1; page: 37

Fourier series approximations of a square wave

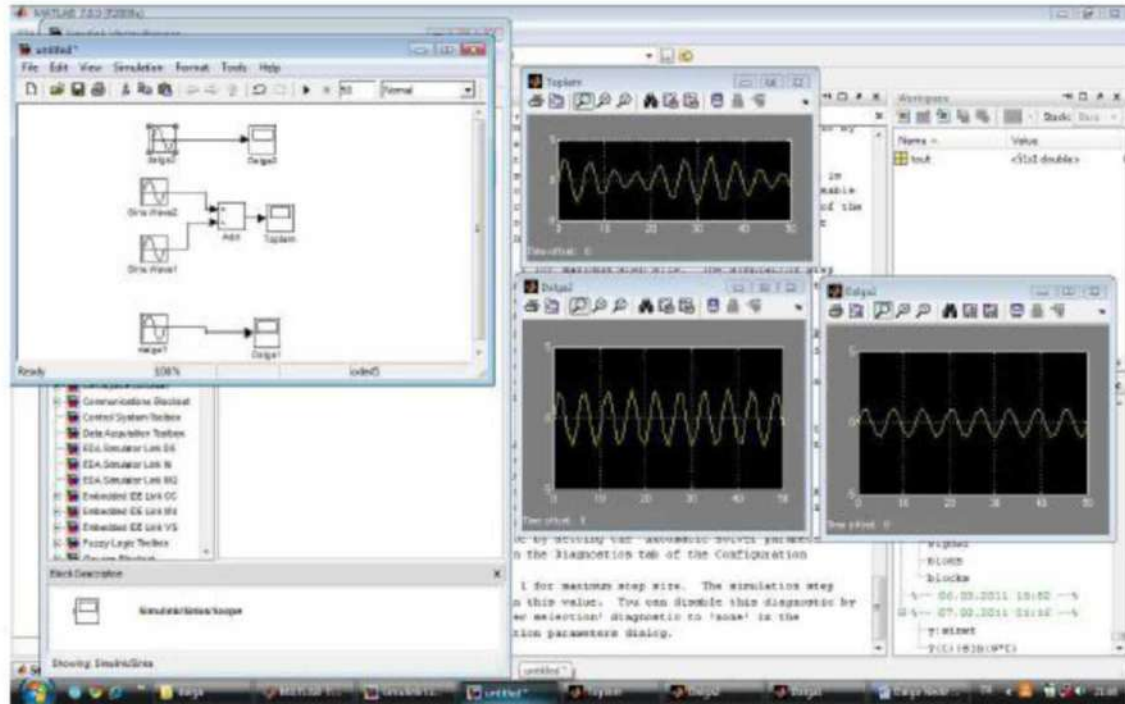


Ref: <http://cnx.org/content/ml0092/latest/>

HARMONİK TİTREŞİM; GENLİKLERİ FARKLI FREKANSLARI ÇOK YAKIN İKİ HARMONİĞİN TOPLAMI



Genlikleri aynı, frekansları birbirine yakın iki sinüs dalgasının toplamı



Genlikleri farklı, frekansları yakın iki sinüs dalgasının toplamı

DESİBELLERLE İŞLEMLER

TOPLAMA

$$P_t^2 = \sum_{i=1}^n P_i^2$$

$$S_{pt} = 10 \log_{10} \frac{P_t^2}{P_0^2}$$

$$P_t^2 = P_0^2 10^{\frac{S_{pi}}{10}}$$

Dolayısıyla

$$S_{pt} = 10 \log_{10} \left[\sum_{i=1}^n 10^{\frac{S_{pi}}{10}} \right]$$

ÇIKARMA

$$P_B^2 = P_t^2 - P_A^2 = P_0^2 10^{\frac{S_{pt}}{10}} - P_0^2 10^{\frac{S_{pA}}{10}}$$

$$S_{pB} = 10 \log_{10} \frac{P_B^2}{P_0^2} = 10 \log_{10} \left[10^{\frac{S_{pt}}{10}} - 10^{\frac{S_{pA}}{10}} \right]$$

ORTALAMA

$$P_{or}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n P_i^2}{n} = \frac{1}{n} P_0^2 \sum_{i=1}^n 10^{\frac{S_{pi}}{10}}$$

$$\overline{S_{por}} = 10 \log_{10} \frac{P_{or}^2}{P_0^2}$$

$$\overline{S_{por}} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{S_{pi}}{10}} \right]$$

Şayet en büyük ve en küçük değerler arasındaki farkı 5dB'den az ise

$$(\overline{S_b})_{yak} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{pi}$$

Şayet en büyük ve en küçük değerler arasındaki farkı 5-10dB'den az ise

$$(\overline{S_b})_{yak} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{pi} + 1$$

SORU: Frekansları aynı, genlik ve faz açıları farklı iki titreşimin bileşkesini bulunuz.

CEVAP:

$$x_1 = a_1 \cos(w_n t + \phi_1)$$

$$x_2 = a_2 \cos(w_n t + \phi_2)$$

$$x = x_1 + x_2 = a_1(\cos w_n t \cos \phi_1 - \sin w_n t \sin \phi_1) + a_2(\cos w_n t \cos \phi_2 - \sin w_n t \sin \phi_2)$$

$$x = x_1 + x_2 = (a_1 \cos \phi_1 - a_2 \cos \phi_2) \cos w_n t - (a_1 \sin \phi_1 - a_2 \sin \phi_2) \sin w_n t$$

$$x = A \cos w_n t - B \sin w_n t$$

$$A = a_1 \cos \phi_1 - a_2 \cos \phi_2$$

$$B = a_1 \sin \phi_1 - a_2 \sin \phi_2$$

$$x = r \cos(w_n t + \varepsilon)$$

$$r^2 = A^2 + B^2$$

$$\varepsilon = \tan^{-1} \frac{B}{A}$$

SORU: Aynı frekansta, değişik genliklerde ve faz açılarında bir kütle üzerine etkiyen birden fazla titreşimlerin bileşkesini inceleyiniz.

CEVAP:

$$x_i = \sum_{i=1}^k a_i \cos(w_n t + \phi_i) = \sum_{i=1}^k a_i \cos w_n t \cos \phi_i - a_i \sin w_n t \sin \phi_i$$

$$x_i = \cos w_n t \sum_{i=1}^k a_i \cos \phi_i - a_i \sin w_n t \sum_{i=1}^k a_i \sin \phi_i$$

$$A = \sum_{i=1}^k a_i \cos \phi_i$$

$$B = \sum_{i=1}^k a_i \sin \phi_i$$

$$x = r \cos(w_n t + \varepsilon)$$

$$r = \left[\left(\sum_{i=1}^k a_i \cos \phi_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^k a_i \sin \phi_i \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\tan \varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^k a_i \sin \phi_i}{\sum_{i=1}^k a_i \cos \phi_i}$$

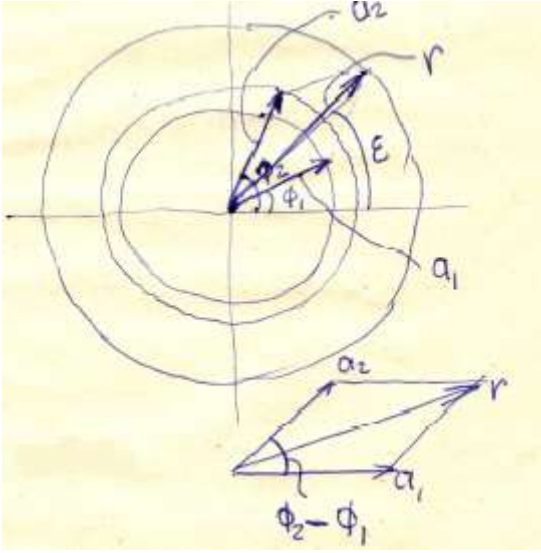
Yani bu durumda kaç tane olursa olsun titreşimler kolay bir şekilde toplanabilirler.

$$r^2 = a_1^2 \cos^2 \phi_1 + 2a_1 a_2 \cos \phi_1 \cos \phi_2 + a_2^2 \cos^2 \phi_2 + a_1^2 \sin^2 \phi_1 + 2a_1 a_2 \sin \phi_1 \sin \phi_2 + a_2^2 \sin^2 \phi_2$$

$$r^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 (\cos \phi_1 \cos \phi_2 + \sin \phi_1 \sin \phi_2)$$

$$r^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)$$

$$\tan \varepsilon = \frac{a_1 \sin \phi_1 + a_2 \sin \phi_2}{a_1 \cos \phi_1 + a_2 \cos \phi_2}$$



Dikkat edilirse Cosinüs kuralına göre $r^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2\cos(\phi_1 - \phi_2)$

SORU: Değişik genlik ve faz açısına fakat frekansları birbirinden az farklı olan iki tane basit harmonik titreşimin bileşkesini inceleyiniz.

CEVAP:

$$x_1 = a_1 \cos(\omega_n t + \phi_1)$$

$$x_2 = a_2 \cos((\omega_n + p)t + \phi_2) \text{ Burada } p \text{ frekans farkını temsil etmektedir.}$$

x_2 şu şekilde yazılabilir.

$$x_2 = a_2 \cos[\omega_n t + (pt + \phi_2)]$$

Bu durumda $(pt + \phi_2)$ yeni bir faz açısı gibi kabul edilebilirse bir önceki problemin çözümünden:

$$x = x_1 + x_2 = r \cos(\omega_n t + \epsilon)$$

$$r = [a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2\cos(\phi_1 - \phi_2)]^{1/2}$$

$$\epsilon = \tan^{-1} \frac{a_1 \sin \phi_1 + a_2 \sin \phi_2}{a_1 \cos \phi_1 + a_2 \cos \phi_2}$$

Bizim problemimiz için:

$$r = [a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2\cos(\phi_1 - (pt + \phi_2))]^{1/2}$$

Ve

$$\tan \epsilon = \frac{a_1 \sin \phi_1 + a_2 \sin (pt + \phi_2)}{a_1 \cos \phi_1 + a_2 \cos (pt + \phi_2)}$$

Bu durumda r 'in maksimum olması için

$$\cos(\phi_1 - (pt + \phi_2)) = 1$$

$$\phi_1 - (pt + \phi_2) = 0, 2\pi, 4\pi \dots$$

$$pt = k - (\phi_1 - \phi_2)$$

Mesela $pt = -(\phi_1 - \phi_2)$

Bu şart sağlandığında $r = a_1 + a_2$

R'nin minimum olması için

$$\cos(\phi_1 - (pt + \phi_2)) = -1$$

$$\phi_1 - (pt + \phi_2) = \pi, 3\pi, 5\pi \dots$$

Bu şart sağlandığında: $r = a_1 - a_2$

R ile minimum r arasında gezinecektir ve vurgu meydana gelecektir.

Şayet $a_1 = a_2 = a$ ve $\phi_1 = \phi_2 = \phi$ olursa

$$r = [a^2 + a^2 + 2aa\cos(\phi_1 - (pt + \phi_2))]^{1/2}$$

$$r = [2a^2 + 2a^2\cos(\phi - pt - \phi)]^{1/2}$$

$$r = [2a^2 + 2a^2\cos pt]^{1/2}$$

$$r = [2a^2(1 + \cos pt)]^{1/2}$$

$$\cos pt = \cos^2 \frac{pt}{2} - \sin^2 \frac{pt}{2} = 2\cos^2 \frac{pt}{2} - 1$$

$$r = [2a^2(1 + 2\cos^2 \frac{pt}{2} - 1)]^{1/2} = [4a^2\cos^2 \frac{pt}{2}]^{1/2}$$

$$r = 2a\cos \frac{pt}{2}$$

$$\tan \varepsilon = \frac{a\sin\phi + a\sin(pt+\phi)}{a\cos\phi + a\cos(pt+\phi)}$$

$$\sin a + \sin b = 2\sin\left(\frac{a+b}{2}\right)\cos\left(\frac{a-b}{2}\right)$$

$$\cos a + \cos b = 2\cos\left(\frac{a+b}{2}\right)\cos\left(\frac{a-b}{2}\right)$$

$$\tan \varepsilon = \frac{a \left[2\sin\left(\frac{\phi + pt + \phi}{s}\right)\cos\left(\frac{\phi + pt - \phi}{s}\right) \right]}{a \left[2\cos\left(\frac{\phi + pt + \phi}{s}\right)\cos\left(\frac{\phi + pt - \phi}{s}\right) \right]}$$

$$\tan \varepsilon = \tan\left(\frac{2\phi + pt}{2}\right) \rightarrow \varepsilon = \phi + \frac{pt}{2}$$

Yani bu durumda genlik 0 ile 2a arasında gezinecektir. (Faz açısının değişken olduğuna dikkat çekmekte yarar var.)

BÖLÜM III: DALGA DENKLEMİNİN ELDE EDİLMESİ

HALAT TİTREŞİMİ

A flexible string of mass ρ per unit length is stretched under tension T . By assuming the lateral deflection y of the string to be small, the change in tension with deflection is **negligible** and can be ignored.

In Fig. 7.1-1, a free-body diagram of an **elementary** length dx of the string is shown. Assuming small deflections and slopes, the equation of motion in the y - direction is

$$T\left(\theta + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx\right) - T\theta = \rho dx \frac{\partial^2 y}{dt^2}$$

veya

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\rho}{T} \frac{\partial^2 y}{dt^2}$$

Since the slope of the string is $\theta = \partial y / \partial x$ the above **equation** reduces to

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{dt^2}$$

where $c = \sqrt{T / \rho}$ can be shown to be the velocity of wave propagation along the string.

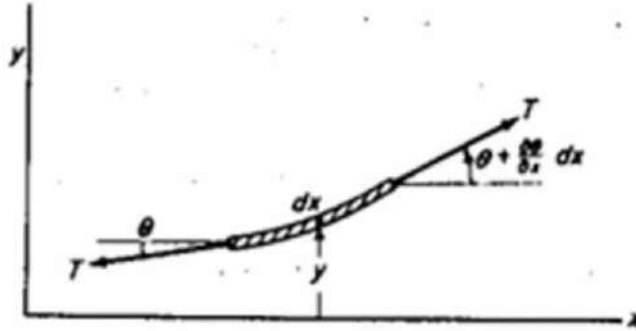


Figure 7.1-1. String element in lateral vibration.

The general solution of Eq. (7.1-2) can be expressed in the form

$$y = F_1(ct - x) + F_2(ct + x)$$

where F_1 and F_2 are arbitrary functions. Regardless of the type of function F , the argument $(ct \pm x)$ upon differentiation leads to the equation

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{dt^2}$$

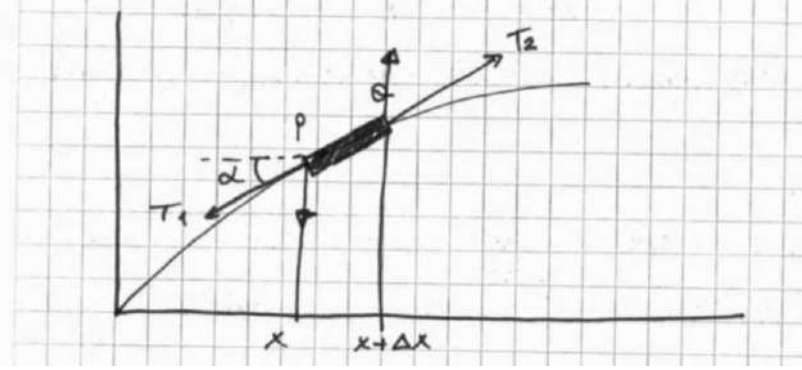
Ref: Theory of vibration with application, William T. Thomson, Chapter 7, page: 210

BÖLÜM - III DALGA DENKLEMLERİNİN ELDE EDİLMESİ

HALATLARIN TİTREŞİMİ

Kabuller:

- 1) Birim uzunluğa düşen halat kütlesi sabit (homojen halat)
- 2) Halat mükemmel şekilde elastik ve eğilmeye direnç göstermiyor
- 3) Germe kuvvetleri çok yüksek olduğundan yer çekimi etkileri ihmal edilebilir



$$T_1 \cos \alpha = T_2 \cos \beta = T = sbt.$$

$$F = ma \Rightarrow T_2 \sin \beta - T_1 \sin \alpha = \rho \Delta x \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\frac{T_2 \sin \beta}{T} - \frac{T_1 \sin \alpha}{T} = \frac{\rho \Delta x}{T} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

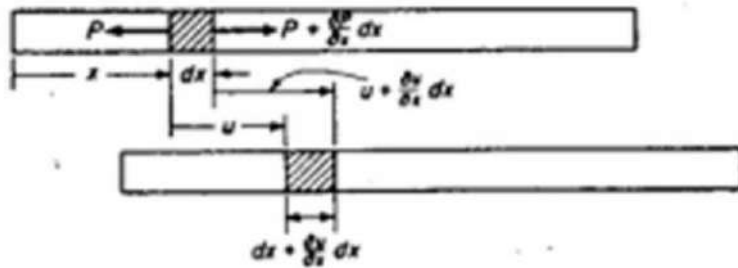
$$\frac{T_2 \sin \beta}{T_2 \cos \beta} - \frac{T_1 \sin \alpha}{T_1 \cos \alpha} = \tan \beta - \tan \alpha = \frac{\rho \Delta x}{T} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\tan \alpha = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_x \quad \text{ve} \quad \tan \beta = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x+\Delta x}$$

$$\frac{1}{\Delta x} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x+\Delta x} - \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_x \right] = \frac{\rho}{T} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (\Delta x \rightarrow 0 \Rightarrow \left[f'(z_0) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{f(z_0 + \Delta z) - f(z_0)}{\Delta z} \right] \dots \text{bilgi})$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\rho}{T} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad \left[-c^2 = \frac{T}{\rho} \right]$$

ÇUBUKLARIN UZUNLAMASINA TİTREŞİMLERİ



HfMTt 7.2*1. Urtf>Uc<iM<oi o! rod lltMtL

Lel us consider an elemeni of this rod of length dx (Fig. 7.2-1). If u u the displacemnt al JT, the displacemnt at $x + dx$ will be $u + (du/dx) dx$. It it evident then that the element dx in the new posiuion has changed in length by an amounl $(Du/O^*) dx$, and lhu» the unit ttrain is du/dx . Since from Hookc's law the ratio of unit slress lo unit sıram is equal to the modulus of elaslicity E , wc can write

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{P}{AE}$$

where A is the cross-seclıönl arca of the rod. Diffcrentiating wih respect $l o x$

$$AE \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial P}{\partial x}$$

Wc now apply Newion's law of molion for ihe elemeni and equatc the unbalanced force to ihe product of ihe mass and accclcraüon of ihe element

$$\frac{\partial P}{\partial x} dx = \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

where ρ is the density of ihe rod. mass per unit volume. Eliminaling $i P/dx$ between Eqs. (7.2-2) and (7.2-3), wc obtain ihe partial differential equation

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left(\frac{E}{\rho} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

or

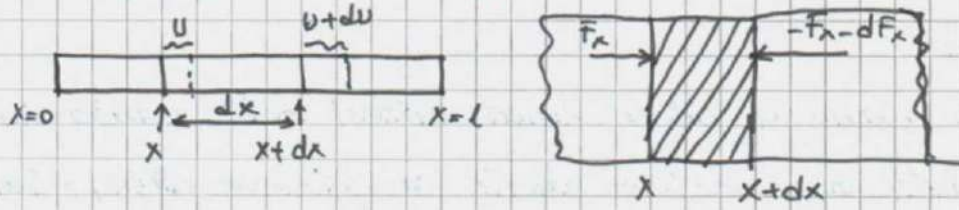
$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

which is similar lo thal of Lq. (7.1-2) for the slring. The velocity of propagalion of ihe displacemnt or stress wave in the rod is then equal to

$$c = \sqrt{E / \rho}$$

Ref: Theory of vibration with application, VWilliam T. Thomson chapter 7, page 212-213

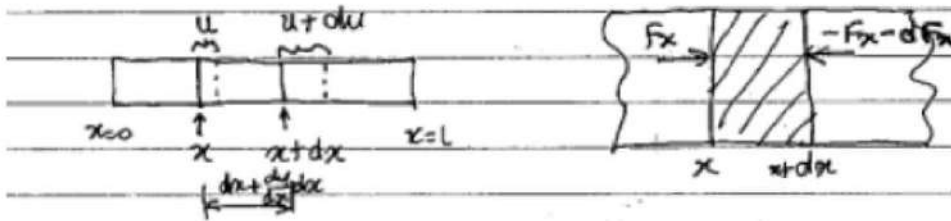
ÇUBUKLARIN TITREŞİMİ:



$$u = u(x, t)$$

Birim alan kabul edilirse, hacimdeki değişim;

ÇUBUKLARIN TITREŞİMLERİ



$$u = u(x, t)$$

$$\Delta V = dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx - dx = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) dx$$

$$\text{strain} = \frac{\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) dx}{dx} = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)$$

$$\text{stress (gerilim)} = \frac{F_x}{s} \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = - \frac{F_x / s}{\partial u / \partial x}$$

Çünkü pozitif kuvvet, negatif strain oluşturacağından '-' oldu.

$$F_x = -sE \frac{\partial u}{\partial x}$$

Şayet statik durum varsa $\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)$ her yerde aynıdır. Dolayısıyla F_x sabittir. Dinamik durumda strain, dolayısıyla F_x değişir.

$$dF_x = F_x - \left(F_x + \frac{\partial F_x}{\partial x} dx \right) = - \frac{\partial F_x}{\partial x} dx$$

$$F_x = -sE \frac{\partial u}{\partial x} \Rightarrow \frac{\partial F_x}{\partial x} = -sE \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$dF_x = sE \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx$$

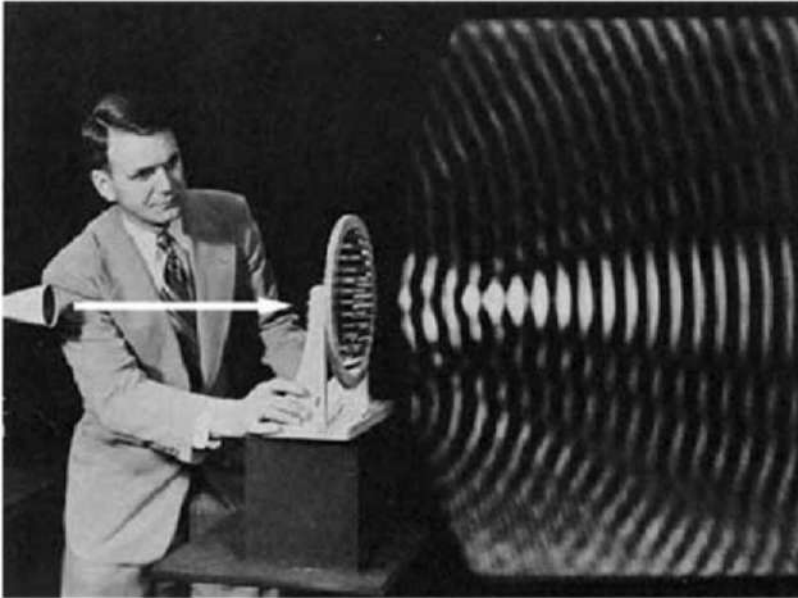
Bu birimin kütlesi: $\rho s dx$

$$F = ma$$

$$(\rho s dx) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = sE \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Rightarrow \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

AKIŞ SİSTEMLERDE DALGA DENKLEMİ



1960 tarihli bu fotoğrafta, özel bir ses merceği ve özel bir görüntüleme yöntemi kullanılarak, sol tarafta görülen kornadan çıkan ses dalgalarının görüntüsü elde edilebilmiştir (Bell Telephone Laboratory).

Ref: <http://www.baskent.edu.tr/~scanan/sesweb/ses.htm>

In physics , the acoustic wave equation govems the propagation of acoustic waves through a material medium. The form of the equation is a second order partial differential equation . The equation describes the evolution of acoustic pressure p or partide velocity \mathbf{U} as a function of position \mathbf{r} and time t . A simplified form of the equation describes acoustic waves in only one spatial dimension (position X), while a more general form describes uaves in three dimensions (displacement vector $\mathbf{r} = (x , y , z)$).

In one dimension

Equation

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

Where p is the acoustic pressure (the local deviation from the ambient pressure), and where C is the speed of sound (meaning that $\frac{1}{c}$ — is the " slowness " of the media).

Derivation

The wave equation can be developed from the linearized one-dimensional continuity equation, the linearized one-dimensional force equation and the equation of state.

The equation of state (ideal gas law)

$$PV = nRT$$

In an adiabatic process, pressure P as a function of density ρ can be linearized to

$$P = Cp$$

where as C is some constant. Braking the pressure and density into their mean and total components

and nothing that $C = \frac{\partial P}{\partial p}$:

$$P - P_0 = \left(\frac{\partial P}{\partial p} \right) (\rho - \rho_0)$$

The adiabatic bulk modulus for a fluid is defined as

$$B = \rho_0 \left(\frac{\partial P}{\partial p} \right)_{adiabatic}$$

which gives the result

$$P - P_0 = B \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0}$$

Consideration, s , is defined as the change in density for a given ambient fluid density.

$$s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$$

The linearized equation of state becomes

$$p = Bs \text{ where } p \text{ is the acoustic pressure } (P - P_0)$$

The continuity equation (conservation of mass) in one dimension is

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = 0$$

Again the equation must be linearized and the variables split into mean and variable components.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_0 + \rho_0 s) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_0 u + \rho_0 s u) = 0$$

Rearranging and noting that ambient density does not change with time or position and that the consideration multiplied by the velocity is a very small number:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} u = 0$$

Euler's Force equation (conservation of momentum) is the last needed component. In one dimension the equation is:

$$\rho \frac{Du}{Dt} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0$$

where D/Dt represents the convective, substantial or material derivative, which is the derivative at a point moving with medium rather than at a fixed point.

Linearizing the variables:

$$(\rho_0 + \rho_0 s) \left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} \right) u + \frac{\partial}{\partial x} (P_0 + \rho) = 0$$

Rearranging and neglecting small terms, the resultant equation becomes:

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

Taking the time derivative of the continuity equation and the spatial derivative of the force equation results in:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} = 0$$

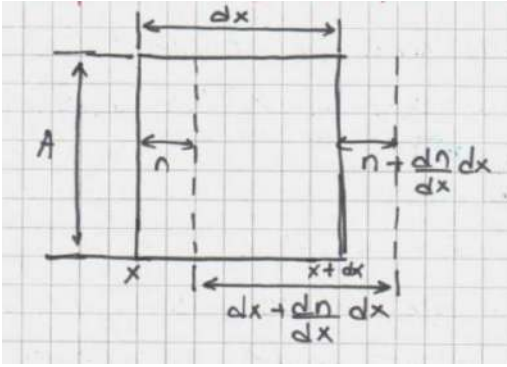
$$\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0$$

Multiplying the first by ρ_0 , subtraction the two, and substituting the linearized equation of state,

$$-\frac{\rho_0}{B} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

where $c = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}}$ is the speed of propagation

AKIŞ SİSTEMLERDE DALGA DENKLEMİ



A: kesit alanı $n=f(x,t)$

Akışkan kütlesi= $\rho_0 A dx$

Sesin geçmesi sonucu x yüzeyinin n kadar sağa doğru yer değiştirmişini kabul edersek (x+dx)'deki değişim

$n + \frac{dn}{dx}$ olur

Bu sebeple aradaki hacim:

$$A \left(dx + \frac{\partial n}{\partial x} dx \right)$$

Toplam kütlenin sabit kalabilmesi için yoğunluğun değişmesi gerekir.

$$\rho_0 A dx = A \rho dx \left(1 + \frac{\partial n}{\partial x} \right)$$

$$\rho_0 = \rho \left(1 + \frac{\partial n}{\partial x} \right)$$

Herhangi bir noktadaki yoğunlaşma

$$s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \Rightarrow \rho_0 (1 + s) = \rho$$

$$\Rightarrow \rho_0 = \rho_0 (1 + s) \left(1 + \frac{\partial n}{\partial x} \right)$$

$$\Rightarrow 1 = (1 + s) \left(1 + \frac{\partial n}{\partial x} \right)$$

Yoğunluktaki değişim ve moleküler yer değiştirmeler çok küçük olduğundan (insan kulağı için acı verici

olan en keskin sesler için bile s veya $\frac{\partial n}{\partial x}$ 10^{-4} den küçüktür)

$$\Rightarrow \chi = \chi + \frac{\partial n}{\partial x} + s + s \frac{\partial n}{\partial x} \quad \text{ve} \quad s \frac{\partial n}{\partial x} \cong 0$$

$$s = - \frac{\partial n}{\partial x}$$

Bu eşitlik “devamlılık denklemi” (equation of continuity)’nin özel bir halidir. [Bu formül yoğunlukdaki azalmayı gösteriyor.]

Termodinamik olarak yoğunluk değişimi ile basınç değişimi arasındaki ilişkiye bakacak olursak:

$$\text{İzotermal işlem:} \quad \left(\frac{P}{P_0} \right) = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \quad P_0 : \text{eş basınç}$$

P : anlık basınç

$$\text{Adiyabatik işlem:} \quad \left(\frac{P}{P_0} \right) = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \quad \gamma : \text{ısı kapasitesi oranı}$$

Sisteme ısı giriş veya çıkışı yok

Su için işlem adiyabatik kabul edilir.

$$\Rightarrow dP = \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_0 d\rho$$

p : akustik basınç

Akustik dalgalardaki değişimler ufak olduğu için $dP = p$ alınabilir. Buradaki $p = P - P_0$

ve $d\rho = \rho_0 s$ alıabilir. Yani

$$d\rho = \rho - \rho_0 \quad (s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \text{ olduğundan})$$

$$\Rightarrow p = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \rho_0 s$$

$$c^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0$$

$$\Rightarrow p = \rho_0 c^2 s$$

Bu denklem, akustik basınçla, yoğunluk değişimini ilişkilendiren önemli bir denklemdir.

$$s = - \frac{\partial n}{\partial x}$$

olduğu bilindiğinden

$$p = \rho_0 c^2 \frac{\partial n}{\partial x}$$

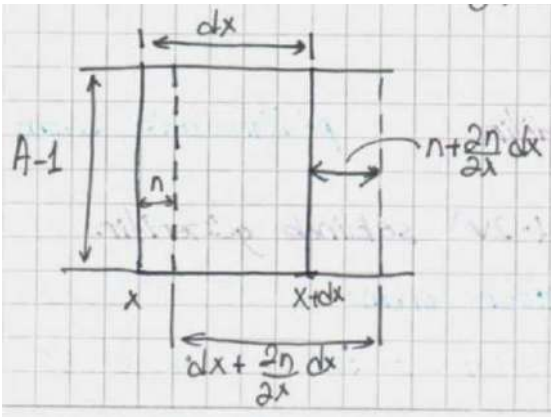
Elementin iki girişindeki basınç değişimini ele alırsak kuvvet:

$$dF_x = \left[P - \left(P + \frac{\partial P}{\partial x} dx \right) \right] A = - \frac{\partial P}{\partial x} dx A$$

$$F = ma \Rightarrow \frac{\partial P}{\partial x} dx A = \underbrace{A dx \rho_0}_{\text{kütle}} \underbrace{\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}}_{\text{ivme}} \Rightarrow \frac{\partial P}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$P_0 = \rho_0 c^2 \frac{\partial u}{\partial x^2} \quad (1) \quad \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$- \frac{\partial P}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2) \quad \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}$$



Hacimdeki değişim

$$= 1 \left(n + \frac{\partial n}{\partial x} dx - n \right)$$

$$\Delta V = \frac{\partial n}{\partial x} dx$$

$$\text{Strain} : \frac{\Delta V}{V} = \frac{\frac{\partial n}{\partial x} dx}{dx} = \frac{\partial n}{\partial x}$$

*Bulk Modülü

$$K = \frac{\text{stress}}{\text{strain}} = - \frac{P}{\frac{\partial n}{\partial x}} \Rightarrow \left[P = -K \frac{\partial n}{\partial x} \right]$$

P_x x 'deki basınç ise $x+dx$ 'deki basınç

$$P_x - \left(P_x + \frac{\partial P}{\partial x} dx \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} dx = - \frac{\partial (P_0 + P)}{\partial x} dx = - \frac{\partial P}{\partial x} dx$$

Alan (A)=1 'bir' olduğu için;

$$\text{kuvvet} \Rightarrow F = A \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right) dx = -\frac{\partial P}{\partial x} dx \text{ olur.}$$

Şayet ρ çevrenin yoğunluğu ise

$$F = ma$$

$$\rho dx \frac{\partial^2 n}{\partial t^2} = -\frac{\partial P}{\partial x} dx \Rightarrow \rho \frac{\partial^2 n}{\partial t^2} = -\frac{\partial P}{\partial x}$$

$$\Rightarrow P = -K \frac{\partial n}{\partial x} \Rightarrow \frac{\partial P}{\partial x} = -K \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

Bulk modülü:

$$K = \frac{P}{\varepsilon_p}$$

p :hidrostatik basınç

oranı ile ifade edilir.

Hook kanunu ile de $K = E / 3(1 - 2\nu)$ şeklinde gösterilir.

E :young modülü

ν :poisson oranı

ref: Mechanical Behavior of Materials 2nd edition pg:158

Dolayısıyla :

$$\rho \frac{\partial^2 n}{\partial t^2} = K \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

Dalga hareketinin genel denklemi:

$$\frac{\partial^2 n}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

$$\Rightarrow \frac{\rho \frac{\partial^2 n}{\partial t^2}}{\frac{\partial^2 n}{\partial t^2}} = \frac{K \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}}{c^2 \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}} \Rightarrow c^2 = K \Rightarrow c^2 = \frac{K}{\rho}$$

İnsrasonic <20 Hz <Gençler <20 kHz<Ultrasonik

< 20 Hz<Orta Yaşar<12-14 kHz

Yukarıdaki işlemler benzer şekilde uygulanırsa (Kinsler sf:113)

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

3 BOYUTLU DALGA DENKLEMİ

Equation

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

where ∇^2 is Laplace operator, p is the acoustic pressure (the local deviation from the ambient pressure), and where c is the speed of sound.

LAPLACE OPERATÖRÜ

The laplace operator is a second order differential operator in the n-dimensional Euclidean space, defined as the divergence (∇) of the gradient (∇f). Thus if f is a twice-differentiable real-valued function, then the Laplacian of f is defined by

$$\Delta f = \nabla^2 f = \nabla \cdot \nabla f \quad (1)$$

Equivalently, the Laplacian of f is the sum of all the unmixed second partial derivatives in the Cartesian coordinates X_i :

$$\Delta f = \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \quad (2)$$

As a second order differential operator, the Laplace operator maps C^k -function to C^{k-2} - function for $k \geq 2$. The expression (1) (or equivalently (2)) defines an operator $\Delta : C^k(\mathbb{R}^n) \rightarrow C^{k-2}(\mathbb{R}^n)$, or more generally an operator $\Delta : C^k(\Omega) \rightarrow C^{k-2}(\Omega)$ for any open set Ω

Divergence and Curl

$$1. \nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial}{\partial x}(x) + \frac{\partial}{\partial y}(y) + \frac{\partial}{\partial z}(2z) = 4;$$

$$\nabla \times \mathbf{F} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ x & y & 2z \end{vmatrix} = 0\mathbf{i} + 0\mathbf{j} + 0\mathbf{k} = \mathbf{0};$$

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) = 0.$$

$$2. \nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial}{\partial x}(0) + \frac{\partial}{\partial y}(\sinh(xyz)) + \frac{\partial}{\partial z}(0) = xz \cosh(xyz);$$

$$\nabla \times \mathbf{F} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \sinh(xyz) & 0 \end{vmatrix} = -xy \cosh(xyz)\mathbf{i} + yz \cosh(xyz)\mathbf{k};$$

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) = \frac{\partial}{\partial x}(-xy \cosh(xyz)) + \frac{\partial}{\partial z}(yz \cosh(xyz)) = \cosh(xyz)(-y + y) + \sinh(xyz)(-xy^2z + xy^2z) = 0.$$

$$3. \nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial}{\partial x}(2xy) + \frac{\partial}{\partial y}(xe^y) + \frac{\partial}{\partial z}(2z) = 2y + xe^y + 2;$$

$$\nabla \times \mathbf{F} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 2xy & xe^y & 2z \end{vmatrix} = (e^y - 2x)\mathbf{k};$$

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) = \frac{\partial}{\partial z}(e^y - 2x) = 0.$$

$$4. \nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial}{\partial x}(\sinh(x)) + \frac{\partial}{\partial y}(\cosh(xyz)) - \frac{\partial}{\partial z}(x + y + z) = \cosh(x) + xz \sinh(xyz) - 1;$$

$$\nabla \times \mathbf{F} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \sinh(x) & \cosh(xyz) & -(x + y + z) \end{vmatrix} = [-1 - xy \sinh(xyz)]\mathbf{i} - \mathbf{j} + yz \sinh(xyz)\mathbf{k};$$

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) = \frac{\partial}{\partial x}(-1 - xy \sinh(xyz)) + \frac{\partial}{\partial z}(yz \sinh(xyz)) = (-y + y) \sinh(xyz) + \cosh(xyz)(-xy^2z + xy^2z) = 0.$$

$$5. \nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial}{\partial x}(x^2) + \frac{\partial}{\partial y}(y^2) + \frac{\partial}{\partial z}(z^2) = 2(x + y + z);$$

$$\nabla \times \mathbf{F} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ x^2 & y^2 & z^2 \end{vmatrix} = 0\mathbf{i} + 0\mathbf{j} + 0\mathbf{k} = \mathbf{0};$$

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) = 0.$$

$$6. \nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial}{\partial x}(\sinh(x-z)) + \frac{\partial}{\partial y}(2y) + \frac{\partial}{\partial z}(z-y^2) = \cosh(x-z) + 2 + 1 = \cosh(x-z) + 3;$$

$$\nabla \times \mathbf{F} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \sinh(x-z) & 2y & z-y^2 \end{vmatrix} = -2y\mathbf{i} - \cosh(x-z)\mathbf{j};$$

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) = \frac{\partial}{\partial x}(-2y) + \frac{\partial}{\partial y}(-\cosh(x-z)) + \frac{\partial}{\partial z}(0) = 0.$$

$$7. \nabla \phi = \nabla(x-y+2z^2) = \mathbf{i} - \mathbf{j} + 4z\mathbf{k}; \nabla \times (\nabla \phi) = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 1 & -1 & 4z \end{vmatrix} = 0.$$

$$8. \nabla \phi = \nabla(18xyz + e^x) = (18yz + e^x)\mathbf{i} + 18xz\mathbf{j} + 18xy\mathbf{k};$$

$$\nabla \times (\nabla \phi) = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 18yz + e^x & 18xz & 18xy \end{vmatrix} = \mathbf{i}(18x - 18x) + \mathbf{j}(18y - 18y) + \mathbf{k}(18z - 18z) = 0.$$

$$9. \nabla \phi = \nabla(-2x^3yz^2) = -6x^2yz^2\mathbf{i} - 2x^3z^2\mathbf{j} - 4x^3yz\mathbf{k};$$

$$\nabla \times (\nabla \phi) = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ -6x^2yz^2 & -2x^3z^2 & -4x^3yz \end{vmatrix} = (-4x^3z + 4x^3z)\mathbf{i} + (-12x^2yz + 12x^2yz)\mathbf{j} + (-6x^2z^2 + 6x^2z^2)\mathbf{k} = 0.$$

$$10. \nabla \phi = \nabla(\sin(xz)) = z \cos(xz)\mathbf{i} + x \cos(xz)\mathbf{k};$$

$$\nabla \times (\nabla \phi) = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ z \cos(xz) & 0 & x \cos(xz) \end{vmatrix} = 0\mathbf{i} + [\cos(xz) - xz \sin(xz) - \cos(xz) + xz \sin(xz)]\mathbf{j} + 0\mathbf{k} = 0.$$

$$11. \nabla \phi = \nabla(x \cos(x+y+z)) = [\cos(x+y+z) - x \sin(x+y+z)]\mathbf{i} - x \sin(x+y+z)\mathbf{j} - x \sin(x+y+z)\mathbf{k};$$

$$\nabla \times (\nabla \phi) = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \cos(x+y+z) - x \sin(x+y+z) & -x \sin(x+y+z) & -x \sin(x+y+z) \end{vmatrix} = [-x \cos(x+y+z) + x \cos(x+y+z)]\mathbf{i} + [-\sin(x+y+z) - x \cos(x+y+z) + \sin(x+y+z) + x \cos(x+y+z)]\mathbf{j} + [-\sin(x+y+z) - x \cos(x+y+z) + \sin(x+y+z) + x \cos(x+y+z)]\mathbf{k} = 0.$$

$$12. \nabla \phi = \nabla(e^{x+y+z}) = e^{x+y+z}(\mathbf{i} + \mathbf{j} + \mathbf{k});$$

$$\nabla \times (\nabla \phi) = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ e^{x+y+z} & e^{x+y+z} & e^{x+y+z} \end{vmatrix} = [e^{x+y+z} - e^{x+y+z}]\mathbf{i} + [e^{x+y+z} - e^{x+y+z}]\mathbf{j} + [e^{x+y+z} - e^{x+y+z}]\mathbf{k} = 0.$$

13. Let $\mathbf{F} = f_1(x, y, z)\mathbf{i} + f_2(x, y, z)\mathbf{j} + f_3(x, y, z)\mathbf{k}$. Then

$$\begin{aligned}\nabla \cdot (\phi\mathbf{F}) &= \nabla \cdot (\phi f_1\mathbf{i} + \phi f_2\mathbf{j} + \phi f_3\mathbf{k}) = \frac{\partial}{\partial x}(\phi f_1) + \frac{\partial}{\partial y}(\phi f_2) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z}(\phi f_3) = \left[\frac{\partial\phi}{\partial x}f_1 + \frac{\partial\phi}{\partial y}f_2 + \frac{\partial\phi}{\partial z}f_3 \right] + \phi \left(\frac{\partial f_1}{\partial x} + \frac{\partial f_2}{\partial y} + \frac{\partial f_3}{\partial z} \right)\end{aligned}$$

We now recognize this first term as $\nabla\phi \cdot \mathbf{F}$, and the second as $\phi(\nabla \cdot \mathbf{F})$, thus $\nabla \cdot (\phi\mathbf{F}) = \nabla\phi \cdot \mathbf{F} + \phi(\nabla \cdot \mathbf{F})$.

$$\text{Also } \nabla \times (\phi\mathbf{F}) = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \phi f_1 & \phi f_2 & \phi f_3 \end{vmatrix} =$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial y}(\phi f_3) - \frac{\partial}{\partial z}(\phi f_2) \right] \mathbf{i} + \left[\frac{\partial}{\partial z}(\phi f_1) - \frac{\partial}{\partial x}(\phi f_3) \right] \mathbf{j} + \left[\frac{\partial}{\partial x}(\phi f_2) - \frac{\partial}{\partial y}(\phi f_1) \right] \mathbf{k}.$$

To identify the above expression we apply the product rule to each term above and regroup as $\nabla \times (\phi\mathbf{F}) =$

$$[\phi_y f_3 - \phi_z f_2] \mathbf{i} + [\phi_z f_1 - \phi_x f_3] \mathbf{j} + [\phi_x f_2 - \phi_y f_1] \mathbf{k}$$

$$+ \phi \left\{ \left[\frac{\partial f_3}{\partial y} - \frac{\partial f_2}{\partial z} \right] \mathbf{i} + \left[\frac{\partial f_1}{\partial z} - \frac{\partial f_3}{\partial x} \right] \mathbf{j} + \left[\frac{\partial f_2}{\partial x} - \frac{\partial f_1}{\partial y} \right] \mathbf{k} \right\} = \nabla\phi \times \mathbf{F} + \phi(\nabla \times \mathbf{F}).$$

14. Since the expressions on each side of this identity are vectors, we establish the equality of the $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ components of the vectors on the left hand and right hand sides of the identity. Let $\mathbf{F} = f_1\mathbf{i} + f_2\mathbf{j} + f_3\mathbf{k}$ and $\mathbf{G} = g_1\mathbf{i} + g_2\mathbf{j} + g_3\mathbf{k}$, then $\mathbf{F} \cdot \mathbf{G} = f_1g_1 + f_2g_2 + f_3g_3$ and the \mathbf{i} component on the left hand side is $\frac{\partial}{\partial x}[f_1g_1 + f_2g_2 + f_3g_3]$. For the right side, we first compute $\mathbf{F} \times (\nabla \times \mathbf{G})$ and $\mathbf{G} \times (\nabla \times \mathbf{F})$ so we can identify the \mathbf{i} component of each. We have

$$\mathbf{F} \times (\nabla \times \mathbf{G}) = \mathbf{F} \times \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ g_1 & g_2 & g_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ f_1 & f_2 & f_3 \\ \left(\frac{\partial g_2}{\partial y} - \frac{\partial g_1}{\partial z} \right) & \left(\frac{\partial g_3}{\partial z} - \frac{\partial g_2}{\partial x} \right) & \left(\frac{\partial g_1}{\partial x} - \frac{\partial g_3}{\partial y} \right) \end{vmatrix}.$$

From this we easily get the \mathbf{i} component of

$$\mathbf{F} \times (\nabla \times \mathbf{G}) = \left[f_2 \left(\frac{\partial g_2}{\partial x} - \frac{\partial g_1}{\partial y} \right) - f_3 \left(\frac{\partial g_1}{\partial z} - \frac{\partial g_3}{\partial x} \right) \right] \mathbf{i},$$

and the \mathbf{i} component of $\mathbf{G} \times (\nabla \times \mathbf{F})$ is found by interchanging the letters f and g above. Thus the \mathbf{i} component on the right side is

$$\left[f_1 \frac{\partial g_1}{\partial x} + f_2 \frac{\partial g_1}{\partial y} + f_3 \frac{\partial g_1}{\partial z} \right] + \left[g_1 \frac{\partial f_1}{\partial x} + g_2 \frac{\partial f_1}{\partial y} + g_3 \frac{\partial f_1}{\partial z} \right] +$$

$$\left[f_2 \left(\frac{\partial g_2}{\partial x} - \frac{\partial g_1}{\partial y} \right) - f_3 \left(\frac{\partial g_1}{\partial z} - \frac{\partial g_3}{\partial x} \right) \right] + \left[g_2 \left(\frac{\partial f_2}{\partial x} - \frac{\partial f_1}{\partial y} \right) - g_3 \left(\frac{\partial f_1}{\partial z} - \frac{\partial f_3}{\partial x} \right) \right]$$

$$= f_1 \frac{\partial g_1}{\partial x} + g_1 \frac{\partial f_1}{\partial x} + f_2 \frac{\partial g_2}{\partial x} + g_2 \frac{\partial f_2}{\partial x} + f_3 \frac{\partial g_3}{\partial x} + g_3 \frac{\partial f_3}{\partial x}$$

where the other eight terms cancel. But this expression is exactly $\frac{\partial}{\partial x}(f_1 g_1 + f_2 g_2 + f_3 g_3)$. Thus the i components on the left and right are equal. Similarly the j, k components are equal.

15. Let $\mathbf{F} = f_1 \mathbf{i} + f_2 \mathbf{j} + f_3 \mathbf{k}$, and $\mathbf{G} = g_1 \mathbf{i} + g_2 \mathbf{j} + g_3 \mathbf{k}$. Then $\mathbf{F} \times \mathbf{G} = [f_2 g_3 - f_3 g_2] \mathbf{i} + [f_3 g_1 - f_1 g_3] \mathbf{j} + [f_1 g_2 - f_2 g_1] \mathbf{k}$, and $\nabla \cdot (\mathbf{F} \times \mathbf{G}) = \frac{\partial}{\partial x}[f_2 g_3 - f_3 g_2] + \frac{\partial}{\partial y}[f_3 g_1 - f_1 g_3] + \frac{\partial}{\partial z}[f_1 g_2 - f_2 g_1] = g_1 \left[\frac{\partial f_3}{\partial y} - \frac{\partial f_2}{\partial z} \right] + g_2 \left[\frac{\partial f_1}{\partial z} - \frac{\partial f_3}{\partial x} \right] + g_3 \left[\frac{\partial f_2}{\partial x} - \frac{\partial f_1}{\partial y} \right] + f_1 \left[\frac{\partial g_2}{\partial z} - \frac{\partial g_3}{\partial y} \right] + f_2 \left[\frac{\partial g_3}{\partial x} - \frac{\partial g_1}{\partial z} \right] + f_3 \left[\frac{\partial g_1}{\partial y} - \frac{\partial g_2}{\partial x} \right] = \mathbf{G} \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) - \mathbf{F} \cdot (\nabla \times \mathbf{G})$.

16. To prove the assertion here we apply Problem 15 to $\nabla \cdot (\nabla \phi \times \nabla \psi)$ where $\nabla \phi = \mathbf{F}$ and $\nabla \psi = \mathbf{G}$ to get $\nabla \cdot (\nabla \phi \times \nabla \psi) = \nabla \psi \cdot (\nabla \times \nabla \phi) - \nabla \phi \cdot (\nabla \times \nabla \psi)$. By Theorem 1, $\nabla \times \nabla \phi = \mathbf{0}$ and $\nabla \times \nabla \psi = \mathbf{0}$ which gives the conclusion $\nabla \cdot (\nabla \phi \times \nabla \psi) = \nabla \psi \cdot \mathbf{0} + \nabla \phi \cdot \mathbf{0} = 0$. The application of Theorem 1 here assumes the continuity (and hence equality) of mixed second order partials.

Ref: Peter O'Neil Advanced Engineering Mathematics Sixth Edition – Chapter 12.5

3 BOYUTLU DALGA DENKLEMİ

Küresel Akustik Dalgalar (Spherical Acoustic Waves)

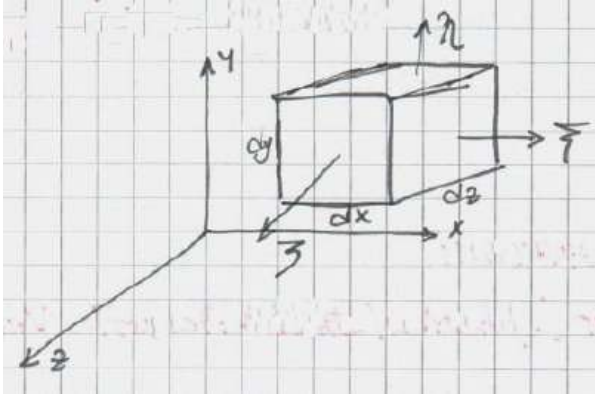
$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ ve $\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}$ basit olmasına rağmen ne yazık ki az sayıda sisteme uygulanabilmektedir. Bilindiği gibi bu denklemler yüzey akustik dalgaları için elde edilmişti (2 boyut için). Fakat ses normalde küresel olarak yayılır. Alan arttıkça basıncın genliğinde bir azalma meydana gelir. O halde bizim her duruma uyan genel bir denklem elde etmemiz gerekmektedir. Böyle bir denklem küresel koordinatlarda elde edilebilir. Bu denklemin elde edilmesi için çok değişik metodlar kaynak kitaplarda mevcuttur. Bu metodların bazıları basit görünmekte bazıları ise çok karmaşık şekilde açıklanmıştır. Buna rağmen bütün metodlar temel olarak 3 denklemin üzerine kurulmuştur.

1. Devamlılık denklemi
2. Elastiklik denklemi
3. Kuvvet denklemi

Bütün çıkarımda kullanılan kabuller;

- Yoğunluk değişiminin çok küçük olması
- Partikül yer değiştirmesinin çok küçük olması
- Partikül hızlarının ve genliklerinin küçük olmasıdır.

Genel Dalga Denklemi



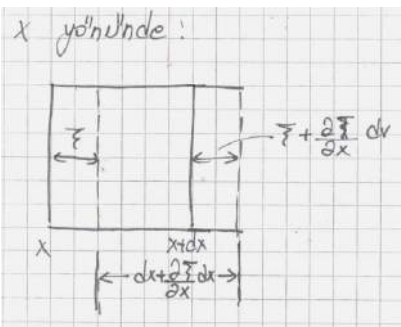
Yerdeğiştirme vektörünün x, y ve z yönündeki bileşenleri sırası ile; ξ , η ve ζ olsun. (Yer değiştirme vektörü \underline{d}). Hız bileşenleri :

$$u = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad x \text{ yönünde hız}$$

$$v = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad y \text{ yönünde hız}$$

$$w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad z \text{ yönünde hız}$$

Yüzey dalga denkleminin elde edilmesinde hatırlanacağı üzere, şekilde görülen element üzerine her yönden bir ses dalgası geldiği düşünülürse elemanın artan hacmi şöyle hesaplanır:



x yönünde değişim $dx(1 + \frac{\partial \xi}{\partial x})$ olur. Benzer şekilde

y yönünde değişim $dy + \frac{\partial \eta}{\partial y} dy = dy(1 + \frac{\partial \eta}{\partial y})$

z yönünde değişim $dz + \frac{\partial \zeta}{\partial z} dz = dz(1 + \frac{\partial \zeta}{\partial z})$ dır. Dolayısıyla bu değişimden sonra hacim:

$$V = \left[dx(1 + \frac{\partial \xi}{\partial x}) \right] \left[dy(1 + \frac{\partial \eta}{\partial y}) \right] \left[dz(1 + \frac{\partial \zeta}{\partial z}) \right]$$

dir. Kütlelerin sabit olduğu düşünülürse;

$$\rho_0 dx dy dz = \rho dx dy dz (1 + \frac{\partial \xi}{\partial x})(1 + \frac{\partial \eta}{\partial y})(1 + \frac{\partial \zeta}{\partial z})$$

Şayet:

$$s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \Rightarrow \rho_0(1 + s) = \rho \quad (\text{herhangi bir noktadaki yoğunlaşma})$$

$$\rho_0 = \rho_0(1 + s)(1 + \frac{\partial \xi}{\partial x})(1 + \frac{\partial \eta}{\partial y})(1 + \frac{\partial \zeta}{\partial z})$$

Şayet kütlelerimiz sabit ise:

$$(1 + s)(1 + \frac{\partial \xi}{\partial x})(1 + \frac{\partial \eta}{\partial y})(1 + \frac{\partial \zeta}{\partial z}) = 1 \quad \text{Bu düzenlenirse;}$$

$$(1 + s) \left[1 + \frac{\partial \zeta}{\partial z} + \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial z} + \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial z} + \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial z} \right] = 1$$

$$(1 + s) \left[1 + \frac{\partial \zeta}{\partial z} + \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial z} \overset{\approx 0}{\cancel{\frac{\partial \xi}{\partial x}}} + \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial z} \overset{\approx 0}{\cancel{+}} \frac{\partial \eta}{\partial y} \overset{\approx 0}{\cancel{+}} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial z} \overset{\approx 0}{\cancel{+}} \right] = 1$$

$$\Rightarrow (1 + s) \left[1 + \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial z} \right] = 1$$

$$1 + \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial z} + s + s \frac{\partial \xi}{\partial x} + s \frac{\partial \eta}{\partial y} + s \frac{\partial \zeta}{\partial z} \Rightarrow 1$$

$$\boxed{s = - \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial z} \right)}$$

elde edilir. Bu eşitlik hidrodinamiğin “devamlılık eşitliğini” 3 boyutlu halidir. Bu eşitliği vektör formunda yazarsak

$$s = -\nabla d$$

Biliyoruz ki;

$$P = \rho_0 c^2 s \Rightarrow P = -\rho_0 c^2 (\nabla d) \text{ idi.}$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$$
$$\underline{d} = [\xi, \eta, \zeta]$$

Şimdi, incelediğimiz elemanın yüzeylerine etkiyen basınçların farkından dolayı oluşan kuvvetler dikkate alınırsa:

$$F = ma$$

$$\Rightarrow dF_x = \left[P - \left(P + \frac{\partial P}{\partial x} dx \right) \right] dydz = -\frac{\partial P}{\partial x} dx dy dz$$

$$\Rightarrow -\frac{\partial P}{\partial x} dx dy dz = \rho_0 dx dy dz \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

$$\boxed{-\frac{\partial P}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}}$$

Benzer şekilde;

$$\boxed{-\frac{\partial P}{\partial y} = \rho_0 \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2}}$$

$$\boxed{-\frac{\partial P}{\partial z} = \rho_0 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2}}$$

$$-\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \rho_0 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \right) = \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)$$

$$-\frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \rho_0 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} \right) = \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)$$

$$-\frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \rho_0 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} \right) = \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial \zeta}{\partial z} \right)$$

$$\boxed{-\left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) = \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial z} \right)}$$

Bu denklem vektör formunda yazılacak olursa:

$$\boxed{\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}}$$

$$\boxed{-\nabla^2 P = \rho_0 \frac{\partial^2 (\nabla \underline{d})}{\partial t^2}}$$

$$P = -\rho_0 c^2 (\nabla \underline{d}) \Rightarrow (\nabla \cdot \underline{d}) = -\frac{P}{\rho_0 c^2}$$

$$-\nabla^2 P = \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(-\frac{P}{\rho_0 c^2} \right)$$

$$-\nabla^2 P = -\frac{\rho_0}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \Rightarrow \nabla^2 P = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 P}$$

Bu denklem "genel akustik dalga" denklemdir. Dikkat edilirse şayet P yalnızca x yönünde değişiyorsa;

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right)$$

$$\boxed{\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}}$$

(Bu tek boyutlu dalga denklemdir.)

SİLİNDİRİK KOORDİNATLARDA DALGA DENKLEMİNİN BULUNMASI

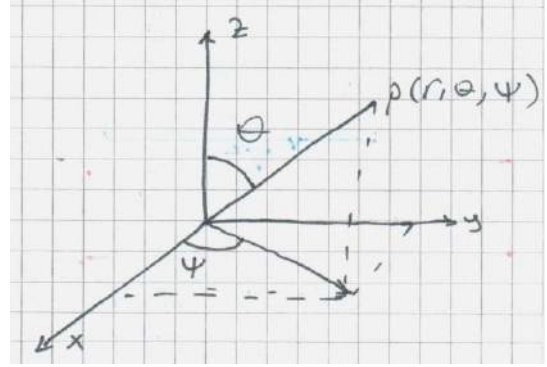
Bu durumda dalga denklemini küresel koordinatlarda incelemek büyük kolaylıklar sağlar. Laplace operatörü aşağıdaki gibi seçilirse:

$$\begin{aligned}\nabla^2 &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \\ \nabla^2 &= \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2\partial}{r\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} \left(\sin\theta \frac{\partial}{\partial\theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2\theta} \frac{\partial^2}{\partial\psi^2}\end{aligned}$$

} Laplace operatörü

$$\begin{aligned}x &= r \sin\theta \cos\psi \\ y &= r \sin\theta \sin\psi \\ z &= r \cos\theta\end{aligned}$$

Şayet incelediğimiz dalga küresel olarak incelenirse; akustik basınç $p=p(r,t)$ radyal mesafenin ve zamanın bir fonksiyonu olmasına rağmen; açısal koordinatlar olan θ ve ψ 'nin fonksiyonu değilse



$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2\partial}{r\partial r}$$

olur. Bu durumda genel dalga denklemi

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial P}{\partial r} \right) \quad \text{ya da} \quad \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 (rP)}{\partial r^2} \right)$$

olur. Bunun ispatı yapılırsa;

$$\frac{2}{r} + \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} = \frac{1}{r} \left[\frac{2}{r} \frac{\partial P}{\partial r} + r \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} \right] = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial P}{\partial r} + r \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} \right]$$

$$= \frac{1}{r} \left[\frac{\partial r}{\partial r} + P + r \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} \right] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\partial (rP)}{\partial r} \right]$$

$$= \frac{1}{r} \frac{\partial^2 (rP)}{\partial r^2}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 (rP)}{\partial r^2} \right)$$

r: uzaysal bir koordinat olup zamana göre değişmediğinden, yani zamana göre sabit olduğundan

$$r \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 (rP)}{\partial r^2} \Rightarrow \frac{\partial^2 (rP)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 (rP)}{\partial r^2}$$

Buradaki rP tek değişken gibi işlem görürse bu denklem tek boyutlu dalga denklemi gibi olur. Dolayısıyla bunun genel çözümü;

$$rP = f_1(ct - r) + f_2(ct + r)$$

veya

$$P = \frac{1}{r} f_1(ct - r) + \frac{1}{r} f_2(ct + r)$$

Bu denklemdeki ilk terim kaynaktan uzaklaşan bir ses dalgasını, ikinci terim ise kaynağa yaklaşan bir ses dalgasını belirler. Kaynağa yaklaşan dalgalar akustikte çok önemli değildir ve üzerinde fazla durulmayacaktır. Fakat dikkat edilmesi gereken nokta kaynağın merkezinde r sıfır olduğundan denklem sonsuz basınç tahmin eder. Pratikte bu değer sonsuz olmamakla birlikte çok büyüktür.

Daha önce de görüldüğü gibi basıncın eğimi $\left(-\frac{\partial P}{\partial x}\right)$ 'nin (-) değeri belirli yöndeki partikül ivmesine orantılıdır. Yani;

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

Benzer şekilde küresel dalgalar için radyal basınç eğimi radyal ivme ile aynı şekilde bağlantılı olduğundan

$$-\frac{\partial P}{\partial r} = \rho \frac{\partial^2 \mu}{\partial t^2}$$

gösterilebilir (μ : radyal partikül yerdeğiştirmesi).

Şayet bu denklem zamana göre integre edilirse;

$$u = \frac{\partial \mu}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \int \frac{\partial P}{\partial r} dt \quad (u: \text{radyal partikül hızı})$$

Bu denklem partikül hızı ile akustik basınç ilişkisini veren genel denklemdir.

Şayet $P = P e^{i\omega t}$ gibi bir şekilde ise:

$$u = -\frac{1}{\rho_0} \int \frac{\partial P}{\partial r} dt = -\frac{1}{\rho_0} \int \frac{\partial}{\partial r} (P e^{i\omega t}) dt$$

$$\Rightarrow u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial r} \left[\int (P e^{i\omega t}) dt \right] = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{i\omega} P e^{i\omega t} \right]$$

$$\Rightarrow u = \frac{1}{i\omega\rho_0} \frac{\partial}{\partial r} [Pe^{i\omega t}] = -\frac{1}{i\omega\rho_0} \frac{\partial P}{\partial r}$$

$$\boxed{\Rightarrow \underline{u} = -\frac{1}{i\omega\rho_0} \frac{\partial P}{\partial r}}$$

Bu denklem zamana göre integre edilirse

$$\mu = t \int u dt = t \frac{u}{i\omega} = \frac{t}{\omega^2 \rho_0} \frac{\partial P}{\partial r}$$

BÖLÜM IV DALGA DENKLEMİNİN ÇÖZÜMLENMESİ

DALGA DENKLEMİNİN AYRIŞTIRMA METODU İLE ÇÖZÜLMESİ

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \rightarrow \text{Genel Dalga Denklemi}$$

Halat iki ucundan asılmış olduğundan

$$u(0, t) = 0 \quad U(l, t) = 0$$



Başlangıç yerdeğiştirme : $U(x, 0) = f(x)$

Başlangıç hızı : $\frac{\partial U}{\partial t} \Big|_{t=0} = g(x)$

Ayrıştırma Metodunun Uygulanması;

$$U(x, t) = F(x) \cdot G(t)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = F(x) \cdot \ddot{G}(t)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \ddot{F}(x) \cdot G(t)$$

Dalga denklemlerinde yerine konursa;

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{c^2 \partial^2 U}{\partial t^2} \rightarrow F \ddot{G} = c^2 \ddot{F} G$$
$$\frac{\ddot{G}}{c^2 G} = \frac{\ddot{F}}{F}$$

Yukarıdaki eşitlik bir şekilde sabit olmalı. Aksi takdirde herhangi bir "x" veya "t" değişiminde eşitliğin bir yanı değişirken diğer yanı sabit kalacaktır. Bu sabite "k" dersek ;

$$\frac{\ddot{G}}{c^2 G} = \frac{\ddot{F}}{F} = k$$
$$\ddot{G} - kc^2 G = 0 \quad \text{ve} \quad \ddot{F} - kF = 0$$

Bu iki lineer differansiyel denklemin çözümü sağlanacak olursa ;

$$\left. \begin{array}{l} U(0, t) = F(0) \cdot G(t) = 0 \\ U(l, t) = F(l) \cdot G(t) = 0 \\ \text{Şayet } G(t) = 0 \end{array} \right\} \text{Sınır şartları}$$

ise denklik sağlanır, fakat bu bizim ilgi alanımızda olmadığından

$$F(0) = 0 \quad \text{ve} \quad F(l) = 0$$
$$\ddot{F} - kF = 0$$

Eğer $k = 0$ olursa, bu denklemin çözümü $F = ax + b$ ve sınır şartlarında $a = b = 0$ çıkar ki bu durumda $U \equiv 0$ sonucunda ulaşılır. Bu bizim için çözüm değildir. O halde;

$k = \mu^2$ için yukarıdaki denklem çözümü;

$$F = A.e^{\mu x} + B.e^{-\mu x}$$

Bu durumda da $A = B = 0 \rightarrow F = 0$ çıkar. O halde elimizde yalnızca $k = -p^2$ için olan çözüm kalıyor.

$$\ddot{F} + p^2 F = 0$$

$$F(0) = A = 0; F(l) = B.\sin pl = 0$$

$B \neq 0$ [Öbür türlü $F = 0$] Dolayısıyla **$\sin pl = 0$**

$$\text{Yani } pl = n\pi \rightarrow p = \frac{n\pi}{l} \quad (n = 1, 2, 3 \dots)$$

Şayet $B = 1$ kabul edilirse, sonsuz tane çözüm elde edilir.

$$F(x) = F_n(x) = \sin \frac{n\pi}{l} x \quad (n = 1, 2, 3 \dots)$$

NOT: Şimdi k şu şekilde sınırlandı ; $k = -p^2 = -\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2$

$$\ddot{G} + \lambda_n^2 G = 0 \quad \lambda_n = \frac{c.n.\pi}{l}$$

Bu denklemin genel çözümü ;

$$G_n(t) = B_n \cos \lambda_n t + B_n^* \sin \lambda_n t$$

$$U_n(x, t) = (B_n \cos \lambda_n t + B_n^* \sin \lambda_n t) \sin \frac{n\pi}{l} x \quad [n = 1, 2, 3 \dots]$$

Buna eigen fonksiyonu veya karakteristik fonksiyonlar denir.

$\lambda_n = c \frac{n\pi}{l}$ ise eigen values veya karakteristik değerler denir.

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots$ İse spektrumlar denir.

Burada U_n 'in harmonik osilasyonu verdiği görülecektir.

Frekans $\frac{\lambda_n}{2\pi} = \frac{cn}{2l} \left[\frac{l}{2} \right]$ Bu moda n'inci normal mode denir.

Birinci mode normalde temel mode olarak belirtilir.

$$\sin \frac{n\pi}{l} x = 0 \quad x = \frac{l}{n}, \frac{2l}{n} \dots \dots \dots \frac{(n-1)l}{n}$$

Bu yüzden n'inci mode n-1 tane düğüm noktasına sahip yani bu noktalar hiç hareket etmez.

$$U(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} (B_n \cos n_n + B_n^* \lambda_n t) \sin \frac{n\pi}{l} x$$

$$U(x, 0) = \sum_{N=1}^{\infty} B_n \frac{n\pi}{l} x = f(x)$$

Bunu sağlayabilmek için;

$$B_n = \frac{2}{l} \int_0^l f(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} \Big|_{t=0} &= \left[\sum_{n=1}^{\infty} (-B_n \lambda_n \sin \lambda_n t + B_n^* \lambda_n \cos \lambda_n t) \sin \frac{n\pi x}{l} \right]_{t=0} \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} B_n^* \lambda_n \sin \frac{n\pi x}{l} = g(x) \end{aligned}$$

Bunu sağlamak için;

$$B_n^* \lambda_n = \frac{2}{l} \int_0^l g(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx$$

$$\lambda_n = \frac{cn\pi}{l}$$

$$B_n^* = \frac{2}{cn\pi} \int_0^l g(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx \quad n = 1, 2, 3 \dots \dots$$

Bu problemin basitleştirilmesi için başlangıç hızının "0" (sıfır) olduğu kabul edilirse,

$B_n^* = 0$ olur. Böylece;

$$U(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos \lambda_n \sin \frac{n\pi x}{l} \quad \cos a \cos b = \frac{1}{2} [\sin(a + b) + \sin(axb)]$$

$$\cos \frac{cn\pi}{l} t \cdot \sin \frac{n\pi}{l} = \frac{1}{2} \left[\sin \left\{ \frac{n\pi}{l} (x - ct) \right\} + \sin \left\{ \frac{n\pi}{l} (x + ct) \right\} \right]$$

$$U(x, t) = \frac{1}{2} [f^*(x - ct) + f^*(x + ct)]$$

Burada ilk terim ($f^*(x - ct)$) kaynaktan uzaklaşan bir ses dalgasını, ikinci terim ($f^*(x + ct)$) ise kaynağa yaklaşan bir ses dalgasını belirler.

DALGA DENKLEMİNİN D'ALAMBERT METODU İLE ÇÖZÜLMESİ

D'Alambert çözümü ayrıştırma metoduna göre çok daha basittir.

Hatırlanacağı üzere genel dalga denklemi;

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$$

Şayet iki tane değişken kullanılırsa;

$$V = x + ct \quad \text{ve} \quad Z = x - ct$$

Bu durumda U hem v'ye hem de z'ye bağlı bir değişken olur. Şayet diferansiyelleri alınırsa (x'e bağlı)

$$V_x = 1 \quad \text{ve} \quad z_x = 1 \quad V_x = \frac{dV}{dx} \quad Z_x = \frac{dz}{dx} \quad U_x = \frac{dU}{dx}$$

$$U_x = U_v V_x + U_z Z_x = U_v + U_z$$

Tekrar diferansiyel alınırsa

$$U_{xx} = (U_v + U_z)_x = (U_v + U_z)_v U_x + (U_v + U_z)_z Z_x$$

$$= U_{vv} + U_{zv} + U_{vz} + U_{zz}$$

$$\rightarrow U_{xx} = U_{vv} + 2U_{vz} + U_{zz}$$

Aynı şekilde t için uygulanan diferansiyeller sonucu

$$U_{tt} = c^2(U_{vv} - 2U_{vz} + U_{zz})$$

Bunları yerine koyarsak

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$$

$$c^2(U_{vv} - 2U_{vz} + U_{zz}) = c^2(U_{vv} - 2U_{vz} + U_{zz})$$

$$\rightarrow U_{vz} = \frac{\partial^2 U}{\partial v \partial z} = 0 \quad \text{Bu denklem kolayca çözülebilir.}$$

[D'Alambert's Solution → Jean Le Rond D'Alembert (1717-1785) Fransız matematikçi ve fizikçi]

$$\int_0^z \frac{\partial^2 U}{\partial v \partial z} = \frac{\partial U}{\partial V} = h(V)$$

$$U = \int_0^U \frac{\partial U}{\partial V} = \int h(v) \partial V + \psi(z)$$

Sonuçta $U = \mathbb{F}(v) + \psi(z)$

$$U(x, t) = \mathbb{F}(x + ct) + \psi(x - ct)$$

Buradaki ϕ ve ψ fonksiyonları başlangıç şartlarından tesbit edilebilir.

Mesela; başlangıç hızı 0 ise ve başlangıç yerdeğiştirmesi $U(x, 0) = f(x)$ olacaktır.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = c\phi'(x + ct) - c\psi'(x - ct)$$

$$\text{Başlangıçta: } U(x, 0) = \phi(x) + \psi(x) = f(x)$$

$$U_t(x, 0) = c\phi'(x) - c\psi'(x) = 0$$

$$\rightarrow \phi'(x) = \psi'(x)$$

$$\rightarrow \psi = \phi + K$$

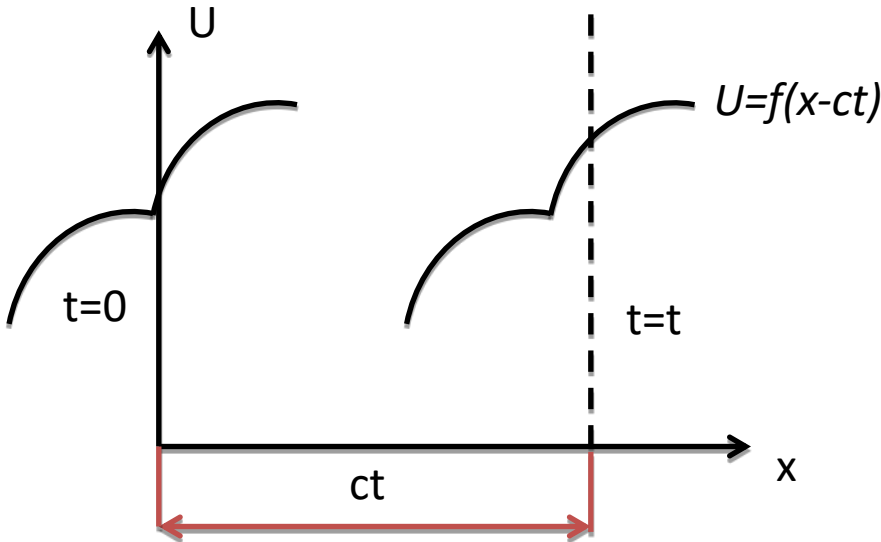
$$\psi + \phi = f \rightarrow 2\phi + k = f \rightarrow \phi = \frac{f - k}{2}$$

$$\rightarrow \psi = \frac{f - k}{2} + k = \frac{f + k}{2}$$

$$U(x, t) = \phi(x + ct) + \psi(x - ct)$$

$$U(x, t) = \frac{1}{2}[f(x + ct) + f(x - ct)] + \frac{k}{2} - \frac{k}{2}$$

$$U(x, t) = \frac{1}{2}[f(x + ct) + f(x - ct)]$$



$$u = \underline{A}e^{i(\omega t - kx)} + \underline{B}e^{i(\omega t + kx)}$$

$$[e^{\pm i\theta} = \cos \theta \pm i \sin \theta] \rightarrow \text{Euler Açılımı}$$

$$U = \underline{A} \cos(\omega t - kx) + \underline{B} \sin(\omega t - kx) + \underline{C} \cos(\omega t + kx) + \underline{D} \sin(\omega t + kx)$$

$$U(x, t) = a_1 \sin(\omega t - kx) + a_2 \sin(\omega t + kx) + b_1 \cos(\omega t - kx) + b_2 \cos(\omega t + kx)$$

Burada a_1, a_2, b_1, b_2 keyfi sabitlerdir.

→ Ses dalgalarının analizinde karşılaşılan başka bir sabit ise dalga numarası k 'dır.

$$k = \frac{2\pi}{\Lambda} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{\omega}{c}$$

$$\Lambda = \frac{c}{f} = \frac{c\pi}{2}$$

Şayet halatın bir ucu iyice sabitleşmişse:

$$x = 0$$

$$0 = (a_1 + a_2) \sin \omega t + (b_1 + b_2) \cos \omega t$$

Bunun gerçekleşmesi için $a_1 = -a_2$ ve $b_1 = -b_2$ olması gerekir.

$$\rightarrow y = a_1 [\sin(\overline{\omega t} - kx) - \sin(\overline{\omega t} + kx)] + b_1 [\cos(\overline{\omega t} - kx) - \cos(\overline{\omega t} + kx)]$$

Bu denklem sonuçta:

$$y = [-2a_1 \cos \omega t + 2b_1 \sin \omega t] \sin kx$$

DALGA DENKLEMİNİN FOURİER SERİSİ İLE ÇÖZÜMÜ

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

Genel denklemi ile tanımlanan dalga denkleminin sınır değeri (1) ve başlangıç şartları (2,3) ile Fourier serisini kullanarak çözüm üretilebilir. En temel gözlem $t \geq 0$ daki bütün noktalarda x bilinmeyen $u(x,t)$ fonksiyonu $x=0$ ve $x=l$ de sıfırdır. Böylece Fourier teoremi ve odd periodic extension trick sayesinde $u(x,t)$ her t anında açılımına sahip olur.

$$0 < x < l \text{ ve } t > 0 \quad (1)$$

$$u(0, t) = 0 \text{ bütün } t > 0 \quad (2)$$

$$u(l, t) = 0 \text{ bütün } t > 0 \quad (3)$$

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n(t) \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (4)$$

Even periodic extension gibi diğer periodic extensionlar sayesinde de $u(x,t)$ diğer açılımlarını elde edebiliriz. Fakat odd periodic extension (4) daha kullanışlıdır, çünkü (2,3) sınır koşulları yeterli olacaktır. Denklem 4 de sağ tarafa $x=0$ yazarsak $b_n(t)$ nin her değeri için sıfır almak zorunda kalırız. Çünkü $\sin(0)=0$. Benzer olarak $x=l$ yazılırsa da $\sin(n\pi)=0$ olacağından yine değeri sıfır olmak zorunda kalırız.

$u(x,t)$ 'nin çözümü her $b_n(t)$ değeri için kararlı olacaktır.

$$u(x, 0) = f(x) \text{ for all } 0 < x < l \quad (6)$$

$$u_t(x, 0) = g(x) \text{ for all } 0 < x < l \quad (7)$$

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} - C^2 \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = \sum_{n=1}^{\infty} b_n''(t) \sin \frac{n\pi x}{l} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^2 \pi^2 c^2}{l^2} b_n(t) \sin \frac{n\pi x}{l} \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \left[b_n''(t) + \frac{k^2 \pi^2 c^2}{l^2} b_n(t) \right] \sin \frac{n\pi x}{l} \end{aligned}$$

Bütün k ve l için:

$$b_n''(t) + \frac{k^2 \pi^2 c^2}{l^2} b_n(t) = 0 \quad (1')$$

(6) ve (7) den faydalanarak:

$$u(0, t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n(t) \sin \frac{n\pi x}{l} = f(x)$$

$$\frac{\partial u(0, t)}{\partial t} = \sum_{n=1}^{\infty} b_n'(t) \sin \frac{n\pi x}{l} = g(x)$$

Fourier katsayısının benzersizliği ile

$$b_n(0) = \frac{l}{2} \int_0^l f(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx$$

$$b_n'(0) = \frac{l}{2} \int_0^l g(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx$$

(1') Adi diferansiyel denkleminin çözümünü aşağıdaki şartlar sağlanıyorsa $b_n(t) = e^{rt}$ le sağlanabilir.

$$\rightarrow r^2 + \frac{n^2\pi^2 c^2}{l^2} = 0 \rightarrow r = \pm i \frac{n\pi c}{l} = 0 \rightarrow b_n(t) = e^{rt}$$

C_n ve D_n keyfi değerler olmak üzere genel çözüm

$$b_n(t) = C_n e^{i \frac{n\pi c}{l} t} + D_n e^{-i \frac{n\pi c}{l} t}$$

$e^{\pm i \frac{n\pi c}{l} t} = \cos\left(\frac{n\pi c}{l} t\right) \pm i \sin\left(\frac{n\pi c}{l} t\right)$ Eşitliği kullanarak denklemin tekrar yazarsak ($B_n = C_n + D_n$, $B_n^* = iC_n - iD_n$ keyfi sabitler.):

$$b_n(t) = B_n \cos\left(\frac{n\pi c}{l} t\right) + B_n^* \sin\left(\frac{n\pi c}{l} t\right)$$

$$\rightarrow b_n(0) = 0 = B_n = \frac{l}{2} \int_0^l f(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx$$

$$\rightarrow C \rightarrow B_n^* = \frac{2}{n\pi c} \int_0^l g(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx$$

$$U(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} (B_n \cos \lambda_n t + B_n^* \sin \lambda_n t) \sin \frac{n\pi}{l} x$$

Örnekler:

Soru 1: Çok bilinen bir dalga denkleminin sorusu

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}(x, t) = C^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}(x, t) \quad \text{bütün } 0 < x < l \quad t > 0$$

$$u(0, t) = u(l, t) = 0 \quad \text{bütün } t > 0$$

$$u(x, 0) = x(1 - x) \quad \text{bütün } 0 < x < l$$

$$u_t(x, 0) = 0 \quad \text{bütün } 0 < x < l$$

Çözüm 1: Sınır ve başlangıç şartlarından $f(x) = x(1 - x)$ ve $g(x) = 0 \quad l = 1$

$$u(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \sin(n\pi x) (B_n \cos(cn\pi t) + B_n^* \sin \lambda_n t) \sin \frac{n\pi}{l} x$$

$$B_n = \frac{l}{2} \int_0^l x(1 - x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx \quad B_n^* = \frac{2}{n\pi c} \int_0^l 0 \sin n\pi x dx$$

$$B_n = \frac{l}{2} \int_0^l x(1 - x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx = \frac{4}{n^3 \pi^3} [1 - \cos(n\pi)]$$

\rightarrow

$$u(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{n^3 \pi^3} \sin(n\pi x) \cos(cn\pi t)$$

Soru 2: Çok bilinen bir diğer dalga denklemi sorusu:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}(x, t) &= C^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}(x, t) && \text{bütün } 0 < x < 1 \text{ } t > 0 \\ u(0, t) &= u(1, t) = 0 && \text{bütün } t > 0 \\ u(x, 0) &= \sin(5\pi x) + 2\sin(7\pi x) && \text{bütün } 0 < x < 1 \\ u_t(x, 0) &= 0 && \text{bütün } 0 < x < 1\end{aligned}$$

Çözüm 1:

$$u(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \sin(n\pi x) (B_n \cos(cn\pi t) + B_n^* \sin(\lambda_n t)) \sin \frac{n\pi}{l} x$$

Bu seferlik integral yöntemi ile B_n ve B_n^* bulmak için verimsiz bir yöntem.

$$\sin(5\pi x) + 2\sin(7\pi x) = u(x, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\pi x) \rightarrow \begin{cases} 1 & \text{eğer } n = 5 \\ 2 & \text{eğer } n = 7 \\ 3 & \text{eğer } n \neq 5, 7 \end{cases}$$

$$0 = u_t(x, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} cn\pi B_n^* \sin(n\pi x) \rightarrow B_n^* = 0$$

$$u(x, y) = \sin(5\pi x) \cos(c\pi t) + 2 \sin(7\pi x) \cos(7c\pi t)$$

V. HARMONİK KÜRESEL DALGALAR

Merkezden yayılan küresel dalgaların en önemlisi titreşimleri harmonik olanlardır. Böyle bir dalga kompleks olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\underline{p} = \frac{A}{r} e^{i(\omega t - kr)}$$

Daha önce bulunmuş olan denklikler kullanılarak önemli akustik değişkenler şu şekilde ifade edilebilir;

$$\underline{p} = s \rho_0 c^2$$

$$s = \frac{S}{\rho_0 c^2}$$

$$\underline{u} = \frac{\partial \mu}{\partial t} = -\frac{1}{i\omega \rho_0} \frac{\partial \underline{p}}{\partial r} = \frac{ik}{i\omega \rho_0} \underline{p}$$

Buna göre,

$$\underline{u} = \left(\frac{1}{r} + jk \right) \frac{\underline{p}}{i\omega \rho_0}$$

$$\mu = \frac{1}{\omega^2 \rho_0} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{A}{r} e^{i(\omega t - kr)} \right)$$

$$\mu = \frac{1}{\omega^2 \rho_0} \left[A \left(-\frac{1}{r^2} \right) e^{i(\omega t - kr)} - \frac{iAk}{r} e^{i(\omega t - kr)} \right]$$

$$\mu = -\frac{1}{\omega^2 \rho_0} \left[\frac{1}{r} + ik \right] \frac{A}{r} e^{i(\omega t - kr)}$$

$$\mu = -\left(\frac{1}{r} + jk \right) \frac{\underline{p}}{\omega^2 \rho_0}$$

Görüldüğü gibi bu önemli akustik değişkenler akustik basıncın, \underline{p} , bir fonksiyonu olarak elde edilebilirler.

$$\underline{u} = \left(\frac{1}{r} + jk \right) \frac{\underline{p}}{i\omega \rho_0}$$

denkliğinden görüldüğü gibi partikül hızı, akustik basınç ile her zaman aynı fazda değildir.

$$\frac{\underline{p}}{\underline{u}} = \frac{i\omega\rho_0}{\frac{1}{r} + ik} = \frac{i\omega\rho_0 r}{1 + ikr} = \frac{i\omega\rho_0 r(1 - ikr)}{1 + k^2 r^2}$$

$$\frac{\underline{p}}{\underline{u}} = \frac{i\omega\rho_0 r + k\omega\rho_0 r^2}{1 + k^2 r^2} = \omega\rho_0 kr \frac{\left(\frac{i}{k} + r\right)}{1 + k^2 r^2}$$

$$\frac{\underline{p}}{\underline{u}} = \omega\rho_0 \frac{1}{k} \frac{kr(rk + i)}{1 + k^2 r^2} = \frac{\omega}{k} \rho_0 \frac{kr(rk + i)}{1 + k^2 r^2}$$

burada,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\frac{c}{f}} = \frac{\omega}{c}$$

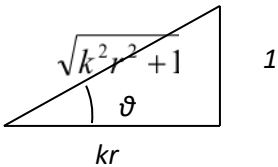
dir. Buna göre,

$$\frac{\underline{p}}{\underline{u}} = \rho_0 c \frac{kr(rk + i)}{1 + k^2 r^2}$$

olacaktır. Son ifade için Şekil 1 göz önünde bulundurularak,

$$\frac{(rk + i)}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} = \frac{kr}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} + \frac{i}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} = \cos \theta + i \sin \theta = e^{i\theta}$$

ifadesi elde edilir.

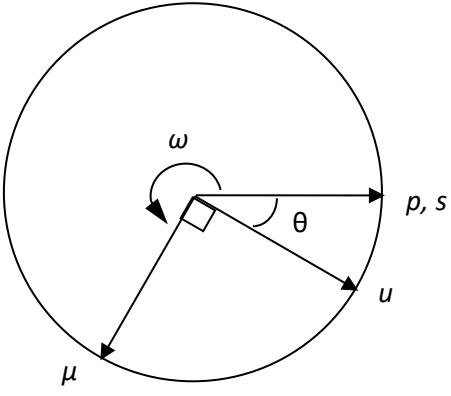


Şekil 1.

Buna göre,

$$\frac{\underline{p}}{\underline{u}} = \frac{\rho_0 ckr}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} e^{i\theta}$$

ifadesi elde edilir. Burada $\tan\theta = 1/kr$ dir.



Şekil 2.

Görüldüğü gibi basınç değişimi, p , ve yoğunlaşma, s , partikül hızının θ faz açısı kadar önündedir ve partikül hızı, önündedir ve partikül hızı, u , ile yer değiştirme, μ , arasında 90° faz farkı vardır.

$$kr = \frac{2\pi}{\lambda} r$$

olduğundan, faz farkı, kaynak mesafesinin dalga boyuna oranının bir fonksiyonu durumundadır.

ÖZGÜN (SPECIFIC) AKUSTİK EMPEDANS [Z]

$$Z = \frac{\text{Akustik basınç}}{\text{Partikül hızı}} = \frac{p}{u}$$

şeklinde tanımlanır.

$$\underline{Z} = \frac{p}{u} = \rho_0 c \frac{kr(rk + i)}{1 + k^2 r^2}$$

$$\underline{Z} = \rho_0 c \frac{k^2 r^2}{1 + k^2 r^2} + i \rho_0 c \frac{kr}{1 + k^2 r^2}$$

$$\underline{Z} = R + iI$$

Bu denklemin ilk terimi özgün akustik direnç (specific acoustic resistance), ikinci terimi ise özgün akustik algılama (specific acoustic reactance) olarak bilinir. Denkleminde de görüldüğü gibi kr sifira yaklaşırsa hem direnç hem de algılama sifira yaklaşır. Fakat kr büyük değerler alırsa algılama sifira yaklaşırken direnç $\rho_0 c$ 'ye yaklaşacaktır. kr , 1'e eşit olduğunda ise her iki terim de $\rho_0 c/2$ olacaktır.

\underline{Z} 'nin mutlak değeri Z , basıncın genliğinin partikül hızının genliğine oranı olacaktır.

$$\underline{Z} = \frac{p}{u} = \rho_0 c \frac{kr}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} e^{i\theta}$$

$$Z = \frac{P}{U} = \rho_0 c \frac{kr}{\sqrt{1 + k^2 r^2}}$$

Şekil 1 göz önünde bulundurularak,

$$\cos \theta = \frac{kr}{\sqrt{1 + k^2 r^2}}$$

olacaktır. Buna göre,

$$Z = \rho_0 c \cos \theta$$

ve

$$P = \rho_0 c U \cos \theta$$

ifadeleri elde edilecektir. " kr " nin büyük değerleri için $\cos \theta$ 1'e yaklaşacaktır. Bu durumda da $Z = \rho_0 c$ şeklinde olacaktır.

" kr " değeri küçük olursa $\cos \theta$ değeri küçülecektir. Bu durumda belirli bir basınç değeri için çok büyük partikül hızları gerekecektir, zira,

$$P = \rho_0 c U \cos \theta$$

şeklinde dir. Dolayısı ile bir "nokta kaynak"ın çok yakınında çok düşük basınçlar için bile imkansız denecek hızlar gerekecektir. Sonuç olarak denilebilir ki, küçük bir ses kaynağı için "küresel dalgalar" üretmek mümkün değildir.

KÜRESEL DALGALARIN YOĞUNLUĞU (INTENSITY)

Bildiğimiz gibi,

$$\underline{p} = \frac{A}{r} e^{i(\omega t - kr)}$$

Bu denklemi

$$\underline{p} = \frac{A}{r} e^{i(\omega t - kr)}$$

şeklinde yazalım. Şayet zaman orijini dikkatlice seçersek A yerine gerçek bir sayı olan A' 'yi yazabiliriz. Bu durumda A/r birim akustik basıncının genliği olacaktır. Dikkat edilirse genlik r ile ters orantılı olarak değişmektedir. Yukarıdaki eşitlik Euler formülünden yararlanılarak,

$$\underline{p} = \frac{A}{r} \cos(\omega t - kr) + i \frac{A}{r} \sin(\omega t - kr)$$

olarak yazılabilir. Gerçek basınç değişimi bu denklemin gerçek kısmı olduğundan,

$$p = \frac{A}{r} \cos(\omega t - kr)$$

Biliyoruz ki; $\underline{z} = \frac{p}{\underline{u}}$, buna göre, $\underline{u} = \frac{p}{\underline{z}}$

$$\underline{u} = \frac{A}{r \underline{z}} e^{i(\omega t - kr)}$$

Burada, $\underline{z} = \frac{\rho_0 c k r}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} e^{i\theta}$ olduğunu biliyoruz. Bu ifade yerine konulursa,

$$\underline{u} = \frac{A}{r \frac{\rho_0 c k r}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} e^{i\theta}} e^{i(\omega t - kr)}$$

$$\underline{u} = \frac{A}{\rho_0 c r} \frac{\sqrt{1 + k^2 r^2}}{k r} e^{i(\omega t - kr - \theta)}$$

$$\underline{u} = \frac{A}{\rho_0 c r} \frac{\sqrt{1 + k^2 r^2}}{k r} [\cos(\omega t - kr - \theta) + i \sin(\omega t - kr - \theta)]$$

Ses partikül hızı bu eşitliğin gerçek bölümüdür;

$$\underline{u} = \frac{A}{\rho_0 cr} \frac{\sqrt{1+k^2 r^2}}{kr} \cos(\omega t - kr - \theta)$$

Burada hızın genliğinin

$$\underline{u} = \frac{A}{\rho_0 cr} \frac{\sqrt{1+k^2 r^2}}{kr}$$

olduğu açıktır. Görüldüğü gibi hızın genliği kaynak merkezinden olan mesafe ile ters orantılı değildir. Bu yüzden küresel dalgaları içeren problemlerde basınç değişimini kullanmak daha avantajlıdır.

Hız denkleminizi,

$$\underline{u} = \frac{A}{\rho_0 cr} \frac{1}{\frac{kr}{\sqrt{1+k^2 r^2}}} \cos(\omega t - kr - \theta)$$

şeklinde yazarsak biliyoruz ki;

$$\cos(\theta) = \frac{kr}{\sqrt{1+k^2 r^2}}$$

$$u = \frac{A}{\rho_0 cr \cos(\theta)} \cos(\omega t - kr - \theta)$$

Bildiğimiz gibi anlık enerji yoğunluğu

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{V_0} = \frac{1}{2} \rho_0 \left(u^2 + \frac{p^2}{\rho_0^2 c^2} \right)$$

şekindedir. Bu eşitlik hem yüzey dalgaları, hem de küresel dalgalar için geçerlidir. Burada,

$$\frac{1}{2} \rho_0 u^2 \text{ kinetik enerjiden}$$

$$\frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho_0 c^2} \text{ ise potansiyel enerjiden gelmektedir.}$$

Bilindiği gibi ortalama enerji yoğunluğu

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon dt$$

şeklindedir. Bu durumda ortalama kinetik enerji yoğunluğu

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \rho_0 u^2 dt$$

burada, $U = \frac{A}{\rho_0 c k} \frac{\sqrt{1+k^2 r^2}}{r^2}$ şeklindedir. Buna göre,

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{2} \frac{\rho_0}{T} \int_0^T \frac{A^2}{\rho_0^2 c^2 r^2 \cos^2 \theta} \cos^2(\omega t - kr - \theta) dt$$

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{2} \frac{A^2}{\rho_0 c^2 r^2 \cos^2 \theta} \frac{1}{T} \int_0^T \cos^2(\omega t - kr - \theta) dt$$

$$\int_0^T \cos^2(\omega t - kr - \theta) dt = \frac{T}{2}$$

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{4} \frac{A^2}{\rho_0 c^2 r^2 \cos^2 \theta} = \frac{1}{4} \rho_0 \left(\frac{A}{\rho_0 c r \cos \theta} \right)^2$$

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{A^2 (1+k^2 r^2)}{4 \rho_0 c^2 k^2 r^4}$$

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{\rho_0 U^2}{4}$$

Benzer şekilde,

$$\bar{\varepsilon}_p = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \rho_0 \frac{p^2}{\rho_0^2 c^2} dt = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt$$

$$\bar{\varepsilon}_p = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{A}{r} \right)^2 \cos^2(\omega t - kr) dt$$

$$\bar{\varepsilon}_p = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho_0 c^2} \left(\frac{A}{r} \right)^2 \frac{1}{T} \int_0^T \cos^2(\omega t - kr) dt$$

$$\bar{\varepsilon}_p = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho_0 c^2} \left(\frac{A}{r} \right)^2 \frac{1}{T} \left[\frac{1}{2} T \right] = \frac{1}{4} \frac{\left(\frac{A}{r} \right)^2}{\rho_0 c^2}$$

$$\bar{\varepsilon}_p = \frac{P^2}{4 \rho_0 c^2} = \frac{A^2}{4 \rho_0 c^2 r^2}$$

Buna göre toplam enerji yoğunluğunun ortalaması şu şekildedir,

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_k + \bar{\varepsilon}_p = \frac{A^2(1+k^2r^2)}{4\rho_0c^2k^2r^4} + \frac{A^2}{4\rho_0c^2r^2}$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{A^2}{4\rho_0c^2r^2} \left(1 + \frac{1+k^2r^2}{k^2r^2} \right)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{A^2}{4\rho_0c^2r^2} 2 \left(1 + \frac{1}{2k^2r^2} \right)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{A^2}{2\rho_0c^2r^2} \left(1 + \frac{1}{2k^2r^2} \right)$$

$$P^2 = \left(\frac{A}{r} \right)^2$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{P^2}{2\rho_0c^2} \left(1 + \frac{1}{2k^2r^2} \right)$$

Kinetik enerji yoğunluğunu (küresel dalgalar için) oluşturan enerjinin bir kısmı, akustik dalga basıncı ile farklı fazlarda olan partikül hızından gelmektedir. Bu enerji sistemin içinde kaldığı için $\frac{dE}{dt} = \varepsilon c = I$

formülü geçerli değildir. Bununla birlikte yoğunluğun $\bar{\varepsilon} = \frac{P^2}{2\rho_0c^2} \left(1 + \frac{1}{2k^2r^2} \right)$ eşitliğinin birinci kısmı ile ses hızının çarpımı olduğu gösterilebilir.

$$I = \frac{P^2}{2\rho_0c^2} c \quad \text{ise} \quad I = \frac{P^2}{2\rho_0c} \text{ olacaktır.}$$

Bu daha önce yüzey dalgaları için bulunan $I = \frac{P^2}{2\rho_0c}$ formülünün benzeridir. Fakat küresel bir dalganın enerji yoğunluğu daha kolay bir şekilde bulunabilir. Dalga tarafından etrafın birim alanında yapılan ortalama işin bulunması ile bu çözülebilir.

$$I = \frac{\int_0^T p u dt}{T} / A$$

$A=1$ için

$$I = \langle pu \rangle$$

Bu son ifade birim alan üzerinde bir çevrimde yapılan ortalama iştir.

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T P \cos(\omega t - kr) U \cos(\omega t - kr - \theta) dt$$

$$I = \frac{1}{T} P U \int_0^T \cos(\omega t - kr) [\cos(\omega t - kr) \cos \theta + \sin(\omega t - kr) \sin \theta] dt$$

$$I = \frac{1}{T} P U \int_0^T \cos^2(\omega t - kr) \cos \theta dt + \frac{1}{T} P U \int_0^T \sin \theta \cos(\omega t - kr) \sin(\omega t - kr) dt$$

$$I = \frac{1}{T} P U \frac{1}{2} T \cos \theta$$

$$I = \frac{1}{2} P U \cos \theta$$

Burada,

$$U = \frac{A}{\rho_0 c r \cos \theta} \text{ ve } P = \frac{A}{r} \text{ olduğunu biliyoruz. Dolayısıyla } U \cos \theta = \frac{P}{\rho_0 c} \text{ olacaktır.}$$

$$I = \frac{1}{2} P U \cos \theta = \frac{1}{2} P \frac{P}{\rho_0 c} = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho_0 c}$$

$$I = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho_0 c}$$

Bunun bir önce elde edilen eşitlik olduğu görülebilir. Küresel dalga kaynağını çevreleyen küresel bir alandan ortalama olarak akan enerji miktarı

$$W = AI \text{ için}$$

$$W = 4\pi r^2 I = 4\pi r^2 \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho_0 c}$$

$$W = \frac{4\pi r^2 P^2}{2\rho_0 c}$$

Burada,

$$p = \frac{A}{r} e^{i(\omega t - kr)} \text{ olduğunu ve dolayısı ile } P = \frac{A}{r} \text{ olduğunu biliyoruz. O halde } A^2 = r^2 P^2 \text{ için,}$$

$$W = \frac{4\pi A^2}{2\rho_0 c}$$

$$W = \frac{2\pi A^2}{\rho_0 c}$$

Dolayısı ile ortalama enerji akışı, küresel dalga kaynağı çevreleyen küresel alanın yarıçapından bağımsızdır. Bu sonuç "enerjinin korunumu" kuralı ile bağışmaktadır.

ÖRNEK: Bir ses dalgasının frekansının 20 Hz ve kaynaktan 25 mm lik mesafedeki basınç genliğinin 2 Pa olması istenmektedir. Bu durumda partikül hızını, yer değiştirmeyi ve genliklerini bulunuz. [$c=343$ m/s ve $\rho_0=125$ kg/m³]

$$P = \rho_0 c U \cos \theta$$

$$\tan \theta \cong \frac{1}{kr} = \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

$$\cos \theta \cong kr$$

$$rk = r \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$c = f\lambda$$

$$\lambda = \frac{343}{20} \cong 17.15m$$

$$rk = (0.025) \left(\frac{2\pi}{17} \right) = 0.0092$$

$$P = \rho_0 c U \cos \theta$$

$$U = \frac{P}{\rho_0 c \cos \theta}$$

$$U = \frac{2}{1.25 \cdot 343 \cdot 0.0072}$$

$$U = 0.47 \text{ m/s}$$

Sinüzoidal bir hareket için;

$$u = \frac{A}{\rho_0 cr \cos \theta} \cos(\omega t - kr - \theta)$$

$$\xi = \int u \cdot dt = \frac{A}{\rho_0 cr \cos \theta} \int \cos(\omega t - kr - \theta) dt$$

$$\xi = \frac{A}{\rho_0 cr \cos \theta} \frac{1}{\omega} \sin(\omega t - kr - \theta)$$

Yer değiştirmenin genliği;

$$Z = \frac{A}{\rho_0 cr \cos \theta} \frac{1}{\omega} = \frac{U}{\omega}$$

ya da

$$\underline{u} = -\frac{1}{i\omega\rho_0} \frac{\partial p}{\partial r} \quad \text{ve} \quad \underline{\mu} = -\frac{1}{\omega^2 \rho_0} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\underline{u}}{i\omega}$$

Buradaki i vektörlerin birbirine dik olduğunu gösteriyor. O halde;

$$Z = \frac{U}{\omega}$$

$$\omega = Z\pi f$$

$$\omega = 2\pi 20 = 125.66 \text{ rad/s}$$

$$Z = \frac{0.49}{125.66}$$

$$Z = 3.9 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$Z = 3.9 \text{ mm}$$

ÖRNEK: Bir açık hava konserinde ses bir hoparlör setinden yayılmaktadır. Hoparlörlerden 20 metre uzakta ses basıncı seviyesi (S_b) 110 dB olarak ölçülmüştür. Hoparlörlerin ortalama güç çıkışı bulunuz. (Yere çarpan bütün seslerin yutulduğunu ve sesin tek yönlü yayıldığını kabul ediniz) [$f=20 \text{ Hz}$]

$$S_b = 10 \log_{10} \frac{P_{rms}^2}{P_{ref}^2}$$

$$10^{\frac{S_b}{20}} \times P_{ref} = P_{rms}$$

$$P_{rms} = 20 \times 10^{-6} \cdot 10^{\frac{110}{20}}$$

$$P_{rms} = 6.32 \text{ Pa}$$

AKUSTİK YÜZEY DALGALARI [Fundamentals of Acoustics, pp 108]

Giriş: Akustikler periyodik akustik dalgalar bazı özellikleri itibarıyla farklıdır.

- ① Üç boyutlu hareket eder.
- ② Longitudinal dalgalar

→ Sayfa (10) Bu bölümün D'Alembert çözümü → (60)

$$(60) \rightarrow u(x,t) = f_1(ct - x) + f_2(ct + x)$$

c = dalganın ilerleme hızı

Birbirine eşit büyüklükte tip, hareketin sinusoidal olarak alınmasıdır. Kompleks olarak yazarsak

$$u^* = A^* e^{i(\omega t - kx)} + B^* e^{i(\omega t + kx)}$$

Diğer önemli akustik değişkenleri de kompleks formda yazarak bulabiliriz.

$$p^* = -\rho_0 c^2 \frac{\partial u^*}{\partial x} = i \rho_0 c \omega (u_+^* - u_-^*) \quad [\text{Basınç}]$$

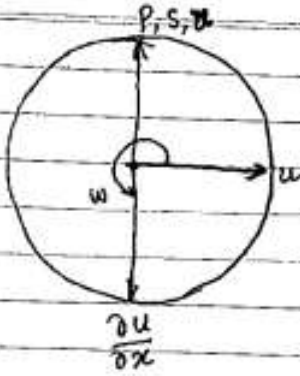
$$s^* = -\frac{\partial u^*}{\partial x} = i k (u_+^* - u_-^*) \quad [\text{condensation}]$$

$$v^* = \frac{\partial u^*}{\partial t} = i \omega (u_+^* + u_-^*) \quad [\text{zincir hızı}]$$

Burada

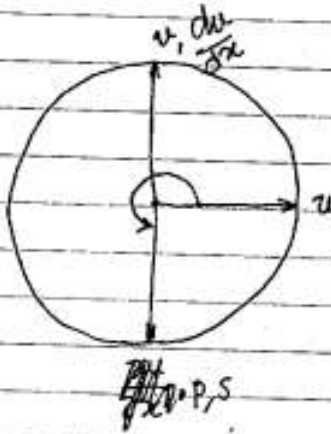
$$u_+^* = A^* e^{i(\omega t - kx)}$$

$$u_-^* = B^* e^{i(\omega t + kx)}$$



Bu + yöndeki hareketi göstermektedir.

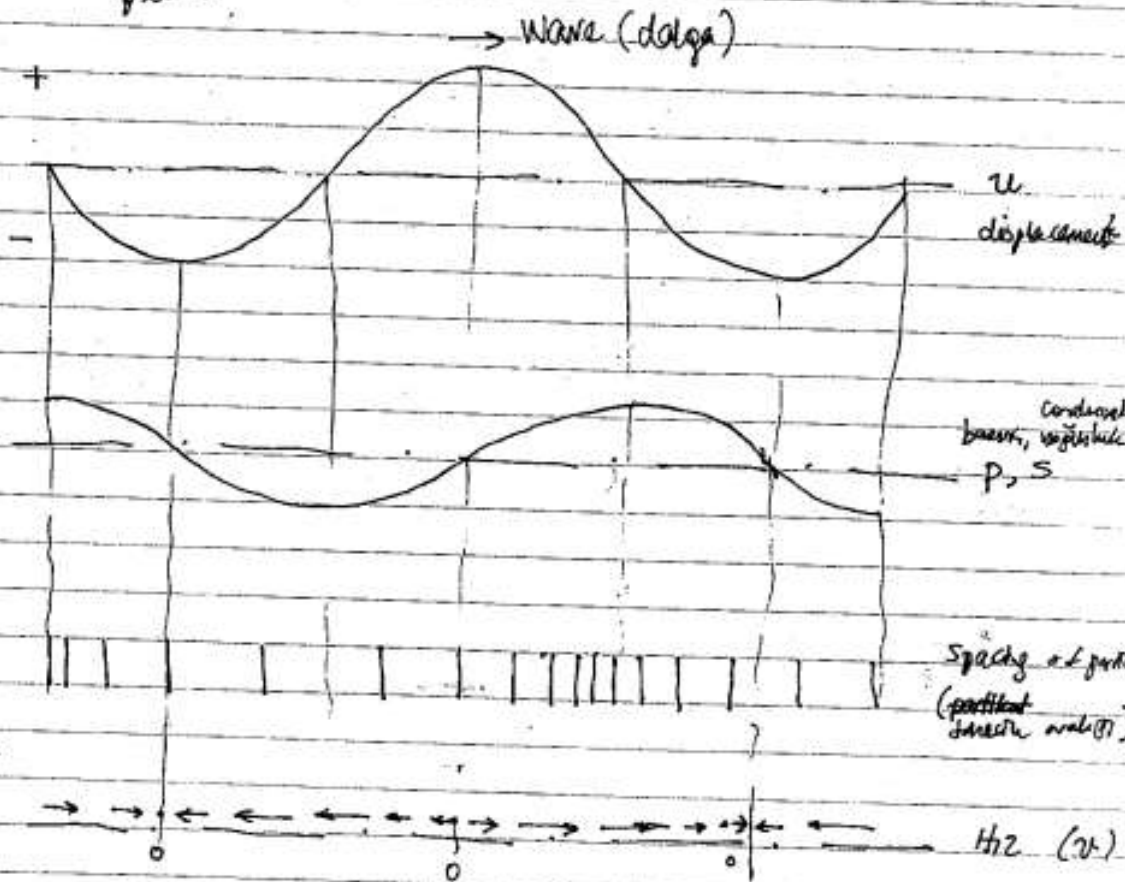
$$u = \underbrace{A e^{i(\omega t - kx)}}_{+} + \underbrace{B e^{i(\omega t + kx)}}_{(-)}$$



$$p = i \rho_0 c \omega (u_+ - u_-)$$

$$s = i K (u_+ - u_-)$$

$$v = i \omega (u_+ + u_-)$$



Yukarıdaki eşitliklerin ani diferansiyeli, eşitliğin "gerçek" kökünü verecektir. Burada, A^* ve B^* 'in gerçekte sabitler A ve B olması durumunda

$$u = A \cos(\omega t - kx) + B \cos(\omega t + kx)$$

$$p = -\rho_0 c \omega A \sin(\omega t - kx) + \rho_0 c \omega B \sin(\omega t + kx)$$

$$s = -k A \sin(\omega t - kx) + k B \sin(\omega t + kx)$$

$$v = -\omega A \sin(\omega t - kx) - \omega B \sin(\omega t + kx)$$

$$[\text{Euler formülü: } e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta]$$

Ref: Hocanın ders notları

BÖLÜM VII: SESİN SIVILAR İÇİNDEKİ HIZI

$$c^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \quad (\text{Akış Sistemlerinde Dalga Denklemi bölümünde bulunmuştur.})$$

$$\left(\frac{P}{P_0} \right) = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \quad (\text{Adiabatik=Isı giriş çıkışı yoktur})$$

$$\left(\frac{P}{P_0} = \frac{\rho^\gamma}{\rho_0^\gamma} \right) \Rightarrow \frac{P}{\rho^\gamma} = \frac{P_0}{\rho_0^\gamma} = K = \text{sabit}$$

$$\gamma = \frac{\text{Gazın sabit basınçtaki ısı değeri}}{\text{Gazın sabit hacimdeki ısı değeri}},$$

$$P = K \rho^\gamma \Rightarrow \frac{\partial P}{\partial \rho} = K \rho^{\gamma-1} \gamma = K \gamma \frac{\rho^\gamma}{\rho}$$

$$\frac{dP}{d\rho} = \gamma \left(\frac{P}{\rho} \right) \Rightarrow \frac{dP}{d\rho} = \left(\frac{\gamma P}{\rho} \right)$$

$$c^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \quad (\text{Akış Sistemlerinde Dalga Denklemi bölümünde bulunmuştur.})$$

$$c^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \Rightarrow c^2 = \frac{\gamma P_0}{\rho_0}$$

Burada;

P_0 : Belirli şartlardaki basınç

ρ_0 : Aynı şartlardaki yoğunluk

c : O şartlardaki ses hızı

Bu değerler tablo halinde verilmiştir.

Hava için hesap yapılırsa ;

$$P_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ N / m}^2 \quad \rho_0 = 1.402 \quad \rho_0 = 1.293 \text{ kg / m}^3$$

$$c^2 = \frac{1.402 \times 1.013 \times 10^5}{1.293} = (331.6)^2 \Rightarrow c_0 = 331.6 \text{ m / s}$$

Birim analizi;

$$c^2 = \frac{\left(\frac{kgm}{s^2}\right)}{\left(\frac{m^2}{kg/m^3}\right)} = \frac{m^2}{s^2} \Rightarrow c = (m/s)$$

Havadaki hız genel olarak basınçtan bağımsızdır. Çünkü basınç ikiye katlandığında yoğunlukta ikiye katlanır. Yani;

$$\frac{P_0}{\rho_0} \cong \text{sabit}$$

Hava homojen ise ve isotermaal kabul edilirse sesin havadaki hızı yükseklikte bağımsızdır. Gerçekte bu iki kabul de doğru değildir. Fakat ses hızının sıcaklığa olan bağılılığı daha fazladır.

$$PV = nrT \Rightarrow \left(\frac{P}{\rho}\right) = rT$$

Gazlar için ses hızı;

$c^2 = \gamma rT$ olur. Burada r gaz sabitidir ve T Kelvin cinsinden sıcaklıktır.

$$\left(\frac{P_0}{\rho_0}\right) = r \cdot 273 \Rightarrow c_0^2 = \gamma r \cdot 273$$

$$r = \frac{c_0^2}{273\gamma}$$

$$c^2 = \gamma \frac{c_0^2}{273\gamma} \cdot T \Rightarrow c = c_0 \sqrt{\frac{T}{273}} \quad T: \text{Sıcaklık (K)}$$

$$c \cong c_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \quad t: \text{Sıcaklık (} ^\circ\text{C)}$$

t , 273'e göre küçük olduğundan, Taylor açılımından (İkinci mertebeden sonrası iptal edilmiştir.)

$$c \cong c_0 \left(1 + \frac{1}{2} \left[\frac{t}{273}\right]\right)$$

$$c = c_0 + \frac{c_0 t}{546}$$

Buradan gazlar için ses hızı;

$$\boxed{c = 331.6 + 0.6t}$$

olarak bulunur.

Sıvılar için bu işlemleri yapmak daha zordur. Fakat sonuçta hız için ;

$$c^2 = \frac{\gamma B_T}{\rho_0}$$

B_T : İzotermal (isothermal) bulk modülü

Sıvıların bulk modüllerini hesaplamak oldukça zordur. Bunları (common) liste halinde vermiştir. Sesin sıvılar içindeki yayılımının sıcaklık ve basınç ile değişimini düşünmek yanlış olmaz fakat şimdilik bir teori yoktur. Deneysel sonuçlar vardır. Damıtılmış su için deney sonuçlarına göre;

$$c = 1403 + 5t - 0.06t^2 + 0.0003t^3$$

Deneylemlerden P, v ve T arasında yakın bir ilişki olduğu görülmüştür.

$$P\bar{v} = \bar{R}T \quad \bar{R}: \text{Evrensel gaz sabiti}$$

$$\frac{P\bar{v}}{M} = \frac{\bar{R}T}{M} \Rightarrow P\bar{v} = RT \quad M: \text{Moleküler ağırlık}$$

$$\rho = \frac{M}{\bar{v}} \Rightarrow \left(\frac{P}{\rho} \right) = rT$$

[Ref: Fundamentals of Classical Thermodynamics, pp43, Wylen, G.J.V. Sontag, R.E, Wiley, 1978]

$$P\alpha = \frac{nT}{V} \quad \text{yada} \quad P = R \left(\frac{nT}{V} \right)$$

Deneylemlerden

Burada R oransal sabit veya evrensel gaz sabitidir.

$$P\bar{v} = nRT \quad P\bar{v} = (nN_A) \left(\frac{R}{N_A} \right) T$$

$$P\bar{v} = NkT \quad k: \text{Boltzman sabiti}$$

N : Toplam tanecik adeti
 N : mol sayısı

[Ref: Physics: Cutneil & Johnson, Wiley, 1992 pp 384]

TABLE1: TABLES OF PHYSICAL PROPERTIES OF MATTER

Solid	Density (kg/m^3) ρ_0	Young's Modulus (Pa) Y	Shear Modulus (Pa) \mathcal{G}	Adiabatic Bulk Modulus (Pa) \mathcal{B}	Poisson's Ratio σ	Speed (m/s) c		Characteristic Impedance ($\text{Pa}\cdot\text{s/m}$) $\rho_0 c$	
						Bar	Bulk	Bar	Bulk
Aluminum	2700	$\times 10^{10}$ 7.1	$\times 10^{10}$ 2.4	$\times 10^{10}$ 7.5	0.33	5150	6300	$\times 10^6$ 13.9	$\times 10^6$ 17.0
Brass	8500	10.4	3.8	13.6	0.37	3500	4700	29.8	40.0
Copper	8900	12.2	4.4	16.0	0.35	3700	5000	33.0	44.5
Iron (cast)	7700	10.5	4.4	8.6	0.28	3700	4350	28.5	33.5
Lead	11300	1.65	0.55	4.2	0.44	1200	2050	13.6	23.2
Nickel	8800	21.0	8.0	19.0	0.31	4900	5850	43.0	51.5
Silver	10500	7.8	2.8	10.5	0.37	2700	3700	28.4	39.0
Steel	7700	19.5	8.3	17.0	0.28	5050	6100	39.0	47.0
Glass (Pyrex)	2300	6.2	2.5	3.9	0.24	5200	5600	12.0	12.9
Quartz (X-cut)	2650	7.9	3.9	3.3	0.33	5450	5750	14.5	15.3
Lucite	1200	0.4	0.14	0.65	0.4	1800	2650	2.15	3.2
Concrete	2600	—	—	—	—	—	3100	—	8.0
Ice	920	—	—	—	—	—	3200	—	2.95
Cork	240	—	—	—	—	—	500	—	0.12
Oak	720	—	—	—	—	—	4000	—	2.9
Pine	450	—	—	—	—	—	3500	—	1.57
Rubber (hard)	1100	0.23	0.1	0.5	0.4	1450	2400	1.6	2.64
Rubber (soft)	950	0.0005	—	0.1	0.5	70	1050	0.065	1.0
Rubber ($\rho_0 c$)	1000	—	—	0.24	—	—	1550	—	1.55

(a) Solids

(b) Liquids

Liquid	Temperature (°C) T	Density (kg/m ³) ρ_0	Isothermal Bulk Modulus (Pa) β_{I}	Ratio of Specific Heats γ	Speed (m/s) c	Characteristic Impedance (Pa·s/m) $\rho_0 c$	Coefficient of Shear Viscosity (Pa·s) η	Specific Heat (J/(kg·K)) c_p	Thermal Conductivity [W/(m·K)] κ	Prandtl Number Pr
Water (fresh)	20	998	$\times 10^9$ 2.18	1.004	1481	$\times 10^6$ 1.48	$\times 10^{-3}$ 1.00	$\times 10^3$ 4.19	0.603	6.95
Water (sea)	13	1026	2.28	1.01	1500	1.54	1.07			
Alcohol (ethyl)	20	790	—	—	1150	0.91	1.20			
Castor (oil)	20	950	—	—	1540	1.45	960			
Mercury	20	13600	25.3	1.13	1450	19.7	1.56	0.14	8.21	0.0266
Turpentine	20	870	1.07	1.27	1250	1.11	1.50			
Glycerin	20	1260	—	—	1980	2.5	1490			
Fluid-like sea bottoms										
Red clay		1340	—	—	1460	1.96				
Calcareous ooze		1570	—	—	1470	2.31				
Coarse silt		1790	—	—	1540	2.76				
Quartz sand		2070	—	—	1730	3.58				

TABLES OF PHYSICAL PROPERTIES OF MATTER

Gas (at 1 atm)	Temperature (°C) T	Density (kg/m ³) ρ_0	Ratio of Specific Heats γ	Speed (m/s) c	Characteristic Impedance (Pa·s/m) $\rho_0 c$	Coefficient of Shear Viscosity (Pa·s) η	Specific Heat [(J/(kg·K))] c_p	Thermal Conductivity [W/(m·K)] κ	Prandtl Number Pr
Air	0	1.293	1.402	331.5	429	$\times 10^{-5}$ 1.72	$\times 10^3$ 1.01	0.0263	0.710
Air	20	1.21	1.402	343	415	1.85	1.01	0.0263	0.710
O ₂	0	1.43	1.40	317.2	453	2.00	0.912	0.0245	0.744
CO ₂ ($f \ll f_M$)	0	1.98	1.304	258	512	1.45	0.836	0.0145	0.836
CO ₂ ($f \gg f_M$)	0	1.98	1.40	268.6	532	0.88	14.18	0.168	0.743
H ₂	0	0.090	1.41	1269.5	114	1.3			
Steam	100	0.6	1.324	404.8	242				

[Ref: Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders-Fundamentals of Acoustics-Wiley (1999)]

SESİN SIVILAR İÇİNDEKİ HIZI

Akış Sistemlerinde Dalga Denklemi bölümünde bulunan termodinamik ses hızı ifadesi;

$$c^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{adiabat} \quad (1)$$

Bu denklem akışın karakteristik özelliğidir ve denge şartlarına bağlıdır.

Ses dalgası ideal gaz boyunca yayılırken, adiabatik özellik önemli ve özel bir form türetmek için kullanılır. Bu denklem;

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{adiabat} = \frac{\gamma P}{\rho} \quad (2)$$

Bu ρ_0 için hesaplanırsa;

$$c^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \Rightarrow c^2 = \frac{\gamma P_0}{\rho_0} \quad (3)$$

Tablo 1'deki $0^\circ C$ ve 1atm'de hava için uygun değerler yerine konursa, teorik ses hızı;

$$P_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ N / m}^2 \quad \gamma = 1.402 \quad \rho_0 = 1.293 \text{ kg / m}^3$$

$$c^2 = \frac{1.402 \times 1.013 \times 10^5}{1.293} = (331.6)^2 \Rightarrow c_0 = 331.6 \text{ m / s} \quad \text{olarak bulunur.}$$

Bu sonuç **ölçülen değerler** ve akustik işlemin adiabatik kabul edilmesini desteklemektedir.

Sabit sıcaklıktaki bir çok ideal gaz için $\frac{P_0}{\rho_0}$ oranı basınçtan bağımsızdır. Ses hızı sadece sıcaklığın bir fonksiyonudur. Denklem (2) ve (3)'den ideal gazlar için alternatif bir denklem yazılırsa;

$$c^2 = \gamma r T_K$$

Hız, mutlak sıcaklığın karekökü ile orantılıdır. $0^\circ C$ 'deki c_0 hızına göre denklem düzenlenirse;

$$c^2 = c_0 \left(\frac{T_K}{273} \right)^{1/2} = c_0 (1 + T / 273)^{1/2}$$

Ses hızının sıvılardaki teorik tahmini gazlara göre çok daha zordur. Bununla birlikte $B = \gamma B_T$ 'yi teorik olarak göstermek mümkündür. Burada B_T , izotermal bulk modülüdür. B_T 'yi deneysel olarak ölçmek B 'yi elde etmekten daha kolay olduğu için denklemin yeni hali;

.Açıklama

$$\left[\nabla^2 P = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \Rightarrow c^2 = \frac{B}{\rho_0} \text{ (sesin termodinamik hızı)} \right]$$

$$c^2 = \frac{\gamma B_T}{\rho_0} \text{ olur.}$$

γ , B_T ve ρ_0 'sının denge sıcaklığı ve basıncı ile değişmektedir. Bu değerlerin basit bir teorik çözümü olmadığından dolayı değerler deneysel olarak ölçülür. Sonuç olarak ses hızı numerik formülle ifade edilir. Örneğin, damıtılmış suyun basitleştirilmiş formülü $[c(\text{m/s})]$;

$$c(P,t) = 1402.7 + 488t - 482t^2 + 135t^3 + (15.9 + 2.8t + 2.4t^2)(P_G / 100)$$

P_G : Gauge Pressure (birimi bar'dır [1bar = 10^5 Pa])

$$t = T/100, T (^{\circ}C)$$

Sıfır gauge pressure, 1 atm (1.01325 bar) daki P_0 basıncıdır. **Denklemler**, $0 < T < 100^{\circ}C$ ve $0 \leq P_G \leq 200 \text{ bar}$ için uygundur.

Ceviren: Fettah KODALAK

KAYNAK: Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders-Fundamentals of Acoustics-Wiley (1999)

YÜZEY DALGALARININ (PLANE WAWES) ENERJİ YOĞUNLUĞU

Daha önce de tartışılmış olan dx boyundaki eleman için kinetik enerjisi;

$$\Delta E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(\rho_0 v_0)v^2$$

$$V = A dx + A \frac{\delta u}{\delta x} dx = V_0 \left(1 + \frac{\delta u}{\delta x} \right)$$

$$\Delta E_p = -\int (pA) dx = -\int p dv$$

$$p = -\rho_0 c^2 \frac{\delta u}{\delta x} \rightarrow \frac{du}{dx} = \frac{p}{\rho_0 c^2}$$

$$V = V_0 \left(1 - \frac{du}{dx} \right) = V_0 \left(1 - \frac{p}{\rho_0 c^2} \right)$$

$$\frac{dv}{dp} = -\frac{V_0}{\rho_0 c^2} \rightarrow dv = -\frac{V_0 dp}{\rho_0 c^2}$$

$$\Delta E_p = -\int p dv = \int p \frac{v_0}{\rho_0 c^2} = \frac{v_0}{\rho_0 c^2} \int_0^p p dp$$

$$\Delta E_p = \frac{1}{2} \frac{v_0}{\rho_0 c^2} p^2$$

$$\Delta E = \Delta E_k + \Delta E_p = \frac{1}{2} \frac{v_0}{\rho_0 c^2} p^2 + \frac{1}{2} (\rho_0 v_0) v^2$$

$$\Delta E = \frac{1}{2} \rho_0 V_0 \left(v^2 + \frac{p^2}{\rho_0^2 c^2} \right)$$

$$\text{Enerji yoğunluğu } (\varepsilon) = \frac{\Delta E}{V_0} = \frac{1}{2} \rho_0 \left(v^2 + \frac{p^2}{\rho_0^2 c^2} \right)$$

Bu denklemde enerji yoğunluğunu bulmak için v ve p değerini yerine koymak gerekir. Bunlar iki yöndeki [(+) ve (-)] enerji yoğunlukları olacaktır.

$$p = \rho_0 c \omega [A \sin(\omega t - kx) + B \sin(\omega t + kx)]$$

$$v = -\omega [A \sin(\omega t - kx) - B \sin(\omega t + kx)]$$

[Burada ani basınç ve hız değerlerinin GERÇEK kökleri göz önüne alınmıştır.]

Hesaplamalar (+) ve (-) yönler için ayrı ayrı hesap edilecek olursa; [Burada (+) yön göz önüne alındı.]

$$p_+ = \rho_0 c \omega A \sin(\omega t - kx)$$

$$v_+ = -\omega A \sin(\omega t - kx)$$

$$p_+ = \rho_0 c [-\omega A \sin(\omega t - kx)] = \rho_0 c v_+$$

$$\varepsilon_+ = \frac{1}{2} \rho_0 \left(v_+^2 + \frac{p_+^2}{\rho_0^2 c^2} \right) = \rho_0 v_+^2$$

Buradaki (+) indisi dalganın +x tarafına (sağa) doğru gittiğine işaret etmektedir.

$$p_- = \rho_0 c v_-$$

$$\varepsilon_- = \frac{1}{2} \rho_0 \left(v_-^2 + \frac{(-\rho_0 c v_-)^2}{\rho_0^2 c^2} \right) = \rho_0 v_-^2$$

$$\varepsilon_- = \rho_0 v_-^2$$

$$\text{Dolayısıyla: } \varepsilon = \varepsilon_+ + \varepsilon_- = \rho_0 (v_+^2 + v_-^2)$$

Bilindiği gibi enerji yoğunluğu yalnızca x'e değil aynı zamanda zamana da bağlıdır. Dolayısıyla zamana göre bir ortalaması alınacak olursa;

$$\bar{\varepsilon}_+^t = \frac{\sum_{t=1}^{t=T} \varepsilon_+}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon_+ dt = \frac{1}{T} \int_0^T \rho_0 v_+^2 dt$$

$$\bar{\varepsilon}_+^t = \frac{\rho_0}{T} \int_0^T [-\omega A \sin(\omega t - kx)]^2 dt$$

$$\bar{\varepsilon}_+^t = \frac{\rho_0 \omega^2 A^2}{T} \int_0^T \left[\sin^2 \omega t \cos^2 kx + \cos^2 \omega t \sin^2 kx - \frac{1}{2} \sin(2\omega t) \sin(2kx) \right]$$

Sonuç olarak;

$$\bar{\varepsilon}_+^t = \frac{\rho_0 \omega^2 A^2}{2}$$

Şayet hız genliği göz önüne alınırsa $V_+ = -\omega A$

$$\bar{\varepsilon}_+^t = \frac{\rho_0 v_+^2}{2}$$

$$\text{Ya da; } \frac{P_+}{\rho_0 c} = -\omega A \quad \rightarrow \quad \bar{\varepsilon}_+^t = \frac{P_+^2}{2\rho_0 c^2}$$

Burada P_+ (+) yöndeki dalganın basınç genliğidir.

Şayet zaman ortalaması yerine, yer değiştirme ortalaması (space average) yapacak olursak enerji yoğunluğu;

$$\bar{\varepsilon}_+^t = \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda \varepsilon_+ dx$$

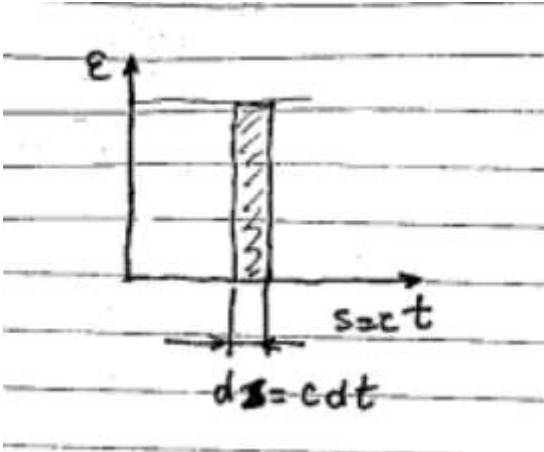
Bunun zaman ortalamasının benzeri olduğu görülür.

$$\bar{\varepsilon}_+^t = \frac{\rho_0 \omega^2 A^2}{2} = \frac{\rho_0 v_+^2}{2} \text{ etc.}$$

Benzer olarak (-) yönde ilerleyen bir dalga için enerji yoğunluğu ortalaması için;

$$\varepsilon_-^t = \bar{\varepsilon}_-^x = \frac{\rho_0 \omega^2 B^2}{2} = \frac{\rho_0 v_-^2}{2} \text{ etc.}$$

AKUSTİK YOĞUNLUK [I]: Hareket eden dalgaya dik birimi yüzeyden ortalama akan enerji miktarıdır.



$$\Delta E = \varepsilon \Delta V = \varepsilon (1cdt)$$

$$dE = \varepsilon c dx \rightarrow \frac{dE}{dt} = \varepsilon c$$

Yoğunluk (intensity) ve ortalama akış hızı;

$$I_+ = \frac{d\bar{E}^t}{dt} = \bar{\varepsilon}^t c$$

Şayet dalga (+) x yönünde ilerliyorsa,

$$I_+ = c\bar{\varepsilon}_+^t \rightarrow I_+ = \frac{\rho_0 c \omega^2 A^2}{2} = \frac{\rho_0 c v_+^2}{2} = \frac{p_+^2}{2\rho_0 c} = \frac{p_+ v_+}{2}$$

Şayet bu denklemi elektromanyetik dalgalarla veya voltaj dalgaları ile benzerlik kurmak için “etkili genlik” (rms) cinsinden yazacak olursak;

$$A_e = \frac{A}{\sqrt{2}}, P_e = \frac{P}{\sqrt{2}}, V_e = \frac{V}{\sqrt{2}}$$

$$I_+ = \rho_0 c \omega^2 A_e^2 = \rho_0 c V_e^2 = \frac{P_e^2}{\rho_0 c} = P_e V_e$$

Şayet dalga (-) x yönünde hareket ediyorsa,

$$I_- = -c\bar{\varepsilon}_-$$

$$I_- = \frac{\rho_0 c \omega^2 B^2}{2} = \frac{\rho_0 c v_-^2}{2} = \frac{p_-^2}{2\rho_0 c} = \frac{p_- v_-}{2}$$

Veya

$$I_- = -\rho_0 c \omega^2 B_e^2 = -\rho_0 c V_e^2 \text{ etc.}$$

ÖZGÜL AKUSTİK İMPEDANCE [\underline{z}]

$$\underline{z} = \text{Akustik basınç / partikül hız} \rightarrow \underline{z}_+ = \frac{p_+}{v_+} = \frac{i\rho c \omega x_+}{i\omega x_+} = \rho_0 c$$

$$\underline{z}_- = \frac{p_-}{v_-} = \frac{-j\rho c \omega x_-}{j\omega x_-} = -\rho_0 c$$

Her iki yönde de belirgin akustik impedance “gerçek” sayı genliği $\rho_0 c$ MKS ünit sisteminde “belirgin akustik impedance” $\text{kg/m}^2\text{s}$

($\rho_0 c$) birçok denklemde bu şekilde görülür. Bu çarpım akustik çevrenin karakteristik bir değeridir ve karakteristik impedans olarak birikir. (+) veya (-) yönde ilerleyen dalgalarda “gerçek” (real) çıkarken “standing waves” veya “diverging waves” durumunda complex çıkar. Bu halde;

$$\underline{Z} = \frac{p}{u} = r + ix$$

r = specifx acoustic resistance

x = specifx acoustic reactance

$$r = \pm \rho_0 c \quad \left[\text{kg} / \text{m}^3 \text{m} / \text{s} = \text{kg} / \text{m}^2 \text{s} \right]$$

SORU: $p = A(ct - x)e^{-a(ct-x)}$ ’in dalga denklemi $\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}$ ’yi sağladığını gösteriniz. Akustik

basınç, P ile partikül hızı v arasındaki bağıntıyı bu iki bir akustik basınç için bulunuz.

$$\frac{dP}{dt} = Ace^{-a(ct-x)} + A(ct-x)ace^{-a(ct-x)} = Ace^{-a(ct-x)} [1 - a(ct-x)]$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = -[1 - a(ct-x)]Ac^2ae^{-a(ct-x)} + Ac^2ae^{-a(ct-x)} = [-1 + a(ct-x) - 1]Ac^2ae^{-a(ct-x)}$$

$$\frac{dP}{dx} = -Aae^{-a(ct-x)} + A(ct-x)ae^{-a(ct-x)} = [-1 + a(ct-x)]Ae^{-a(ct-x)}$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = -Aae^{-a(ct-x)} + [-1 + a(ct-x)]Aae^{-a(ct-x)} = [-2 + a(ct-x)]Aae^{-a(ct-x)}$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2 \left\{ Aa[-2 + a(ct-x)]e^{-a(ct-x)} \right\} \rightarrow \left\{ Aa[-2 + a(ct-x)]e^{-a(ct-x)} \right\} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}$$

Biliyoruz ki; $p = -\rho_0 c^2 \frac{\delta u}{\delta x}$

$$\frac{\delta u}{\delta t} = -c \frac{\delta u}{\delta x}$$

$$p = -\rho_0 c \left(c \frac{\delta u}{\delta x} \right) = +\rho_0 c \frac{\delta u}{\delta x} \rightarrow p = \rho_0 c \frac{\delta u}{\delta x}$$

$$v = \frac{\delta u}{\delta t}$$

$$p = \rho_0 c v$$

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma = \left(\frac{(P/r)T}{(P_0/r)T_0} \right)^\gamma$$

$$P \frac{P_0^\gamma}{r^\gamma T_0^\gamma} = P_0 \frac{P^\gamma}{r^\gamma T^\gamma} \rightarrow P_0^{\gamma-1} T^\gamma = P^{\gamma-1} T_0^\gamma$$

$$\Delta T = \frac{(\gamma-1)TP}{\gamma P}$$

$$c^2 = \gamma r T \rightarrow c^2 = \gamma \frac{P}{\rho T} T$$

$$P = P - P_0 \quad \Delta T = T - T_0$$

$$R^{\gamma-1} (T_0 + \Delta T)^\gamma = (P_0 + p)(T_0)^\gamma \rightarrow \left(1 + \frac{\Delta T}{T_0} \right)^\gamma = \left(1 + \frac{p}{P_0} \right)^{\gamma-1}$$

$$1 + \frac{\Delta T}{T_0} = \left(1 + \frac{p}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Maclourin's Series:

$$f(x) = f(0) + x f'(0) + \frac{x^2}{2!} f''(0) + \frac{x^3}{3!} f'''(0) + \dots$$

Taylor's Series:

$$f(x+h) = f(x) + hf'(x) + \frac{h^2}{2!} f''(x) + \frac{h^3}{3!} f'''(x) + \dots$$

$$f(x-h) = f(x) - hf'(x) + \frac{h^2}{2!} f''(x) - \frac{h^3}{3!} f'''(x) + \dots$$

BASİT BİR KAYNAKTAN KÜRESEL YAYILMA

Teorik açıdan incelendiğinde en basit küresel ses kaynağı, “pulsating küre”dir. Yani kürenin yarıçapı zamanla sinüsoidal bir değişme gösteriyor. Gerçek hayatta böyle bir ses kaynağı bulunmamasına rağmen bu kaynak türünün anlaşılması pratikteki kaynaklara bir tanımlama olacaktır.

Kürenin ortalama yarıçapı a olarak kabul edilirse kürenin yüzeyindeki herhangi bir noktanın ortalama hızı ϑ_s aşağıdaki formdan

$$\vartheta_s = U_0 \cos \omega t$$

kompleks formda yazılırsa

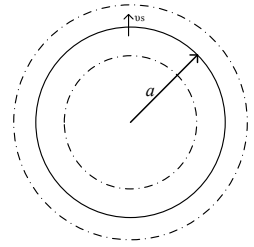
$$\underline{u}_s = U_0 e^{i\omega t}$$

Burada U_0 hız genliğidir.

ϑ_s 'nin küçük olduğu ve küre yüzeyi ile etrafındaki havanın sürekli temas halinde olduğu kabul edilirse

$\underline{u} = \frac{\underline{A}}{r z} e^{i(\omega t - kr)}$ formülü kullanılarak,

$\underline{u}_s = \frac{\underline{A}}{a z_a} e^{i(\omega t - ka)} = U_0 e^{i\omega t}$ olduğu görülecektir. Burada \underline{z}_a , $r = a$ için belirgin akustik impedanstır. Bu durumda,



$$\underline{A} = \frac{a z_a U_0 e^{i\omega t}}{e^{i(\omega t - ka)}} = a z_a e^{ika} U_0$$

Şayet titreşen kürenin yarıçapı a çok küçükse ve bütün frekanslarda $ka \ll 1$ ise

$$\underline{A} = a U_0 \left[\frac{\rho_0 c k a (ka + i)}{1 + k^2 a^2} \right] (\cos ka + i \sin ka) \quad \text{olduğundan ve } \cos ka = 1 \text{ ve } \sin ka = ka$$

$$\underline{A} \cong a^2 \rho_0 U_0 c k \left[\frac{(ka + i)(1 + ika)}{1 + k^2 a^2} \right] = a^2 \rho_0 U_0 c k \left[\frac{ka + ik^2 a^2 + i - ka}{1 + k^2 a^2} \right] \quad \text{burada } k^2 a^2 \cong 0 \text{ olduğundan}$$

$$\underline{A} \cong i a^2 \rho_0 U_0 c k$$

olarak bulunabilir.

Dolayısıyla

$$\underline{p} = \frac{\underline{A}}{r} e^{i(\omega t - kr)}$$

$$\underline{p} = \frac{i a^2 \rho_0 U_0 c k}{r} e^{i(\omega t - kr)}$$

veya

$$\underline{p} = \frac{i a^2 \rho_0 U_0 c k}{r} [\cos(\omega t - kr) + i \sin(\omega t - kr)]$$

$$\underline{p} = \frac{a^2 \rho_0 U_0 c k}{r} [i \cos(\omega t - kr) - \sin(\omega t - kr)]$$

Bu denklemin gerçek kökü dalğanın esas basıncını göstereceğinden

$$\underline{p} = -\frac{a^2 \rho_0 U_0 c k}{r} \sin(\omega t - kr)$$

Bu şekilde genlik sabiti kullanılarak diğer denklemler de çözülebilir. Mesela;

$$\underline{u} = \frac{ia^2 \rho_0 U_0 c k}{r z} e^{i(\omega t - kr)}$$

Problem:

Basit bir kaynaktan yayılan küresel bir dalganın partikül hızının $\underline{u} = \frac{ia^2 \rho_0 U_0 c k}{r z} e^{i(\omega t - kr)}$ olduğunu bilinmektedir. ka 'nın küçük değerleri için ve $r=a$ olduğunda $\underline{u} = U_0 e^{i\omega t}$ olduğunu gösteriniz.

Çözüm:

$$\underline{u} = \frac{ia^2 \rho_0 U_0 c k}{r z} e^{i(\omega t - kr)}$$

$r=a$ olduğu zaman

$$\underline{u} = \frac{ia^2 \rho_0 U_0 c k}{a z_a} e^{i(\omega t - ka)}$$

$$\underline{u} = \frac{ia \rho_0 U_0 c k}{z_a} e^{i(\omega t - ka)}$$

$$z = \rho_0 c \frac{kr(kr+i)}{(1+k^2r^2)} \text{ ise } z_a = \rho_0 c \frac{ka(ka+i)}{(1+k^2a^2)} \text{ yukarıdaki denkleme yerleştirildiğinde}$$

$$\underline{u} = \frac{ia \rho_0 U_0 c k}{\rho_0 c \frac{ka(ka+i)}{(1+k^2a^2)}} e^{i(\omega t - ka)} = \frac{iU_0}{\frac{(ka+i)}{(1+k^2a^2)}} e^{i\omega t}$$

$$\underline{u} = iU_0 e^{i\omega t} \frac{(1+k^2a^2)}{(ka+i)e^{ika}} = U_0 e^{i\omega t} \frac{i(ka-i)(ka+i)}{(ka+i)e^{ika}} = U_0 e^{i\omega t} \frac{i(ka-i)}{e^{ika}} = U_0 e^{i\omega t} \frac{(1+ka i)}{e^{ika}}$$

$$\underline{u} = U_0 e^{i\omega t} \frac{(1+ka i)}{\cos(ka) + i \sin(ka)}$$

küçük ka değerleri için yukarıdaki denklem aşağıdaki şekilde yazılırsa

$$\underline{u} = U_0 e^{i\omega t} \frac{(1+ka i)}{1+ika}$$

böylece

$$\underline{u} = U_0 e^{i\omega t}$$

Ayrıca MacLaurin serisini kullanarak e^{ika} ifadesini tekrar yazarak aynı sonucu aşağıdaki gibi bulabiliriz

$$f(x) = f(0) + x f'(0) + \frac{x^2}{2!} f''(0) + \dots + \frac{x^n}{n!} f^n(0)$$

Bu durumda

$$e^{ika} = e^0 + ika e^0 + \frac{(ika)^2}{2!} e^0 + \dots + \frac{(ika)^n}{n!} e^0$$

Problemde belirtilen ka 'nın küçük değerleri için ifadesini hatırlarsak yukarıdaki ifade

$e^{ika} \cong 1 + ika$ şeklinde ilgili denkleme yazıldığığında

$$\underline{u} = U_0 e^{i\omega t} \frac{(1+ka i)}{1+ika}$$

$$\underline{u} = U_0 e^{i\omega t}$$

Diğer bir yolla da elde edilmiş olur.

Şimdi basınç için yazmış olduğumuz

$\underline{p} = \frac{ia^2 \rho_0 U_0 c k}{r} e^{i(\omega t - kr)}$ denkleminde Q_s , kaynak mukavemeti, tanımlarsak basınç denklemi aşağıdaki gibi yazılacaktır.

$$\underline{p} = \frac{i \rho_0 c k}{4\pi r} Q_s e^{i(\omega t - kr)}$$

Kaynak mukavemeti, Q_s kaynak alanı ile hız genliğinin çarpımı olarak tanımlanmıştır ve

$$Q_s = 4\pi a^2 U_0 \text{ m}^3/\text{s}'\text{e eşittir.}$$

Genelde ise kaynak mukavemeti kaynağın yüzeyi ile o yüzeyde akan maksimum hacmin hızı ile çarpımına eşittir.

$$Q = \int_s \underline{u} ds$$

Eğer $ka \ll 1$ ise bu tür kaynaklar NOKTA KAYNAK olarak tanımlanır.

$$I = \frac{p^2}{2\rho_0 c} = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_0 c k}{4\pi r} \right)^2 Q_s^2 \frac{1}{\rho_0 c}$$

$$I = \frac{1}{32} \frac{\rho_0 c k^2}{\pi^2 r^2} Q_s^2$$

$W = AI$ Güç denklemi olduğu bilinirse

$$W = 4\pi r^2 I = \frac{1}{8} \frac{\rho_0 c k^2}{\pi} Q_s^2$$

Problem:

Bir yarım küre ses kaynağının yarı çapı 0.2 m'dir ve bir levha üzerine yerleştirilmiş suyun içerisinde 500 Hz frekansında küresel dalgalar yaymaktadır. Şayet kaynaktan 4 metre uzaklıkta ses basıncı seviyesi 50 dB ise (Ref 20 μ Pa) kaynağın yüzey yer değiştirme genliğini bulunuz.

Çözüm:

$$\delta_b = 10 \log_{10} \frac{P_{rms}^2}{P_{ref}^2}$$

$$P_{rms} = P_{ref} 10^{\frac{\delta_b}{20}}$$

$$P_{rms} = 20^{-6} \times 10^{\frac{50}{20}}$$

$$P_{rms} = 6.32 \times 10^{-3} \text{ Pa}$$

$$Q_r = 4\pi r^2 U_0$$

$$Z = \frac{U_0}{\omega} \quad U_0 = Z\omega$$

$$Q_s = 4\pi r^2 Z\omega$$

$$Q_s = 4\pi r^2 Z 2\pi f$$

$$r = a$$

$$Q_s = 8\pi^2 r^2 f Z$$

$$I_a = \frac{1}{32} \frac{\rho_0 c k^2}{\pi^2 a^2} Q_s^2$$

$$I_a = \frac{1}{32} \frac{\rho_0 c k^2}{\pi^2 a^2} 64\pi^4 r^4 f^2 Z^2$$

$$I_a = 2\rho_0 c k^2 \pi^2 a^2 f^2 Z^2$$

$$I_a = \frac{P_{rms}^2}{2\rho_0 c}$$

$$\frac{P_{rms}^2}{2\rho_0 c} = 2\rho_0 c k^2 \pi^2 a^2 f^2 Z^2$$

$$P_{rms} = 2\rho_0 c k a f Z \pi$$

$$Z = \frac{P_{rms}}{2\rho_0 c k a f \pi} \text{ ve } k = \frac{\omega}{c}$$

$$Z = \frac{P_{rms}}{2\rho_0 \omega a f \pi} \text{ ve } \omega = 2\pi f$$

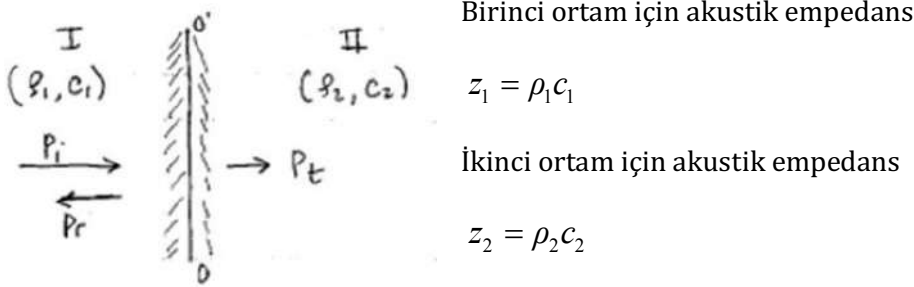
$$Z = \frac{P_{rms}}{4\rho_0 a f^2 \pi^2}$$

$$Z = \frac{6.32 \times 10^{-3}}{4\pi^2 \times (500)^2 \times 998 \times 0.2} = 3.2 \times 10^{-12} \text{ metre}$$

AKUSTİK İLETİM VE AKIS

Akustik Çevrede Değişim: Akustik dalga bir ortamda ilerlerken, o ortamın kenarına gelerek diğer bir ortama geçerse, bir "akıs dalgası" (reflected wave) birinci ortamda geri dönerek ilerlerken, "iletilmiş dalga" (transmitted wave) ikinci ortamın içinde ilerlemeye başlar. Akıs dalgası ile iletilmiş dalganın yoğunlukları ve akustik basınçları arasındaki oran iki ortamın karakteristik impedanslarına bağlıdır. Aralarında bir perde bulunan iki sıvı arasında oluşan iletimin modellenmesi izafi olarak kolay olduğundan, ilk olarak bu ele alınacaktır.

İki Sıvı Arasındaki İletim: Burada şekildeki $00'$ 'nü ile ortam arasındaki sınır olarak kabul edelim ve:



$$P_i = A_1 e^{i(\omega t - k_1 x)}$$

Şayet bu dalganın sınıra vurduğu nokta $x=0$ seçilirse, Akıs dalgası:

$$P_r = B_1 e^{i(\omega t + k_1 x)}$$

ve iletilen dalga:

$$P_t = A_2 e^{i(\omega t - k_2 x)}$$

Esas dalga ile iletilen dalga aynı frekansa sahiptir. Fakat iki ortamdaki dalga yayılma hızları farklı olduğundan, dalga uzunluğu sabiti (k) değişiktir.

$$k_1 = \frac{\omega}{c_1} \quad \text{ve} \quad k_2 = \frac{\omega}{c_2}$$

İki ortamı ayıran perde (sınır) üzerinde devamlı sağlanması gereken iki tane şartımız vardır.

1. Perdenin iki tarafındaki akustik basınç eşittir.
2. Partikül hızları eşittir.

Birinci şart, temel bir kanun olan, "bir sıvının içindeki basınç devamlıdır, tek değerlidir ve skalar bir fonksiyondur" un neticesidir. İkinci şart ise iki ortamın sınırda devamlı kontak halinde olmasının neticesidir.

Basınç bir skalar değer olduğundan I. ortamdaki basınç:

$$\underline{P}_I = \underline{P}_i + \underline{P}_r$$

Sınırdaki bu basınç ikinci ortamın basıncına eşit olduğundan $x=0$ için

$$A_1 e^{i\omega t} + B_1 e^{i\omega t} = A_2 e^{i\omega t} \Rightarrow A_1 + B_1 = A_2$$

Partikül hızları:

$$v_i = \frac{P_i}{\rho_1 c_1} ; v_r = \frac{P_r}{\rho_1 c_1} \text{ ve } v_t = \frac{P_t}{\rho_2 c_2}$$

dolayısıyla $x=0$ için:

$$\frac{P_i}{\rho_1 c_1} - \frac{P_r}{\rho_1 c_1} = \frac{P_t}{\rho_2 c_2}$$

$$\frac{1}{\rho_1 c_1} (A_1 e^{i\omega t} - B_1 e^{i\omega t}) = \frac{1}{\rho_2 c_2} (A_2 e^{i\omega t})$$

$$\Rightarrow \rho_2 c_2 (A_1 - B_1) = \rho_1 c_1 A_2$$

$$A_2 = A_1 + B_1$$

$$\Rightarrow \rho_2 c_2 (A_1 - B_1) = \rho_1 c_1 (A_1 + B_1)$$

$$A_1 (\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1) = B_1 (\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)$$

$$\Rightarrow \boxed{B_1 = A_1 \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}}$$

Bu denklemden açık olarak kompleks olarak kabul edilen B_1 ' in, gerçekte gerçek bir sayı olduğu görülmektedir. $B_1, \rho_2 c_2 > \rho_1 c_1$ olduğunda pozitif ve $\rho_2 c_2 < \rho_1 c_1$ olduğunda negatif oluyor. Yani yansıyan ses basıncı, $\rho_2 c_2 > \rho_1 c_1$ durumunda "incident wave" (esas dalga) ile aynı fazda, $\rho_2 c_2 < \rho_1 c_1$ içinde aralarında 180° lik bir faz farkı var.

Dikkat edilirse akis dalgasının genliği daima ilk genlikten daha küçük. Bunun iki tane istisnası var.

1. $\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \rightarrow \infty$ Yani dalganın neredeyse rijit (almost incompressible) bir ortamdan yansıması. Bu durumda $B_1 \cong A_1$ olacaktır.

2. $\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \rightarrow 0$ Yani kolayca sıkışabilen bir ortamdan olan yansıma.

Bu durumda $B_1 \cong A_1$ olacaktır. Fakat bu durumda sınırda B_1 neredeyse 0' dır. Yani bir node vardır.

I. ortamdaki akustik basınç,

$$P_i = A_1 e^{i(\omega t - k_1 x)} \text{ ve } P_r = B_1 e^{i(\omega t + k_1 x)}$$

Basınçlarının gerçek kısımlarının toplamı olacaktır.

$$P_1 = A_1 \cos(\omega t - k_1 x) + B_1 \cos(\omega t + k_1 x)$$

$$\cos(a \pm b) = \cos a \cos b \pm \sin a \sin b$$

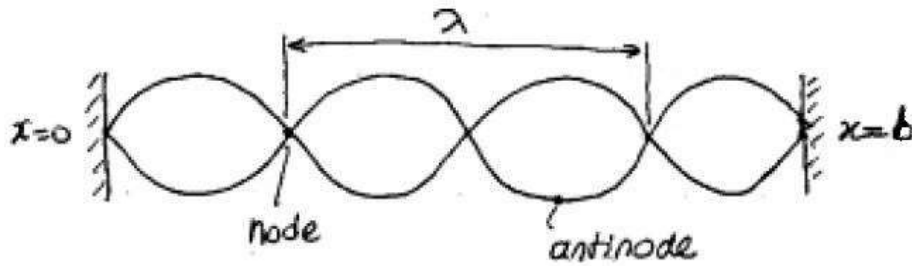
$$P_1 = A_1 [\cos(\omega t) \cos(k_1 x) + \sin(\omega t) \sin(k_1 x)] + B_1 [\cos(\omega t) \cos(k_1 x) - \sin(\omega t) \sin(k_1 x)] \text{ Dolayısıyla}$$

$$P_1 = [(A_1 + B_1) \cos(k_1 x)] \cos(\omega t) + [(A_1 - B_1) \sin(k_1 x)] \sin(\omega t)$$

$$P_1 = \left[(A_1 + B_1)^2 \cos^2(k_1 x) + (A_1 - B_1)^2 \sin^2(k_1 x) \right]^{\frac{1}{2}} \cos(\omega t + \varphi)$$

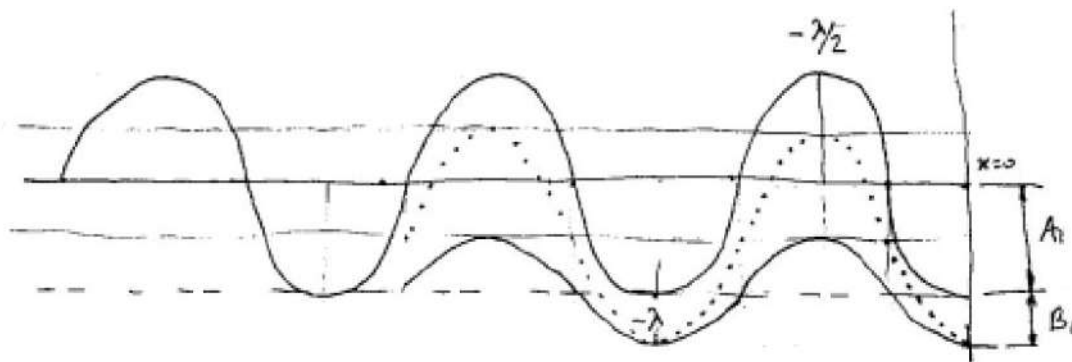
$$\tan \varphi = \frac{A_1 - B_1}{A_1 + B_1} \tan(k_1 x)$$

B_1 pozitif olduğu zaman, $\cos^2(k_1 x) = 1$ olduğu yerlerde (bu durumda $\sin^2(k_1 x) = 0$) $A_1 + B_1$ genliğinde basınç antinode ları oluşacaktır. Bu durum $x = 0$, $x = -\lambda/2$, $x = -2\lambda/2$, $x = -3\lambda/2$ vs. noktalarında olacaktır.



[Fakat bu çizim bizim denkleminize uymadı. Bu genel bir çizim.]

Bizim çizim için:



Yukarıdaki grafik ufak bir hata ile negatif B_1 için çizildi. Aynı şey pozitif B_1 için ters yönde çizilebilir. Burada $\sin^2(k_1 x) = 1$ olduğu durumda nodelerin oluştuğunu ve bunların $A_1 - B_1$ basınç genliğinde olduğunu görüyoruz. Bu durum $x = -\lambda/4$, $x = -3\lambda/4$, $x = -5\lambda/4$ vs. notalarında oluşacaktır.

Özel ve ilginç bir durum $\rho_2 c_2 = \rho_1 c_1$ durumunda meydana gelmektedir. Bu durumda $B_1 = 0$. Yani akis dalgası oluşmuyor. Yani iki ortam arasında akis dalgası oluşturmadan ses iletimi yapılabilmesi için $\rho_2 c_2 = \rho_1 c_1$ olmalı.

Akustik yoğunluğun $I = \frac{P^2}{2\rho_0 c}$ olduğunu biliyoruz.

Bu eşitlikten faydalanarak akis dalga enerjisinin, esas dalga enerjisine oranı:

$$\alpha_r = \frac{I_r}{I_i} = \frac{P_r^2 / 2\rho_1 c_1}{P_i^2 / 2\rho_1 c_1} = \frac{P_r^2}{P_i^2} = \frac{\underline{B}_1^2 e^{i2(\omega t + k_1 x)}}{A_1^2 e^{i2(\omega t - k_1 x)}} = \frac{\underline{B}_1^2}{A_1^2} e^{4k_1 x}$$

$$\alpha_r = \left(\frac{\underline{B}_1}{A_1} \right)^2 = \left(\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right)^2 \quad (x = 0 \text{ için})$$

Burada α_r ses gücü akis katsayısı (sound power reflection coefficient) olarak bilinir.

Biz daha önce

$$\underline{A}_2 = A_1 + \underline{B}_1$$

$$\rho_2 c_2 (A_1 - \underline{B}_1) = \rho_1 c_1 \underline{A}_2 \text{ olduğunu bulmuştuk.}$$

$$\Rightarrow \underline{B}_1 = \underline{A}_2 - A_1$$

$$\Rightarrow \rho_2 c_2 (A_1 - \underline{A}_2 + A_1) = \rho_1 c_1 \underline{A}_2$$

$$\Rightarrow 2\rho_2 c_2 A_1 - \rho_2 c_2 \underline{A}_2 = \rho_1 c_1 \underline{A}_2$$

$$\boxed{\underline{A}_2 = A_1 \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}}$$

Bu denklemden daha önce kompleks kabul edilen \underline{A}_2 ' ninde gerçekte, gerçek bir sayı A_2 olduğu görülmekte. Aynı zamanda A_2 pozitif bir sayıdır. Dolayısıyla iletilen dalga esas dalga ile daima aynı fazdadır. Dahası şayet $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1$ büyük ise (hava \rightarrow suya), $\underline{A}_2 \cong 2A_1$ olacaktır. $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1$ çok küçük ise (hava \rightarrow suya), $\underline{A}_2 \cong 0$ olacaktır.

İletilen ses gücü katsayısı α_t ise ($x=0$ için)

$$\alpha_t = \frac{I_t}{I_i} = \frac{A_2^2 / 2\rho_2 c_2}{A_1^2 / 2\rho_1 c_1} = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} \frac{A_2^2}{A_1^2}$$

$$\alpha_t = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} \left(\frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \right)^2 \Rightarrow \boxed{\alpha_t = \frac{4\rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{(\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1)^2}}$$

Bu denklemin $\rho_2 c_2$ ile $\rho_1 c_1$ arasındaki fark büyük olduğunda α_t 'nin küçük olacağı anlaşılmakta. Dikkat edilirse bu denklemde simetri vardır. Yani havadan suya olan iletimin katsayısı ile sudan havaya olan iletimin katsayısı aynı.

Bilinen standart karakteristikleri yerine koyarsak.

$$\alpha_t = \frac{4 \times 1480000 \times 415}{(1480000 + 415)^2} = 0.00112$$

bulunur ki, bu havadan suya veya sudan havaya iletilen ses gücü katsayısıdır.

BİR KATININ YÜZEYİNDE YANSIMA

Sıvı içerisinde gönderilen ve bir katının yüzeyine çarparak akis yapan bir dalga daha karışık bir karakteristiğe sahiptir. Yaptığımız analizi genelleştirebilmek için, yalnızca akis dalgası üzerinde yoğunlaşıp, katının içinde ilerleyen dalgayı ihmal edelim.

Dalganın özelliklerini “normal spesifik akustik impedans” (Z_n) cinsinden inceleyelim. Z_n , katının yüzeyinde etkiyen akustik basıncın, bununla ilgili yüzeye normal olan sıvı hızına oranıdır. Yüzeye etkiyen basınç, hız ile devamlı aynı fazda olmadığından Z_n kompleks olarak ifade edilmiştir.

$$Z_n = r_n + ix_n$$

Burada

r_n : direnç bileşeni (resistive component)

x_n : reaksiyon bileşeni (reactive component)

Şimdi, daha önce çalıştığımız ortamlardan II. sini bir katı ile yer değiştirirsek, daha önce tanımladığımız iki şart, ikisinin oranı şeklinde tek bir şart haline gelir. Yani:

$$Z_n = \frac{P_i + P_r}{U_i + U_r} \quad (x = 0 \text{ için})$$

$$P_i = A_1 e^{i(\omega t - k_1 x)} = A_1 e^{i\omega t}$$

$$P_r = B_1 e^{i(\omega t + k_1 x)} = B_1 e^{i\omega t}$$

$$U_i = \frac{P_i}{\rho_1 c_1}$$

$$U_r = -\frac{P_r}{\rho_1 c_1}$$

$$Z_n = \frac{(A_1 + B_1) e^{i\omega t}}{(A_1 - B_1) \frac{e^{i\omega t}}{\rho_1 c_1}} \Rightarrow \boxed{Z_n = \frac{(A_1 + B_1)}{(A_1 - B_1)} \rho_1 c_1}$$

$$\Rightarrow Z_n (A_1 - B_1) = (A_1 + B_1) \rho_1 c_1$$

$$\Rightarrow A_1 Z_n - A_1 \rho_1 c_1 = B_1 (Z_n + \rho_1 c_1)$$

$$\Rightarrow \boxed{B_1 = \frac{A_1 (Z_n - \rho_1 c_1)}{Z_n + \rho_1 c_1}}$$

Daha önce $Z_n = r_n + ix_n$ olarak tanımlamıştık.

$$\underline{B}_1 = A_1 \frac{(r_n + ix_n - \rho_1 c_1)}{r_n + ix_n + \rho_1 c_1} \Rightarrow \boxed{\underline{B}_1 = A_1 \frac{(r_n - \rho_1 c_1) + ix_n}{(r_n + \rho_1 c_1) + ix_n}}$$

Şayet \underline{Z}_n reel (gerçek) bir sayı ise, $r_n = \rho_2 c_2$ ve $x_n = 0$ olacağından bu denklem daha önce elde ettiğimiz;

$$\underline{B}_1 = A_1 \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}$$

haline dönüşecektir. Fakat bunun şu şekilde bir istisnası vardır. \underline{Z}_n reel sayı olduğunda, basınç genliği sabiti \underline{B}_1 kompleks ise sonuçta yansıyan dalga, sınırdaki incident dalgasını ya geriden takip eder ya da önden. Bu açı 0° ve 180° arasında değişir.

$$\underline{B}_1 = A_1 \frac{(r_n - \rho_1 c_1) + ix_n}{(r_n + \rho_1 c_1) + ix_n}$$

denkleminin sağ tarafının magnitüde (büyüklük) alınırsa:

$$B_1 = A_1 \left[\frac{(r_n - \rho_1 c_1)^2 + x_n^2}{(r_n + \rho_1 c_1)^2 + x_n^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Bu yansıyan dalganın genliğini bulmakta kullanılan eşitliklerdir. Ses gücü yansıma katsayısı (sound power reflection coefficient)'ni inceleyecek olursak:

$$\alpha_r = \left(\frac{B_1}{A_1} \right)^2 = \frac{(r_n - \rho_1 c_1)^2 + x_n^2}{(r_n + \rho_1 c_1)^2 + x_n^2}$$

Toplam enerjide bir değişim olmayacağından:

$$I_t + I_r = I_i \Rightarrow \frac{I_t}{I_i} + \frac{I_r}{I_i} = 1 \Rightarrow \alpha_t + \alpha_r = 1$$

$$\Rightarrow \alpha_t = 1 - \alpha_r$$

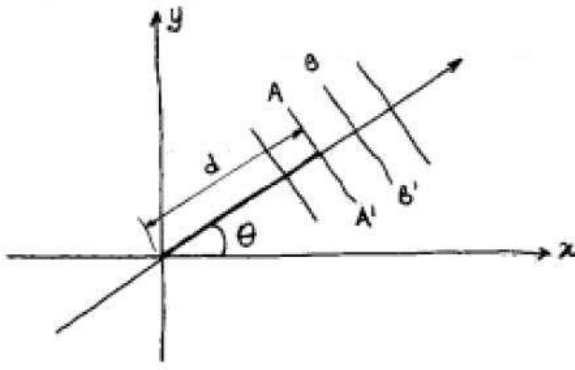
$$\alpha_t = 1 - \frac{(r_n - \rho_1 c_1)^2 + x_n^2}{(r_n + \rho_1 c_1)^2 + x_n^2} = \frac{(r_n + \rho_1 c_1)^2 + x_n^2 - (r_n - \rho_1 c_1)^2 - x_n^2}{(r_n + \rho_1 c_1)^2 + x_n^2}$$

$$\alpha_t = \frac{r_n^2 + 2\rho_1 c_1 r_n + \rho_1^2 c_1^2 - r_n^2 + 2\rho_1 c_1 r_n - \rho_1^2 c_1^2}{(r_n + \rho_1 c_1)^2 + x_n^2}$$

$$\alpha_t = \frac{4\rho_1 c_1 r_n}{(r_n + \rho_1 c_1)^2 + x_n^2}$$

Katının içine iletilen dalga genellikle zayıflamış bir dalga olup, katı içinde kaybolur. Bu sebeple yukarıdaki eşitlikte α_t genellikle α_n olarak alınır ve "ses gücü sönümlenme katsayısı" olarak da bilinir.

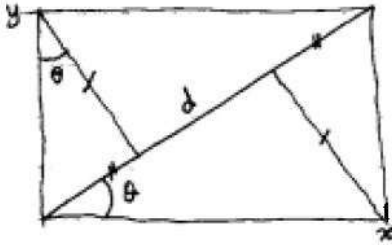
BİR SIVI ORTAMINDAN DİĞERİNE İLETİM (EĞİK DURUM)



AA' bir "wave front" kabul edilirse:

$$P = \underline{A}e^{i(\omega t - kd)}$$

Bu denklemi x ve y cinsinden yazacak olursak



$$d = x \cos \theta + y \sin \theta$$

Şimdi bunu yukarıdaki denklemde yerine koyacak olursak;

$$P = \underline{A}e^{i(\omega t - kx \cos \theta - ky \sin \theta)}$$

Basıncın devamlılığı kanunu uygulanırsa: ($x=0$ için)

$$\underline{A}_1 e^{-ik_1 y \sin \theta_i} \times e^{i\omega t} + \underline{B}_1 e^{-ik_1 y \sin \theta_r} \times e^{i\omega t} = \underline{A}_2 e^{-ik_2 y \sin \theta_t} \times e^{i\omega t}$$

$$\underline{A}_1 e^{-ik_1 y \sin \theta_i} + \underline{B}_1 e^{-ik_1 y \sin \theta_r} = \underline{A}_2 e^{-ik_2 y \sin \theta_t}$$

Bu eşitlik, yüzey dalgalarının iyi bilinen, yansıma ve iletim kanunları uygulanırsa, basitleştirilebilir. Snell'in bulduğu kanuna göre:

$$\frac{\sin \theta_i}{c_1} = \frac{\sin \theta_r}{c_1} = \frac{\sin \theta_t}{c_2}$$

Bu eşitlikler ışık dalgaları için geliştirilmiştir. Fakat aynı şekilde akustik dalgalara da uygulanabilirler. Yani

$$\boxed{\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{c_1}{c_2}}$$

Ya da daha değişik bir formda yazmak istenirse;

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\frac{\omega}{k_1}}{\frac{\omega}{k_2}} = \frac{k_2}{k_1}$$

$$\boxed{\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{k_2}{k_1}}$$

Snell'in kanununa göre $\frac{\sin \theta_i}{c_1} = \frac{\sin \theta_r}{c_1} \Rightarrow \boxed{\theta_i = \theta_r}$

Yine görülüyor ki: $\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{k_2}{k_1} \Rightarrow \boxed{k_1 \sin \theta_i = k_2 \sin \theta_t}$

Bu durumda: $-ik_1 y \sin \theta_i = -ik_1 y \sin \theta_r = -ik_2 y \sin \theta_t$

Dolayısıyla: $\boxed{A_1 + B_1 = A_2}$

Yüzeye dik olan (yani hızların x bileşenlerinin) birbirine sınırdaki eşit olması (hızların sürekliliğinden) gerektiğinden

$$\boxed{U_i \cos \theta_i + U_r \cos(180^\circ - \theta_r) = U_t \cos \theta_t}$$

Biz biliyoruz ki; $U = \frac{P}{\rho c}$

O halde bir önceki duruma benzer şekilde bizim denklemlerimiz;

$$\frac{A_1}{\rho_1 c_1} \cos \theta_i - \frac{B_1}{\rho_1 c_1} \cos \theta_r = \frac{A_2}{\rho_2 c_2} \cos \theta_t$$

A_2 'nin değeri yerine konulursa;

$$\frac{A_1}{\rho_1 c_1} \cos \theta_i - \frac{B_1}{\rho_1 c_1} \cos \theta_r = \frac{A_1 + B_1}{\rho_2 c_2} \cos \theta_t$$

$$\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} A_1 \cos \theta_i - \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} B_1 \cos \theta_r = A_1 \cos \theta_t + B_1 \cos \theta_t$$

$$B_1 \left(\cos \theta_t + \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \cos \theta_r \right) = A_1 \left(\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \cos \theta_i - \cos \theta_t \right)$$

Bildiğimiz gibi $\theta_i = \theta_r$

$$B_1 = \frac{\rho_2 c_2 \cos \theta_i - \rho_1 c_1 \cos \theta_t}{\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_t} A_1$$

Dikkat edilirse θ_i ve θ_t sıfır olduğunda normal durum ortaya çıkar ki, bu durumda denkleminiz daha önce normal durum için elde ettiğimiz:

$$B_1 = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} A_1 \text{ hali alır.}$$

Daha öncede bulunduğu gibi, ses gücü yansıma katsayısı, α_r

$$\alpha_r = \left(\frac{B_1}{A_1} \right)^2 \Rightarrow \alpha_r = \left(\frac{\rho_2 c_2 \cos \theta_i - \rho_1 c_1 \cos \theta_t}{\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_t} \right)^2$$

Benzer şekilde iletilen gücün katsayısı da, $\frac{A_2}{A_1}$ oranının tespitiyle mümkün olur. İletilen yoğunluk katsayısı α_i ;

$$\alpha_i = \frac{4 \rho_1 c_1 \rho_2 c_2 \cos \theta_i \cos \theta_t}{(\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_t)^2}$$

İletilen sesin ya genişlemesinden, ya da daralmasından dolayı bu eşitlik, transfer edilen toplam enerji yoğunluğunu gerektiği doğrulukta vermez. Bu yüzden iletilen ses gücü katsayısı daha yaygın kullanılır. Bu da:

$$\alpha_t = \frac{4 \rho_1 c_1 \rho_2 c_2 \cos \theta_i \cos \theta_t}{(\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_t)^2}$$

Esasında $\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{c_1}{c_2}$ eşitliğinden θ_t hesaplanarak, yukarıdaki eşitliğe konularak tek bir eşitlik elde etmek mümkündür. Fakat bu durumda uzun ve karmaşık bir eşitlik edilecektir. Bu yüzden θ_t 'nin ayrıca hesaplanarak yukarıdaki eşitlikte yerine konulması daha uygun olacaktır.

Bu denklemin bazı özel durumları vardır ki, bunlar bizi özel olarak ilgilendirir. Mesela:

$$\rho_2 c_2 \cos \theta_i = \rho_1 c_1 \cos \theta_t$$

olduğunda $\alpha_r = 0$ ve $\alpha_t = 1$ olur. Yani bütün güç (incident) iletilir. Bu durum için:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{c_1}{c_2} \Rightarrow \boxed{\sin \theta_i c_2 = \sin \theta_t c_1} \quad (a)$$

$$\rho_2 c_2 \cos \theta_i = \rho_1 c_1 \cos \theta_t \quad (b)$$

$$\sin \theta_i c_2 = \sin \theta_t c_1$$

$$\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1} \cos \theta_i = c_1 \cos \theta_t \quad \left. \vphantom{\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1} \cos \theta_i = c_1 \cos \theta_t} \right\} c_1^2 (\sin^2 \theta_i + \cos^2 \theta_i) = c_2^2 \sin^2 \theta_i + \frac{\rho_2^2 c_2^2}{\rho_1^2} \cos^2 \theta_i$$

$$\left(\frac{c_1}{c_2}\right)^2 = \sin^2 \theta_i + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2 \cos^2 \theta_i$$

$$\left(\frac{c_1}{c_2}\right)^2 - 1 = \sin^2 \theta_i - \sin^2 \theta_i - \cos^2 \theta_i + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2 \cos^2 \theta_i$$

$$\left(\frac{c_1}{c_2}\right)^2 - 1 = \cos^2 \theta_i \left(\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2 - 1 \right) \Rightarrow \boxed{\cos^2 \theta_i = \frac{\left(\frac{c_1}{c_2}\right)^2 - 1}{\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2 - 1}}$$

Bu bize %100 iletimin olduğu açığı verecektir. Bu açığa genellikle "intromission açısı" denir. $\cos^2 \theta_i$, daima (+) olduğundan bu açı yalnızca aşağıdaki durumlarda oluşacaktır.

$$1. \quad \rho_2 / \rho_1 > c_1 / c_2 > 1 \quad (+) \quad \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2 - 1 > \left(\frac{c_1}{c_2}\right)^2 - 1 \quad (+)$$

$$2. \quad \rho_2 / \rho_1 < c_1 / c_2 < 1 \quad (-) \quad \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2 - 1 > \left(\frac{c_1}{c_2}\right)^2 - 1 \quad (-)$$

Diğer bir özel hal $c_1 < c_2$ olduğu durumlarda bazı θ_c açıları için ortaya çıkar. Bu kritik açılarda, yansıma dalgası, yüzey normali ile 90° lik bir açı yapar. Bu kritik açı:

$$\sin \theta_c = \frac{c_1}{c_2}$$

Şayet incidence dalgasının açısı, kritik açığa eşitse veya daha büyükse, ikinci ortama iletilen akustik enerji sıfırdır. Bu durum Snell kanunundan ortaya çıkar. Şöyle ki,

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{c_1}{c_2} \quad \text{Şayet } \theta_i = 90^\circ \Rightarrow \sin \theta_c = \frac{c_1}{c_2}$$

Benzer bir durum, ortam özelliklerinde bağımsız θ_i 'nin 90° 'ye yaklaştığı durumlarda ortaya çıkar. Şöyle ki,

$$\theta_i = 90^\circ \Rightarrow \cos \theta_i \rightarrow 0$$

Yani

$$\alpha_r = \left(\frac{\overbrace{\rho_2 c_2 \cos \theta_i}^{\sim 0} - \rho_1 c_1 \cos \theta_i}{\underbrace{\rho_2 c_2 \cos \theta_i}_{\sim 0} + \rho_1 c_1 \cos \theta_i} \right)^2 \Rightarrow \boxed{\alpha_r \cong 1}$$

Yani bu durumda da akustik enerjinin tamamıyla yansıtılma durumu vardır.

Misal olarak sesin yağdan suya iletiminin değişik incedent açıları için, iletim açıları ve ses iletimi katsayısı, α_t olarak değerleri verilmiştir. Bu tablo için

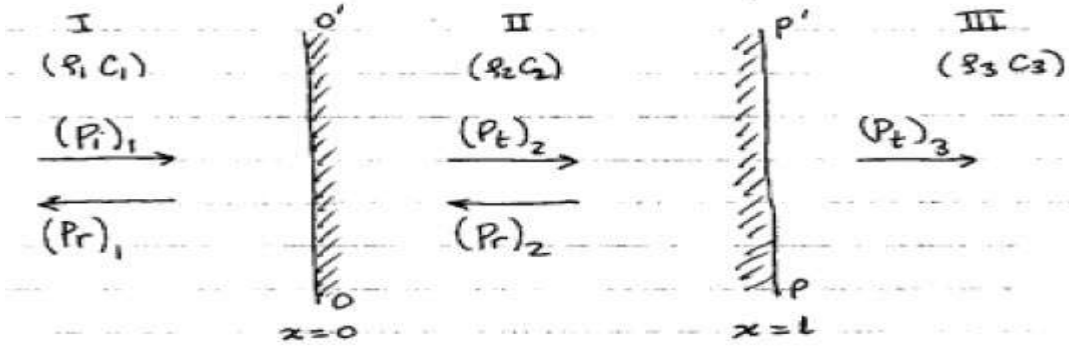
<p>Yağ</p> <p>$\rho_1 = 900 \text{ kg} / \text{m}^3$</p> <p>$c_1 = 1300 \text{ m} / \text{s}$</p> <p>$z_1 = 1117000 \text{ Ray} / \text{s}$</p>	<p>Su</p> <p>$\rho_2 = 998 \text{ kg} / \text{m}^3$</p> <p>$c_2 = 1481 \text{ m} / \text{s}$</p> <p>$z_2 = 1.48 \times 10^6 \text{ Ray} / \text{s}$</p>
--	--

θ_i (yağ) [Deg.]	θ_t (su) [Deg.]	α_t
0	0	0.986
30	34.8	0.979
45	54.8	0.953
50	61.2	0.935
55	69.0	0.885
60	81.0	0.63
61.4	90.0	0.00

Bu tabloda şuna dikkat etmekte fayda var; yağın belirgin akustik impedansı ile suyun ki arasında yaklaşık %20'lik bir fark bulunmasına rağmen, ses iletim katsayısı, kritik açığa yakın değerler dışında devamlı 1'e yakın çıkıyor.

ÜÇ ORTAM BOYUNCA İLETİM

Şimdi bir ortamda üçüncü bir ortama, ikinci ortamdan geçerek oluşan bir iletimi düşünelim. Esas dalganın (t) x yönünde ilerlediğini kabul edelim. Birinci ortamla ikinci ortam arasındaki sınır $x=0$ 'da olsun. İkinci ile üçüncü ortam arasındaki sınır 'da $x=L$ 'de yer alsın.



Incident dalgası (I. Ortamda):

$$(P_i)_1 = A_1 e^{i(\omega t - k_1 x)}$$

Bu dalgası I. Ve II. Ortamın sınırlarına ulaştığında dalganın bir kısmı iletilirken, bir kısmı akış dalgası olarak geri dönüyor II. Ortama geçen dalganın bir kısmı $x=L$ 'de III. Ortama geçecek ve diğer kısım geri dönecektir. Bu dönen kısım $x=0$ 'a gelip tekrar sınırdaki bir kısmını I. Ortama ileterek, bir kısmını yansıtacaktır. Bu proses bu şekilde devam edecektir. Daha sonra bu bir denge pozisyonuna gelecektir. Denge durumunda birinci ortama yansıyan enerji 'ile üçüncü ortama iletilen enerjinin toplamı, incident enerjisine eşit olacaktır. Bu denge pozisyonu oluşturduktan sonra:

$$(P_r)_1 = B_1 e^{i(\omega t + k_1 x)}$$

İletilen ve yansıyan dalgalar (II. Ortam için)

$$(P_t)_2 = A_2 e^{i(\omega t - k_2 x)}$$

Ve

$$(P_r)_2 = B_2 e^{i(\omega t + k_2 x)}$$

Ve III. Ortama iletilen dalgası:

$$(P_t)_3 = A_3 e^{i(\omega t - k_3 x')} = A_3 e^{i(\omega t - k_3 (x-L))}$$

$x=0$ için devamlılık denklemine göre, sınırın iki tarafındaki basıncı eşit olmak gerekir. O halde:

$$(P_i)_1 + (P_r)_1 = (P_t)_2 + (P_r)_2$$

$$A_1 e^{i\omega t} + B_1 e^{i\omega t} = A_2 e^{i\omega t} + B_2 e^{i\omega t}$$

$$\Rightarrow A_1 + B_1 = A_2 + B_2$$

$x=0$ 'da hızların sürekliliğinden:

$$(u_i)_1 + (u_r)_1 = (u_t)_2 + (u_r)_2$$

$$\frac{(P_i)_1}{\rho_1 c_1} - \frac{(P_r)_1}{\rho_1 c_1} = \frac{(P_t)_2}{\rho_2 c_2} - \frac{(P_r)_2}{\rho_2 c_2}$$

$$\Rightarrow \rho_2 c_2 (A_1 - B_1) = \rho_1 c_1 (A_2 - B_2)$$

Benzer şekilde $x=L$ için;

$$(P_t)_2 + (P_r)_2 = (P_t)_3$$

$$A_2 e^{i(\omega t - k_2 L)} + B_2 e^{i(\omega t + k_2 L)} = A_3 e^{i\omega t}$$

$$A_2 e^{i\omega t} e^{-ik_2 L} + B_2 e^{i\omega t} e^{ik_2 L} = A_3 e^{i\omega t}$$

$$\Rightarrow A_2 e^{-ik_2 L} + B_2 e^{ik_2 L} = A_3$$

Partikül hızlarının sürekliliğinden ($x=L$ için)

$$(u_t)_2 + (u_r)_2 = (u_t)_3$$

$$\frac{(P_t)_2}{\rho_2 C_2} - \frac{(P_r)_2}{\rho_2 C_2} = \frac{(P_t)_3}{\rho_3 C_3}$$

$$\rho_3 C_3 [A_2 e^{-ik_2 L} - B_2 e^{ik_2 L}] = \rho_2 C_2 A_3$$

Kompleks genleik A_3 'ü belirlemek için, kutu için alınmış 4 denklemden B_1 , A_2 ve B_2 'yi yok etmek gerekli. Bunun için, ilk iki denkem arasında B_1 yok edilirse:

$$B_1 = A_2 + B_2 - A_1$$

$$\Rightarrow \rho_2 C_2 (A_1 - A_2 - B_2 + A_1) = \rho_1 C_1 (A_2 - B_2)$$

$$(A_1 - A_2 - B_2) = \frac{\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2} (A_2 - B_2)$$

$$2A_1 = \frac{\rho_1 C_1 (A_2 - B_2) + \rho_2 C_2 (A_2 + B_2)}{\rho_2 C_2}$$

$$\Rightarrow A_1 = \frac{\rho_1 C_1 (A_2 - B_2) + \rho_2 C_2 (A_2 + B_2)}{2(\rho_2 C_2)}$$

Şimdi de :

$$A_2 e^{-ik_2 L} + B_2 e^{ik_2 L} = A_3$$

$$\Rightarrow A_2 = (A_3 - B_2 e^{ik_2 L}) e^{ik_2 L}$$

$$\rho_3 C_3 (A_2 e^{-ik_2 L} - B_2 e^{ik_2 L}) = \rho_2 C_2 A_3$$

$$\rho_3 C_3 [(A_3 - B_2 e^{ik_2 L}) - B_2 e^{ik_2 L}] = \rho_2 C_2 A_3$$

$$\Rightarrow A_3 - 2B_2 e^{ik_2 L} = \frac{\rho_2 C_2}{\rho_3 C_3} A_3 \quad \Rightarrow 2B_2 e^{ik_2 L} = \left(1 - \frac{\rho_2 C_2}{\rho_3 C_3}\right) A_3$$

$$\Rightarrow B_2 = \left(\frac{\rho_3 C_3 - \rho_2 C_2}{2\rho_3 C_3}\right) A_3 e^{-ik_2 L}$$

$$A_2 e^{-ik_2 L} + \left(\frac{\rho_3 C_3 - \rho_2 C_2}{2\rho_3 C_3}\right) A_3 = A_3$$

$$\Rightarrow A_2 = \left(\frac{2\rho_3 C_3 - \rho_3 C_3 + \rho_2 C_2}{2\rho_3 C_3}\right) A_3 e^{ik_2 L}$$

$$A_2 = \left(\frac{\rho_3 C_3 + \rho_2 C_2}{2(\rho_3 C_3)}\right) A_3 e^{ik_2 L}$$

Şimdi bu son iki değer kullanılarak:

$$A_1 = \frac{\rho_1 C_1 (A_2 - B_2) + \rho_2 C_2 (A_2 + B_2)}{2 \rho_2 C_2}$$

$$A_1 = [\rho_1 C_1 \left\{ \left(\frac{\rho_3 C_3 + \rho_2 C_2}{2 \rho_3 C_3} \right) A_3 e^{ik_2 L} - \left(\frac{\rho_3 C_3 - \rho_2 C_2}{2 \rho_3 C_3} \right) A_3 e^{-ik_2 L} \right\} + \rho_2 C_2 \left\{ \left(\frac{\rho_3 C_3 + \rho_2 C_2}{2 \rho_3 C_3} \right) A_3 e^{ik_2 L} + \left(\frac{\rho_3 C_3 - \rho_2 C_2}{2 \rho_3 C_3} \right) A_3 e^{-ik_2 L} \right\}] \rho_2 C_2$$

$$A_1 = \frac{[\rho_1 C_1 (\rho_3 C_3 + \rho_2 C_2) e^{ik_2 L} - \rho_1 C_1 (\rho_3 C_3 - \rho_2 C_2) e^{-ik_2 L} + \rho_2 C_2 (\rho_3 C_3 + \rho_2 C_2) e^{ik_2 L} + \rho_2 C_2 (\rho_3 C_3 - \rho_2 C_2) e^{-ik_2 L}] A_3}{4 \rho_3 C_3 \rho_2 C_2}$$

$$A_1 = \frac{[(\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2) (\rho_3 C_3 + \rho_2 C_2) e^{ik_2 L} + (\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1) (\rho_3 C_3 - \rho_2 C_2) e^{-ik_2 L}] A_3}{4 \rho_3 C_3 \rho_2 C_2}$$

$$\frac{A_1}{A_3} = \frac{(\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2) (\rho_3 C_3 + \rho_2 C_2) [\cos k_2 L + i \sin k_2 L] + (\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1) (\rho_3 C_3 - \rho_2 C_2) [\cos k_2 L - i \sin k_2 L]}{4 \rho_3 C_3 \rho_2 C_2}$$

$$\frac{A_1}{A_3} = \frac{[\cancel{\rho_2 C_2 \rho_3 C_3} + \cancel{\rho_2^2 C_2^2} + \cancel{\rho_1 C_1 \rho_3 C_3} + \cancel{\rho_1 C_1 \rho_2 C_2} + \cancel{\rho_2 C_2 \rho_3 C_3} - \cancel{\rho_2^2 C_2^2} - \cancel{\rho_1 C_1 \rho_3 C_3} + \cancel{\rho_1 C_1 \rho_2 C_2}] \cos k_2 L}{4 \rho_3 C_3 \rho_2 C_2} + \frac{[\cancel{\rho_2 C_2 \rho_3 C_3} + \cancel{\rho_2^2 C_2^2} + \cancel{\rho_1 C_1 \rho_3 C_3} + \cancel{\rho_1 C_1 \rho_2 C_2} - \cancel{\rho_2 C_2 \rho_3 C_3} - \cancel{\rho_2^2 C_2^2} + \cancel{\rho_1 C_1 \rho_3 C_3} - \cancel{\rho_1 C_1 \rho_2 C_2}] i \sin k_2 L}{4 \rho_3 C_3 \rho_2 C_2}$$

$$\frac{A_1}{A_3} = \frac{\cancel{\rho_2 C_2 \rho_3 C_3} + \cancel{\rho_1 C_1 \rho_2 C_2}}{2 \cancel{\rho_2 C_2} \rho_3 C_3} \cos k_2 L + i \frac{\cancel{\rho_2^2 C_2^2} + \cancel{\rho_1 C_1 \rho_3 C_3}}{2 \rho_2 C_2 \rho_3 C_3} \sin k_2 L$$

$$\Rightarrow \frac{A_1}{A_3} = \frac{\rho_3 C_3 + \rho_1 C_1}{2 \rho_3 C_3} \cos k_2 L + i \frac{\rho_2^2 C_2^2 + \rho_1 C_1 \rho_3 C_3}{2 \rho_2 C_2 \rho_3 C_3} \sin k_2 L$$

Ses gücü transfer katsayısı (I. Ortamdan III. Ortama)

$$\alpha_t = \frac{(P_t)_3}{(P_i)_1} = \frac{\rho_1 C_1 (A_3)^2}{\rho_3 C_3 (A_1)^2}$$

Yukardaki eşitlikleri $\left(\frac{A_3}{A_1}\right)$ 'in magnitüde 'unu bulacak olursak. Yani gerçek ve sanal köklerini alıp toplayacak olursak.

$$\left| \frac{A_1}{A_3} \right| = \left[\frac{(\rho_1 C_1 + \rho_3 C_3)^2}{4 \rho_3^2 C_3^2} \cos^2 k_2 L + \frac{(\rho_2^2 C_2^2 + \rho_1 C_1 \rho_3 C_3)^2}{4 \rho_3^2 C_3^2 \rho_2^2 C_2^2} \sin^2 k_2 L \right]^{1/2} \quad /$$

$$\left(\frac{A_1}{A_3}\right)^2 = \frac{(\rho_1 C_1 + \rho_3 C_3)^2 \rho_2^2 C_2^2 \cos^2 k_2 L + (\rho_2^2 C_2^2 + \rho_1 C_1 \rho_3 C_3)^2 \sin^2 k_2 L}{4 \rho_3^2 C_3^2 \rho_2^2 C_2^2}$$

$$\alpha_t = \frac{\rho_1 C_1}{\rho_3 C_3} \frac{4 \rho_3^2 C_3^2 \cancel{\rho_2^2 C_2^2}}{\cancel{\rho_3 C_3} (\rho_1 C_1 + \rho_3 C_3)^2 \rho_2^2 C_2^2 \cos^2 k_2 L + \cancel{\rho_2^2 C_2^2} \left(\rho_2 C_2 + \frac{\rho_1 C_1 \rho_3 C_3}{\rho_2 C_2} \right)^2 \sin^2 k_2 L}$$

$$\alpha_t = \frac{4 \rho_1 C_1 \rho_3 C_3}{(\rho_1 C_1 + \rho_3 C_3)^2 \cos^2 k_2 L + \left(\rho_2 C_2 + \frac{\rho_1 C_1 \rho_3 C_3}{\rho_2 C_2} \right)^2 \sin^2 k_2 L}$$

Bu denklemin bazı özel halleri vardır ki, biz bunlarla yalından ilgileriniz .

Bunlardan birisi baştaki ve sondaki sıvının aynı olsa durumudur.

Bu halde $\rho_1 C_1 = \rho_3 C_3$

$$\alpha_t = \frac{4 \rho_1^2 C_1^2}{4 \rho_1^2 C_1^2 \cos^2 k_2 L + \rho_1^2 C_1^2 \left(\frac{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \right)^2 \sin^2 k_2 L}$$

$$\alpha_t = \frac{4}{4 \cos^2 k_2 L + \left(\frac{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \right)^2 \sin^2 k_2 L}$$

Şayet buna ilaveten $\rho_2 C_2 \gg \rho_1 C_1$ ise

$$\alpha_t \cong \frac{4}{4 \cos^2 k_2 L + \left(\frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1} \right)^2 \sin^2 k_2 L}$$

Bu son durum mesela, sesin bir odadan öbür odaya bir duvarı aşarak girmesi durumudur yada sesin bir suyun içindeki çelik levhanın bir tarafından öbür tarafına geçmesi durumudur.

Esasında odaları ayıran duvarlar, havaya göre öyle büyük delirgin impedansa (ρC) sahiptirler ki:

$\left(\frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1} \right) \sin k_2 L \gg \cos k_2 L$ 'dir bu durumda:

$$\alpha_t \approx \frac{4 \rho_1^2 C_1^2}{\rho_2^2 C_2^2 \sin^2 k_2 L}$$

Son olarak çok kalın duvarla ve yüksek frekanslar haricinde, $K_2 L \ll 1$ 'dir. Bu durumda $\sin k_2 L = k_2 L$ olarak alınabilir. O halde

$$\alpha_t \approx \frac{4 \rho_1^2 C_1^2}{\rho_2^2 C_2^2 k_2^2 L^2}$$

Yukarıda son olarak yaptığımız kabülün doğruluğunu ispatlamak isterek: 100 Hz 'de bir sesin, 0.1 m kalınlıktaki bir duvar için $K_2 L$ 'yi hesaplayacak olursak.

$$K_2 = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\frac{C_2}{f}} = \frac{2\pi f}{C_2} \implies k_2 L = \frac{2\pi \cdot 1000}{3100} \times 0.1 = 0.2 \text{ rad.}$$

Yukarıdaki eşitlik daha kolay bir kullanım için şu şekilde de yazılabilir.

$$\alpha_t \cong \left(\frac{\rho_1 C_1}{\pi} \right)^2 \frac{1}{\sigma^2 f^2}$$

Burada σ duvarın alan yoğunluğu kg m^2 olarak ve f , frekans.

$$\text{Dikkat edilirse } K_2 = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\frac{c_2}{f}} \Rightarrow K_2 C_2 = 2\pi f$$

$$\alpha_t = \frac{4\rho_1^2 C_1^2}{\rho_2^2 (C_2 k_2)^2 L^2} = \frac{4\rho_1^2 f^2}{\rho_2^2 4(\pi f)^2 L^2} \quad [\sigma \Rightarrow L]$$

Dolayısıyla:

$$\alpha_t \cong \left(\frac{\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2} \right)^2 \frac{1}{\sigma^2 f^2}$$

Bir odanın duvarının iletim özellikleri genellikle dB olarak 'iletim kaybı' (transmission loss-TL) olarak belirlenir. Yani

$$TL = 10 \log_{10} \frac{I_i}{I_t}$$

Burada I_i : incident yoğunluğu

I_t : iletim yoğunluk

$$\text{Fakat biz biliyoruz ki, } \alpha_t = \frac{I_t}{I_i} \quad \frac{1}{\alpha_t} = \frac{I_i}{I_t}$$

Dolayısıyla

$$TL = 10 \log_{10} \frac{\sigma^2 f^2 \pi^2}{\rho_1^2 C_1^2} = 20 [\log_{10} (\sigma f \pi) - \log_{10} (\rho_1 C_1)]$$

Ya da

$$TL = 20 \log_{10} \frac{\pi}{\rho_1 C_1} + 20 \log_{10} \sigma f$$

Diğer bir özel form

II. ortam I. Ve III. Ortamdan daha büyük bir belirgin impedansa sahip fakat kalınlığı o kadar düşük ki, ortalama bir belirgin impedan için:

$$\rho_2 C_2 \sin k_2 L \ll 1 \quad \text{ve} \quad \cos k_2 L \cong 1$$

Bu durumda

$$\alpha_t = \frac{4\rho_1 C_1 \rho_3 C_3}{(\rho_1 C_1 + \rho_3 C_3)^2 \cos^2 k_2 L + (\rho_2 C_2 + \frac{\rho_1 C_1 \rho_3 C_3}{\rho_2 C_2})^2 \sin^2 k_2 L}$$

$$\alpha_t \cong \frac{4\rho_1 C_1 \rho_3 C_3}{(\rho_1 C_1 + \rho_3 C_3)^2}$$

Bu daha önce ila ortam için bulduğumuz $\alpha_t = \frac{4\rho_1 C_1 \rho_2 C_2}{(\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2)^2}$ eşitliğinin aynısı. Yani ortadaki ortam adeta yok. Bu da gösteriyor ki, iki sıvı birbirinden ince bir plaka ile ayrılırsa birbirine karışmaz, fakat akustik özellikte önemli bir değişim söz konusu olmaz.

Benzer şekilde şayet ortadaki ortam öyle bir kalınlığa sahipse ki, $K_2L \cong n\pi$ oluyorsa, burada n, herhangi bir tam sayı, biz yine yukarıdaki eşitliği elde ederiz. Fakat burada dikkat edilmesi gereken ince bir nokta var, ince levhalarda belirli bir frekansın altındaki ($\rho_2C_2 \sin k_2L \ll 1$) frekanslar için α_t , orta levhadan bağımsızken, kalın levha veya duvarlarda yalnızca belli frekanslarda $f = \frac{nC_2}{2L}$ bu bağımsızlık oluşacaktır.

Son olarak şayet $K_2L \cong \frac{\pi(2n-1)}{2}$ ise (burada n bir tam sayıdır) $\cos k_2L \cong 0$ ve $\sin k_2L \cong 1$ olacaktır.

Dolayısıyla bizim denkleminiz:

$$\alpha_t \cong \frac{4\rho_1C_1\rho_3C_3}{(\rho_2C_2 + \frac{\rho_1C_1\rho_3C_3}{\rho_2C_2})^2}$$

Dikkat edilirse bu eşitlik $\rho_2C_2 = \sqrt{\rho_1C_1\rho_3C_3}$ olduğunda 1. olacaktır. Dolayısıyla ortadaki ortamın ' belirgin akustik impedansı ' diğer ikisinin geometrik ortalaması alınır ve kalınlık ayarlanırsa %100 bir iletim sağlanabilir. Fakat bud a çok sınırlıdır ve yalnızca belirli frekans bantlarını geçirir.

$$f = (2n-1) \frac{C_2}{4L}$$

Yada kalınlık öyle ayarlanmalı ki

$$L = (2n-1) \frac{\lambda_2}{4}$$

Burada minimum kalınlık:

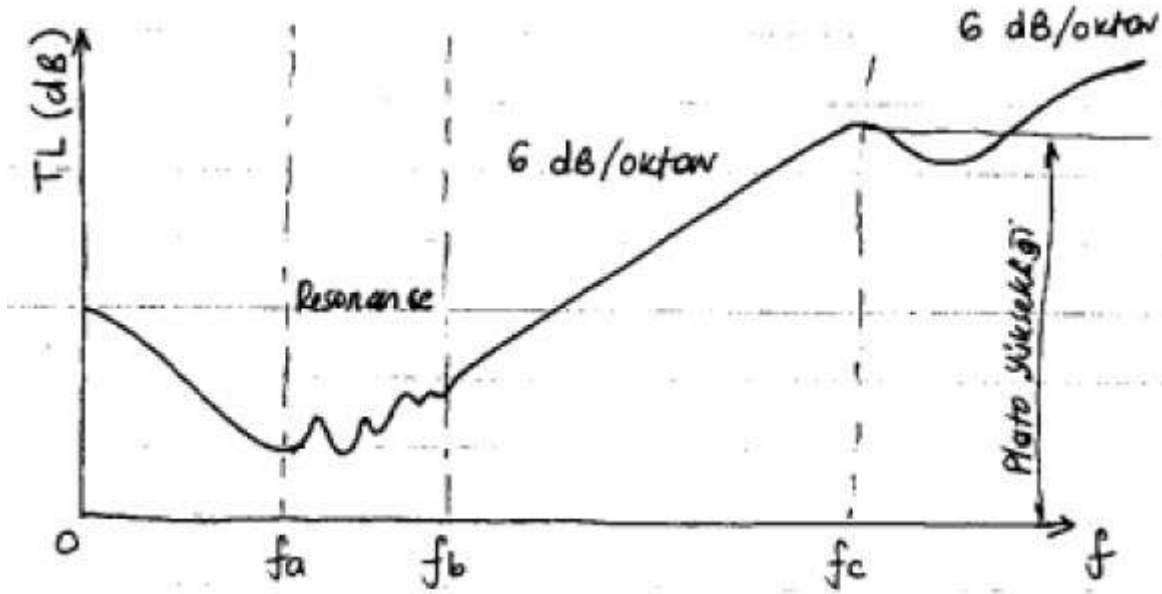
$$L = \frac{\lambda_2}{4}$$

Bu dalga boyunun ¼ ile %100 iletimi sağlama, gözlüldarda kullanılan yüzey kaplamasına benzer. Böylece yansıma önlenir.

Ses yalıtım, yapılmak istendiğinde, bir malzemenin ses iletim katsayısının küçük (dolayısıyla ses iletim kaybının büyük) olması istenir. Bir malzemenin ses iletim kaybının:

$$TL = 20 \log_{10} \sigma_f + 20 \log_{10} \frac{\pi}{\rho_1C_1}$$

Olduğunu görmüştük. TL'nin frekanla tipik bir değişimi şu şekilde verilebilir.



Şekil: Homojen bir malzeme için ses iletim kaybının frekansla değişimi

$0 \rightarrow f_a$: Direngelik kontrollü bölge

$f_a \rightarrow f_b$: Rezonans kontrollü bölge

$f_b \rightarrow f_c$: Kütle kontrollü bölge

Yüzey yoğunluğu belli bir malzemenin rezonans bölgesi ve şekilde gösterilen 'plato yüksekliği' malzemenin direngeliğine bağlıdır. Rezonanstan sonraki, plato yüksekliğine erişilene kadar olan bölgeye kütle kontrollü bölge denir ve bu bölgede 'kütle konumu' denilen yukardaki eşitlik geçerli olur.

<u>Malzeme</u>	<u>yüzey yoğunluğu [(kg/m²)/cm]</u>	<u>plato yüksekliği (dB)</u>
Aliminyum levha	27	29
Beton	23	38
Cam	29	27
Çelik levha	78	40
Kurşun levha	125	56
Sıvı	17	30
Tahta	4-8	19
Tuğla	19-23	37

Cizelge: Bazı malzemelerin yüzey yoğunlukları ve plato yükseklikleri

Verilen bir malzemenin ses iletim kaybı daha önce verdiğimiz eşitlikten hesaplanabilir. Fakat bu eşitlikten elde edilen değer plato yüksekliğinden. (PY) daha büyükse, tersten giderek PY 'nin elde edildiği frekans hesaplanır, bundan sonraki 3 oktav bandında TL 'nin sabit kaldığı ve PY değerine eşit olduğu kabul edilir. Daha sonraki her oktav bandında ise TL 'ni 6 dB artığı kabul edilerek hesaplama yapılır.

Daha önce verdiğimiz şekilden de görüleceği gibi, PY 'ne erişildikten sonra ses iletim kaybında (TL) bir düşüş olur. Bu düşüşün olduğu frekansa 'kritik frekans' ya da 'çakışım frekansı' denir. Bu frekansın değeri, malzemenin yüzey yoğunluğuna ve direngenliğine (yani malzemenin cinsine ve kalınlığına) bağlıdır. Levha boyutları çakışım frekansının değerini değiştirmez. Bu frekansta ses iletim kaybında ani bir düşme gözlenir. Bunun nedeni 'çakışım' denilen bir olaydır. Çakışım olayı, sesin havadaki yayılma hızının, söz konusu levha içerisindeki dalgaların ilerleme hızına eşit olduğunda ortaya çıkar. Sesin havadaki yayılma hızı sabit olacaktır birlikte, katılar içindeki ilerlenen hızı frekansa bağlıdır. Çakışım frekansında, levha üzerine gelen ses enerjisini çok iyi bir şekilde iletir. Her tür malzeme için çakışım frekansı ile, levha kalınlığını ilişkilendiren bir eşitlik bulunabilir. Çelik levhalar için, çakışım frekansı Hz olacak, t (cm) verildiğinde şu şekilde bulunabilir (yaklaşık),

$$f_c = \frac{1270}{t} \quad [\text{Hz}]$$

Bu eşitlik cam ve alüminyum levhalar için de kullanılabilir. Gürültü kontrolü için ses yalıtı levhalarının kullanımı durumunda, kullanılan levhanın çakışım frekansının engellenmesi istenilen frekans bandı içinde kalmamasına dikkat edilmelidir.

Örnek:

Bir meşe kapı ile geniş (35.4 in) 0.900m boyutları vardır, (1.38 in) 35mm ile yüksek binası, 1.800m (70.9 in) kalınlığında. Her iki hava Kapı 20°C (68°F) bir sıcaklığa sahip olan bir c=343.2 m/c (1126 ft/sec), $\rho=1.204 \text{ kg/m}^3$ (0.0752 lb_m/ft³), ve Z₀=413.3 rayl belirleyin Aşağıdaki frekanslar için iletim kaybı: (a) 63 Hz, (b) 250 Hz, ve (c) 2000 Hz.

Biz Ek C meşe kapı için aşağıdaki özellikleri bulabiliriz:

Boyuna ses dalgası dalga hızı: C_L= 3860 m/s (12,700 ft/sec)

Yoğunluk: $\rho_w= 770 \text{ kg/m}^3$ (48.1 lb_m/ft³)

Kritik frekans ürün.

$$M_s f_c = (11,900 \text{ Hz-kg/m}^2)(343.2/346.1)^2 \\ = 11,700 \text{ Hz-kg/m}^2 (2397 \text{ Hz- lb}_m/\text{ft}^2)$$

sönümlenme faktörü: $\eta=0.008$

Young modülü: E=11.2 Gpa (1.62×10⁶ psi)

Poisson oranı: $\sigma=0.15$

İlk rezonans frekansı bulunur.

$$f_{11} = 0.4534 c_L h (1/a^2 + 1/b^2)$$

$$F_{11}=(0.4534)(2860)(0.035)[(1/0.90^2) + (1/1.80^2)] = 94.5 \text{ Hz}$$

Özel kütlesi:

$$M_s=\rho_w h= (770)(0.035)=26.95 \text{ kg/m}^2 \text{ (5.52 lb}_m\text{/ft}^2\text{)}$$

Kritik veya dalga tesadüf frekans oranı MS fc den bulunur:

$$f_c = \frac{M_s f_c}{M_s} = \frac{(11,700)}{(26.95)} = 434.1 \text{ Hz}$$

(a) $f = 63 \text{ Hz}$ için

Frekans $f=63 \text{ Hz} < 94.5 \text{ Hz} = f_{11}$ bu nedenle, bu durumda Region yatmaktadır
Yani, sertlik kontrollü bölgesi. Özgü mekanik uygun olabilir.

$$C_s = \frac{(768)(1-0.15^2)}{(\pi^8)(11.2)(10^9)(0.035)^3[(1/0.90)^2+(1/1.80)^2]^2}$$
$$= 70.81 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{N}$$

$$C_s = 70.81 \text{ nm/pa}$$

Aşağıdaki gibi tanımlanır parametrenin değeri:

$$K_s = 4\pi f Z_1 C_s = (4\pi)(63)(413.3)(70381)(10^{-9}) = 0.02317$$

Ses güç iletim katsayısı hesaplanabilir:

$$A_t = K_s^2 \ln(1+K_s^{-2}) = (0.02317)^2 \ln[1+(0.02317)^{-2}] = 0.004042$$

Aşağıdaki gibi 64 Hz'lik bir frekans için iletim kaybı:

$$TL = 10 \log_{10}(1/0.004042) = 23.9 \text{ dB}$$

(b) $f = 250 \text{ Hz}$ için

Bu durum için, $f = 94.5 \text{ Hz} < 250 \text{ Hz} < 434.1 \text{ Hz} = f_c$, bu nedenle, işletim bölgesi Bölgesi II. kitle kontrollü bölgedir. Ses gücü normal durum için iletim katsayısı bulunur.

$$\frac{1}{a_{tn}} = 1 + \left(\frac{\pi f M_s}{z_1}\right)^2 = 1 + \left[\frac{(\pi)(250)(26.95)}{(413.3)}\right]^2 = 1 + (51.21)^2$$

$$\frac{1}{a_{tn}} = 2623.8$$

Normal durum için iletim kaybı bulunur:

$$TL_n = 10 \log_{10}\left(\frac{1}{a_{tn}}\right) = 10 \log_{10}(2623.8) = 34.2 \text{ dB}$$

250 Hz frekans için rastgele sıklığı ile iletim kaybı bulunur:

$$TL = 34.2 - 5 = 29.2 \text{ dB}$$

(a) $f = 2000 \text{ Hz}$ için

Frekans, $f = 2000 \text{ Hz} > 434.1 \text{ Hz} = f_c$, bu nedenle, bu durumda yatıyor Bölge III. sönüm kontrollü bölgesi. Normal için iletim kaybı Kritik frekansta insidansı halen.

$$TL_n(f_c) = 10 \log_{10}\left\{1 + \left[\frac{(\pi)(11,700)}{(413.3)}\right]^2\right\} = 10 \log_{10}(1+7909) = 39.0 \text{ dB}$$

2000Hz bir frekans için iletim kaybı bulunur.

$$TL=39.0+10 \log_{10}(0.008)+33.22\log_{10}(2000/434.1)-5.7$$

$$TL=39.0+(-21.0)+22.0-5.7=34.3 \text{ dB}$$

Örnek:

Bir çelik levha (yoğunluğu 7700 kg/m^3), 0.900m (35.4 in) ve 1.800 (70.9in) boyutları vardır, levhanın her iki tarafta hava bir özelliğe sahiptir empedansı 413.3 rayl (at 20°C) ve ses hızı 343.3 m/s . Bir frekansta 500 Hz , bunun bir iletim kaybı olması istendiği 30 dB . Levhanın istenilen kalınlıkta belirleyin.

Biz bölge bilmiyorum çünkü bu sorun, yinleme içerir iletim kaybı için. Bize Bölgesi II deneyerek başlayalım bölgesi. Normal durum için gerekli iletim kaybı.

$$TL_n=TL+5=30+5=35\text{dB}$$

$$TL_n=10 \log_{10}[1+(\pi M_s f/Z_1)^2]=35\text{dB}$$

$$(\pi M_s f/Z_1)^2=10^{35/10}-1=3161.3$$

Yüzey kütlesi:

$$M_s=\frac{(3161)^{\frac{1}{2}}(413.3)}{(\pi)(500)}=14.79 \text{ kg/m}^2=\rho_w h$$

Aşağıdaki gibi istenilen kalınlıkta (TL bölge Bölgesi II. ise) 'dir:

$$h=\frac{14.79}{7700}=0.00192 \text{ m}=1.92 \text{ mm}(0.076 \text{ in})$$

Şimdi, Bölge II davranış varsayımı kontrol edelim. Kritik Frekans $M_s f_c$ üründen bulunursa.

Çelik:

$$M_s f_c=(99,700)(343.2/346.1)^2=98,040 \text{ Hz}\cdot\text{kg/m}^2$$

Kritik veya dalga-tesadüf frekans:

$$f_c=\frac{M_s f_c}{M_s}=\frac{(98,040)}{(14.79)}=6630 \text{ Hz} > 500 \text{ Hz}=f$$

Panel birinci rezonant frekans bulunursa:

$$f_{11}=(0.4534)(5100)(0.00192)[(1/0.900)^2+(1/1.800)^2]$$

$$f_{11}=6.85 \text{ Hz} < 500 \text{ Hz}=f$$

Frekans $f=500 \text{ Hz}$, Bölge II. yer almaktadır, çünkü $f_{11} < f < f_c$, ve gerekli panel kalınlığı:

$$h=1.92\text{mm}(0.076 \text{ in}).$$

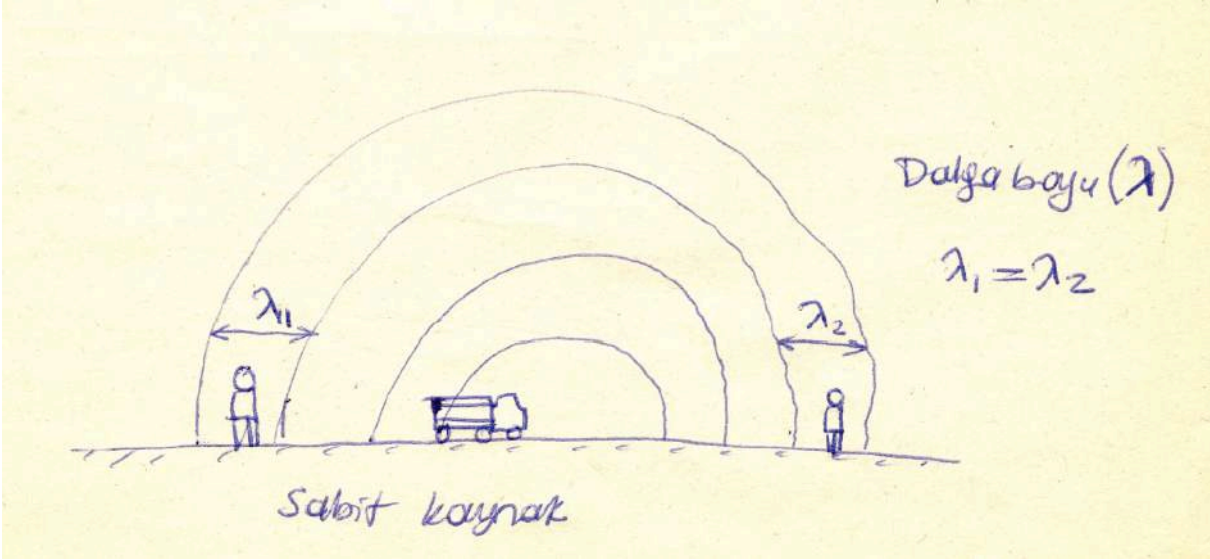
Kaynak : 'Randall F. Barron' Industrial Noise Control and Acoustics ,

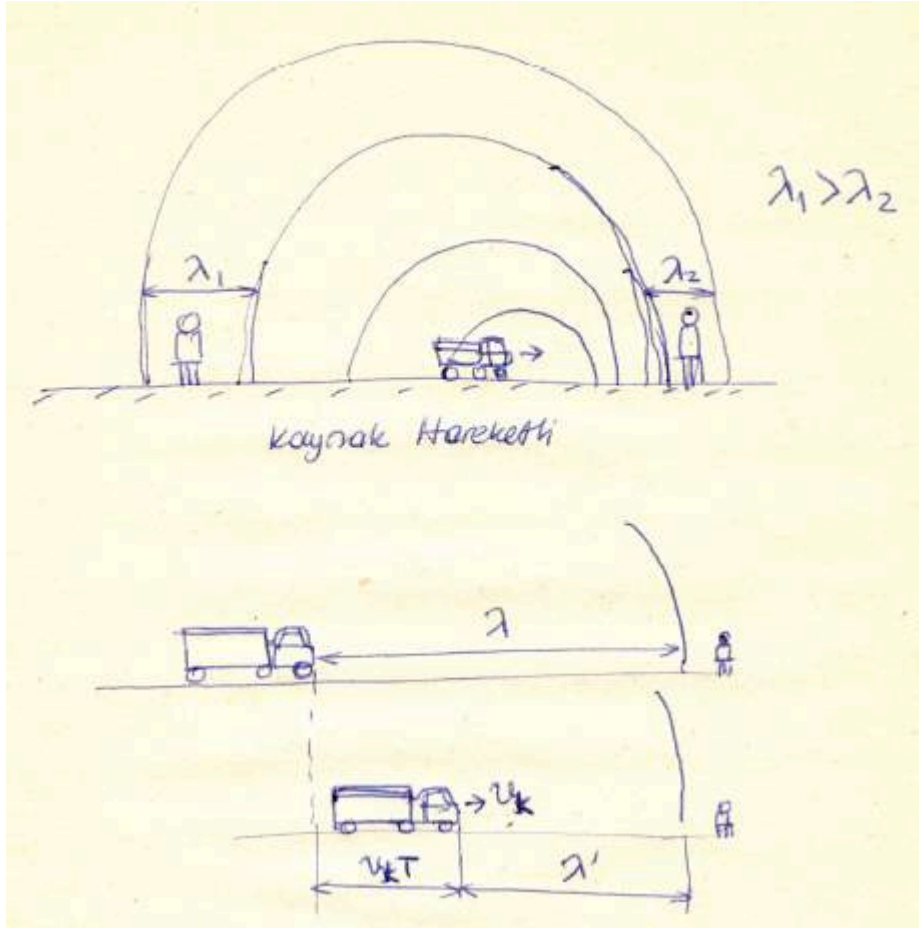
Louisiana Tech University, Ruston, Louisiana, U.S.A.

DOPPLER ETKİSİ

Hareketli, ses kaynağı:

Duran bir dinleyiciye yaklaşan ve uzaklaşan ses kaynakları farklı sesler üreteceklerdir. Mesela yaklaşan bir yangın arabası "iii" diye ses verirken geçtiğinde "yov" a benzer bir ses verir. Şayet dinleyici sabit bir ses kaynağına hızla yaklaşır ve geçerse de aynı etki hissedilir. Fakat bu hissedilmesi daha zor olan bir etkidir. Bu durum ilk defa 1842 yılında Avusturyalı fizikçi Christian Doppler (1803-1853) tarafından belirlendi ve onun adıyla anılır. Doppler etkisi alıcı ve kaynağın sesin yayıldığı ortama göre izafi bir hıza sahip olmalarından dolayı algılanan sesini frekansında meydana gelen değişim sonucudur.





Şayet siren bir condensation $t=0$ anında üretmişse $t=t$ anında üretecek demektir. Burada T periyottur. İki condensation arasındaki mesafe λ olacaktır. Dolayısıyla:

$$\Lambda = \lambda - v_k T$$

v_s hareket halindeki ses kaynağının hızıdır.

$$c = \lambda f' \rightarrow c^* = \lambda' f' \rightarrow f' = \frac{c}{\lambda'}$$

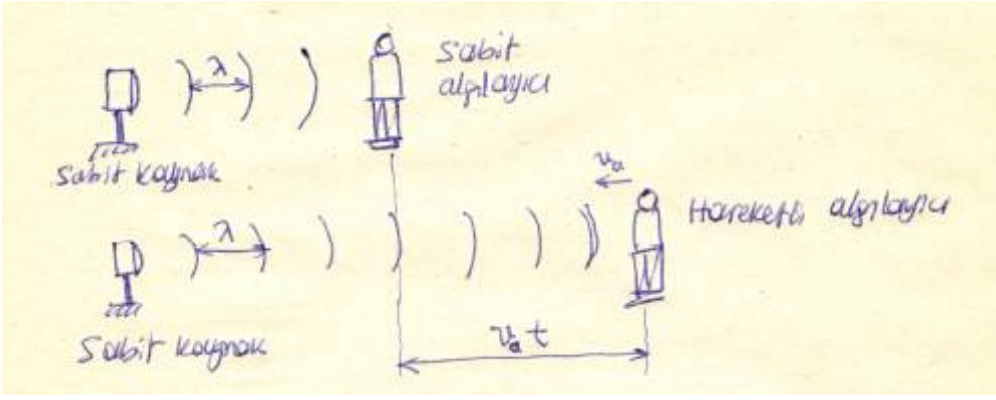
$$f' = \frac{c}{\lambda - v_k T} \rightarrow f' = \frac{c}{\lambda(1 - \frac{v_k T}{\lambda})} = \frac{c}{\lambda} \left(\frac{1}{1 - \frac{v_k}{\lambda T}} \right)$$

$f' = f \left(\frac{1}{1 - \frac{v_k}{c}} \right)$ Ses kaynağı sabit alıcıya doğru yaklaşıyorsa.

$f' = f \left(\frac{1}{1 + \frac{v_k}{c}} \right)$ Ses kaynağı sabit alıcıdan uzaklaşıyorsa.

HAREKETLİ ALGILAYICI

Şayet algılayıcı kaynağa doğru hareket ediyorsa duyması gereken ses dalgası sayısından daha fazlasını duyacaktır.



Algılayıcı tarafından alınan yol = $v_a t$

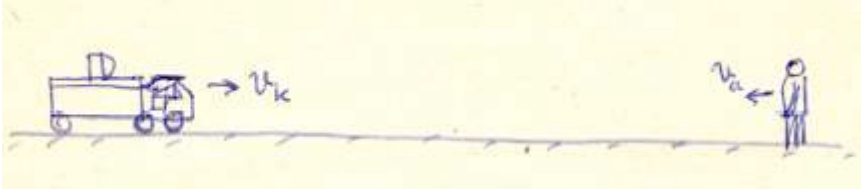
Fazladan algıladığı dalga sayısı = $\frac{v_a t}{\lambda}$

Birim zamanda fazladan algıladığı dalga sayısı = $\frac{v_a t}{\lambda} = \frac{v_a}{\lambda}$

Dolayısıyla $f' = f + \frac{v_a}{\lambda} = f \left(1 + \frac{v_a}{\lambda f} \right) = f \left(1 + \frac{v_a}{c} \right)$ (Algılayıcı kaynağa doğru yaklaşıyorsa.)

$f' = f \left(1 - \frac{v_a}{c} \right)$ (Algılayıcı kaynaktan uzaklaşıyorsa.)

DOPLER ETKİSİN EN GENEL DURUMU (Hem Algılayıcı Hemde Kaynak Hareketli)



Bu durumda önce elde ettiğimiz denklikler kullanılabilir.

$$f_k' = f \left(\frac{1}{1 - \frac{v_k}{c}} \right) \text{ ve } f_a' = f \left(1 + \frac{v_a}{c} \right)$$

Bu durum için $f' = f_k' \frac{v_a}{\lambda}$

$$f' = f \left(\frac{1}{1 - \frac{v_k}{c}} \right) + \frac{v_a}{\lambda} = f \left[\left(\frac{1}{1 - \frac{v_k}{c}} \right) + \frac{v_a}{\lambda f} \right]$$

$$f' = f \left[\frac{1}{1 + \frac{v_k}{c}} + \frac{v_a}{c} \right] = f \left[\frac{1 + \frac{v_a}{c} \left(1 + \frac{v_k}{c} \right)}{1 + \frac{v_k}{c}} \right]$$

$$f' = f \left[\frac{1 + \frac{v_a}{c} + \frac{v_a v_k}{c}}{1 - \frac{v_k}{c}} \right]$$

Fakat genelde v_a ve v_k ses hızına göre çok düşük olduğundan

$f' = f \left[\frac{1 + \frac{v_a}{c}}{1 - \frac{v_k}{c}} \right]$ veya $f' = f \left[\frac{1 - \frac{v_a}{c}}{1 + \frac{v_k}{c}} \right]$ formüllerdeki - ve + işaretleri yaklaşma uzaklaşma durumuna göre ayarlanır.

Aynı formül şu şekilde de bulunabilir:

$$f'_k = f \left(\frac{1}{1 - \frac{v_k}{c}} \right) \text{ ve } f'_a = f \left(1 + \frac{v_a}{c} \right)$$

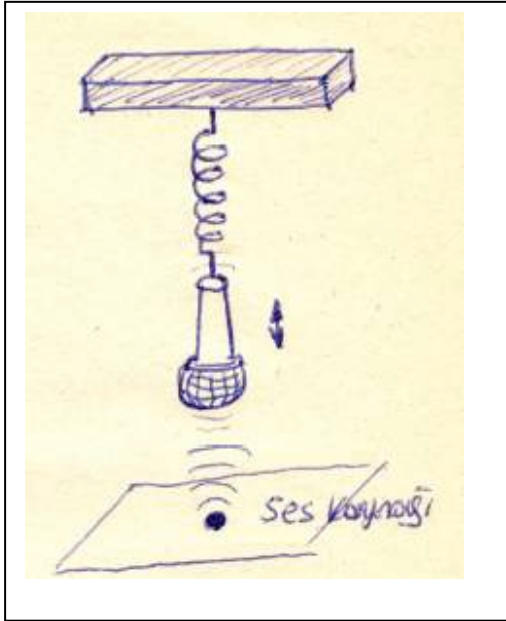
$$f' = f'_a \left(\frac{1}{1 - \frac{v_k}{c}} \right) \text{ ve } f' = f'_k \left(1 + \frac{v_a}{c} \right)$$

$$\rightarrow f' = \left(1 + \frac{v_a}{c} \right) \left(\frac{1}{1 - \frac{v_k}{c}} \right) f$$

$$f' = f \left[\frac{1 + \frac{v_a}{c}}{1 - \frac{v_k}{c}} \right] \quad \text{"- " ve "+" işaretleri dikate alınırsa } f' = f \left[\frac{1 - \frac{v_a}{c}}{1 + \frac{v_k}{c}} \right]$$

ÖRNEK SORULAR

1.



Şekilde görüldüğü gibi bir mikrofon tavana yayın ucuna asılmıştır. Mikrofonun direkt altında 440Hz'lik sabit ses kaynağı vardır. Mikrofon sesi kaydederken yayın ucunda periyodu 2 saniye olan basit harmonik salınımla titreşmektedir. Mikrofondaki ölçülen maksimum ve minimum frekans arasında 2,1Hz'lik bir fark tespit edilmiştir. Sesin odadaki yansımalarını ihmal ederek mikrofonun titreşme genliğini bulunuz.

Cevap:

Mikrofon ses kaynağına yaklaşırken:

$$f'_y = f \left(1 + \frac{v_a}{c} \right) = \left(1 + \frac{wx \sin wt}{c} \right) f \quad \text{Maximum olduğu nokta için } f'_y = \left(1 + \frac{wx}{c} \right) f$$

Mikrofon ses kaynağından uzaklaşırken:

$$f'_u = f \left(1 - \frac{v_a}{c} \right) = \left(1 - \frac{wx \sin wt}{c} \right) f \rightarrow \text{Minimum olduğu nokta için olduğu nokta } f'_u = \left(1 - \frac{wx}{c} \right) f$$

Aradaki fark

$$f'_y - f'_u = \left(1 + \frac{wx}{c} \right) f - \left(1 - \frac{wx}{c} \right) f = f \left(1 + \frac{wx}{c} - 1 + \frac{wx}{c} \right) = f 2 \frac{wx}{c}$$

$$\lambda = \frac{\Delta f' c}{2f w}$$

$$w = \frac{2\pi}{T} \rightarrow w = \frac{2\pi}{2} \rightarrow w = \pi \text{ rad/s}$$

$$\lambda = \frac{2,1 \cdot 343}{2440\pi} = 0,26 \text{ m}$$

2. Hızlı tren 44,7m/s hızla hareket ederken makinist ikaz kornasına basıyor. Korna 415 Hz'lik bir ses üretiyor. Ses hızını 343m/s olarak kenarda dikilen bir insanın işiteceği sesin frekansını ve dalga boyunu:

- Tren yaklaşırken.
- Tren uzaklaşırken bulunuz.

Çözüm:

$$a. \quad f_k' = f \left(\frac{1}{1 - \frac{v_k}{c}} \right) = 415 \left(\frac{1}{1 - \frac{44,7}{343}} \right) = 477 \text{ Hz}$$

$$\lambda' = \frac{c}{f'} = \frac{343}{477} = 0,719 \text{ m}$$

$$b. \quad f_k' = f \left(\frac{1}{1 + \frac{v_k}{c}} \right) = 415 \left(\frac{1}{1 + \frac{44,7}{343}} \right) = 367 \text{ Hz}$$

$$\lambda' = \frac{c}{f'} = \frac{343}{367} = 0,935 \text{ m}$$

3. Bir ses dalgasının frekansı 440 Hz dir.
- Bu ses dalgasının havadaki dalga boyu nedir?
 - Bu ses dalasınının sudaki dalga boyu nedir?

Çözüm:

$$a. \quad c = \lambda f \rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{343}{440} = 0,78 \text{ m}$$

$$b. \quad c = \lambda f \rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{1450}{440} = 3,3 \text{ m}$$

4. Konik bir hoperlerin çapı 15cm'dir. Hangi frekansta sesin dalga boyu, hoperlerin çapına eşit olur? (c=343)

Çözüm:

$$c = \lambda f \rightarrow f = \frac{343}{0,15} = 2286 \text{ Hz}$$

YÖNELME VE YÖNELME KATSİYISI (DIRECTIVITY AND DIRECTIVITY FACTOR)

Ses, noktasal bir ses kaynağından kürevi dalgalar şeklinde intişar eder. Günlük hayatta bunu görmek zordur. Ses farklı yönlerde farklı şekilde yayılır. Mesela hoporlerin yaydığı sesin oluşturduğu basınç hoporlerin yönüne dik yönde diğer yönlerden daha yüksek olacaktır. Bir noktadaki "yönelme katsayısı" [Q], o noktadaki ses şiddetini sesin düzgün yayılması durumunda aynı noktada oluşturacağı ses şiddetine oranıdır.

$$Q = \frac{I}{I_t}$$

I bir noktadaki ses yoğunluğu

I_t aynı noktadaki sesin küresel dalgalar halindeki yayılma halinde oluşacağı yoğunluk.

$$Q = \frac{\frac{(Prms)^2}{I_0 c}}{\frac{(Prms)^2_t}{I_0 c}} \rightarrow Q = \frac{P^2}{P_t^2}$$

Her yönde değişik yönelme katsayısına sahip bir kaynak için

$$Q = 10^{(S_P - \bar{S}_P)/10}$$

S_P : Bir noktada ölçülen ses basınç seviyesi.

\bar{S}_P : Aynı uzaklıktaki ses basınç seviyesi ortalaması.

Soru: Bir ses kaynağının 4m uzağındaki ortalama ses basıncı düzeyini hesaplamak için bir küre üzerindeki noktaları simgeleyen 8 uygun noktadan alınan ölçümler şöyledir:

$$S_{P1} = 88dB, S_{P2} = 90dB, S_{P3} = 87dB, S_{P4} = 92dB, S_{P5} = 99dB, S_{P6} = 96dB$$

$$S_{P7} = 92dB, S_{P8} = 86dB$$

Bu ses kaynağının yönelmesinin en fazla olduğu yönü ve bu yöndeki yönelme katsayısını bulunuz.

$$\bar{S}_P = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{S_{bi}/10} \right]$$

$$\bar{S}_P = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{8} (10^{8,8} + 10^9 + 10^{8,7} + 10^{9,2} + 10^{9,9} + 10^{9,6} + 10^{9,2} + 10^{8,6}) \right]$$

$$\bar{S}_P = 93,4dB$$

Yönelmenin en fazla olduğu yön, en büyük ses basıncı seviyesinin ölçüldüğü S_{P5} yönüdür. Dolayısı ile:

$$Q = 10^{(S_P - \bar{S}_P)/10} = 10^{(99 - 93,4)/10} \rightarrow Q = 3,6$$

Soru: Bir kamera otomatik olarak odaklama yapmaktadır. Odaklama mekanizması ultrasonik ses dalgaları ile çalışmaktadır. Kamera yayınladığı ultrasonik dalgayı sıcaklığın 23 °C olduğu açık bir günde 20×10^{-3} s de algılamaktadır. Havanın ideal bir gaz olduğu ve $\gamma = 1.40$ kabul edilirse havanın ortalama moleküler kütlelerinin 28,9u olduğu varsayılarak, fotoğrafı çekilen nesnenin fotoğraf makinadan uzaklığını hesaplayınız.

($N_A=6,022 \times 10^{23}$, $k=1,38 \times 10^{-23} \text{J/K}$)

Avo.No. Boltzman



$$c^2 = \gamma r T \left[r = \frac{k}{m} \right]$$

$$c^2 = \gamma \frac{k}{m} T$$

Havanın bir molünün kütlesi = $\left(\frac{28,9u}{12u} \right) 12gr = 28,9gr/mol$

$$m = \left(\frac{28,9 \times 10^{-3}}{N_A} \right) \quad N_A \text{ Avagadro sayısı}$$

$$m = \left(\frac{28,9 \times 10^{-3}}{6,022 \times 10^{23}} \right) \rightarrow m = 4,80 \times 10^{-26} \text{kg}$$

Boltzman sabiti (k) = $1,38 \times 10^{-23} \text{J/K}$

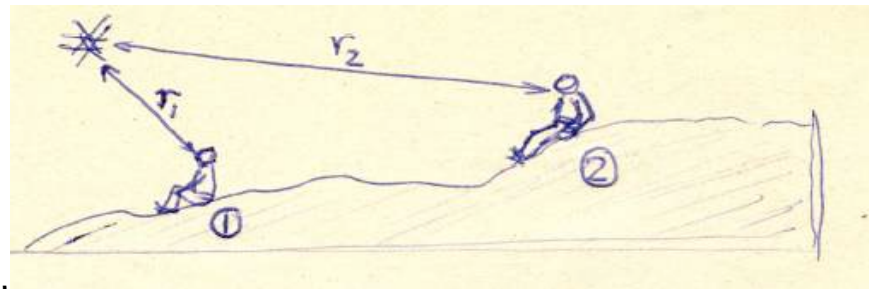
$$c^2 = \frac{1,40 \times 1,38 \times 10^{-23} \times (273 + 23)}{4,80 \times 10^{-26}} \quad c = 345 \text{m/s}$$

$$S_t = ct = 345 \times 20 \times 10^{-3} \rightarrow S_t = 6,90 \text{m}$$

Fakat ses gidip geri geldiği için

$$S = \frac{S_t}{2} = \frac{6,90}{2} \rightarrow S = 3,45 \text{m}$$

Soru:



Firework gösterileri sırasında bir roket havada patlamış ve ses düzgün bir şekilde etrafa yayılmıştır. Ses şekildeki 2 nolu 640 metre insana ulaştığında $I_2 = 0,10W/m^2$ yoğunluğa (intensity) sahip. 160 metre uzaklıktaki insan tarafından işitilen sesin yoğunluğu nedir.

$$I = \frac{W}{A} = \frac{W}{4\pi r^2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{W}{4\pi r_1^2}}{\frac{W}{4\pi r_2^2}} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \Rightarrow I_1 = I_2 \frac{r_1^2}{r_2^2} \quad I_1 = 0,10 \frac{640^2}{160^2} \Rightarrow I_1 = 1,6W/m^2$$

Soru: İki tane müzik seti çalışmaktadır. Birinci sistemin akustik yoğunluğu (intensity) seviyesi $S_{y1} = 90dB$, ikincisi ise $S_{y2} = 93dB$ dir. İkinci sistemin akustik yoğunluğunun birinciye oranını bulunuz.

$$\left(\frac{I_2}{I_1} =\right)$$

$$S_{y2} - S_{y1} = 10 \log_{10} \frac{I_2}{I_{ref}} - 10 \log_{10} \frac{I_1}{I_{ref}} \quad ;(\log a - \log b = \log \frac{a}{b})$$

$$S_{y2} - S_{y1} = 10 \log_{10} \frac{\frac{I_2}{I_{ref}}}{\frac{I_1}{I_{ref}}} = 10 \log_{10} \frac{I_2}{I_1}$$

$$\frac{93-90}{10} = \log_{10} \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = 10^{0,3} \quad \frac{I_2}{I_1} = 2$$

SORU: "l" uzunluğunda bir metal boru vardır. Bu metal içinde sesin "V" hızında ilerlediği bilinmektedir. Bu borunun bir ucunda sert bir şekilde vurulmuştur. Borunun diğer ucunda dinleyen bir kimse Δt zaman farkıyla iki ses duymaktadır. Bir borudan iletilen diğeri havadan iletilen sesin:

- Şayet sesin havada yayılma hızı v ise Δt zaman farkını hesaplayınız.
- Bu zaman farkı $\Delta t = 0,1s$ ise borunun uzunluğu ne kadardır?($V=5130m/s$, $v=343m/s$)

CEVAP:

$$a) \quad l = Vt_1 \quad \text{ve} \quad l = vt_2$$

$$\rightarrow t_1 = \frac{l}{V} \quad t_2 = \frac{l}{v}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{l}{v} - \frac{l}{V} = \frac{l(V - v)}{Vv}$$

$$b) \quad l = \frac{\Delta t V v}{V - v} = \frac{0,1 \times 5130 \times 343}{5130 - 343}$$

$$l = 36,75m$$

SORU: İlerleyen bir ses dalgasının basıncı $p = 1,5\sin\pi(x - 330t)$ olarak verilmiştir. Bu denklemde x metre, t metre p pascaldır. Şunları bulunuz.

- Basınç genliği.
- Dalga boyu
- Dalga İlerleme hızı
- Bu dalganın frekansını

$$y = a\sin(\omega t - \phi)$$

$$\lambda \rightarrow 2\pi \quad \omega t = 2\pi$$

$$\phi \rightarrow 2\pi \frac{x}{\lambda} \quad \omega = \frac{2\pi}{t}$$

$$y = a\sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = a\sin \frac{2\pi}{\lambda} (ct - x)$$

$$p = -1,5\sin\pi(330t - x)$$

- $a = -1,5Pa$ Genlik
- $\frac{2\pi}{x} = \pi \rightarrow \lambda = 2m$ Dalga Boyu
- $c = 330m/s$ Dalga Hızı
- $c = f\lambda \rightarrow f = \frac{330}{2} \rightarrow f 165Hz$

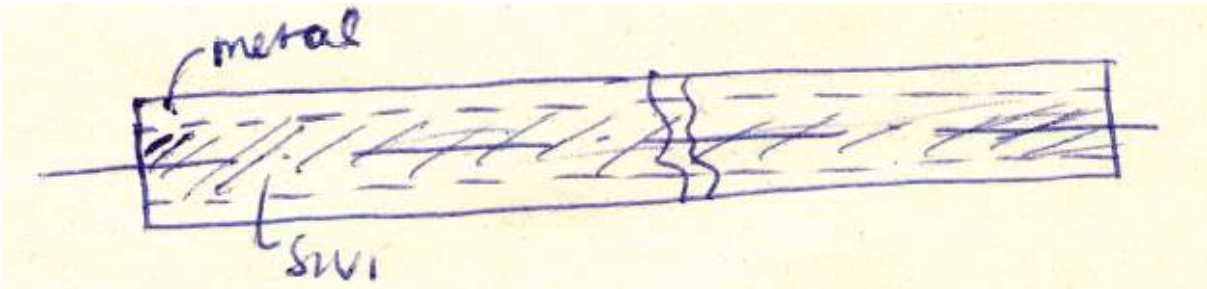
SORU: Bir borunun içi sıvı ile doldurulmuştur. Borunun bir ucunda sert bir şekilde vurulduğunda diğer ucunda belirli aralıklarla bu ses üç defa duyulmaktadır. Bunlar sesin havadan, sıvıdan ile ikincisi arasında geçen zaman ikinci ile üçüncü arasındaki zaman farkının 1/3 katı olup 0,03s olduğu tesbit edildiğine ve sıvının özgül ağırlığının metalinkinin 8'de biri olduğu bilindiğine göre borunun uzunluğunu bulunuz. Diğer veriler şunlardır:

Sıvının adiyabatik bulk modülü $B_A = 2 \times 10^9 Pa$

Metalin elastisiet modülü $E = 2 \times 10^{11} Pa$

Sesin havadaki hız $c_h = 343m/s$

CEVAP:



$$l = c_h t_1 ; l = c_s t_2 ; l = c_m t_3$$

$$t_1 = \frac{l}{c_h}$$

$$t_2 = \frac{l}{c_s}$$

$$t_3 = \frac{l}{c_m}$$

$$\Delta t_1 = t_1 - t_2 = \frac{l}{c_h} - \frac{l}{c_s} \rightarrow \frac{\Delta t_1}{l} = \frac{1}{c_h} - \frac{1}{c_s}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_3 = \frac{l}{c_s} - \frac{l}{c_m} \rightarrow \frac{\Delta t_2}{l} = \frac{1}{c_s} - \frac{1}{c_m}$$

Biliyoruzki ses ilk önce metalden, sonra sıvıdan en sonda havadan geçecek. O halde:

$$\Delta t_1 = 3\Delta t_2$$

$$\Delta t_1 = 3\Delta t_2 = l \left[\frac{1}{c_h} - \frac{1}{c_s} \right]$$

$$3l \left[\frac{1}{c_s} - \frac{1}{c_m} \right] = l \left[\frac{1}{c_h} - \frac{1}{c_s} \right]$$

$$\frac{3}{c_s} + \frac{1}{c_s} = \frac{1}{c_h} + \frac{3}{c_m} \rightarrow \frac{4}{c_s} = \frac{1}{c_h} + \frac{3}{c_m}$$

$$c_s^2 = \frac{B_A}{l_s} \rightarrow c_s^2 = \frac{B_A}{\frac{l_m}{8}} = \frac{8B_A}{l_m}$$

$$c_m^2 = \frac{E}{l_m} \rightarrow l_m = \frac{E}{c_m^2}$$

$$c_s^2 = \frac{8B_A c_m^2}{E}$$

$$c_m = \sqrt{\frac{E}{8B_A}} c_s$$

$$\frac{4}{c_s} = \frac{1}{c_h} + \frac{3}{c_m} = \frac{1}{c_h} + \frac{3}{\sqrt{\frac{E}{8B_A}} c_s}$$

$$\rightarrow \frac{4}{c_s} - \frac{6\sqrt{2}\sqrt{B_A}}{\sqrt{E} c_s} = \frac{1}{c_h}$$

$$\rightarrow c_s = c_h \left[4 - 6\sqrt{2} \frac{\sqrt{BA}}{\sqrt{E}} \right]$$

$$\rightarrow c_s = 343 \left[4 - 6\sqrt{2} \frac{\sqrt{2 \times 10^9}}{\sqrt{2 \times 10^{11}}} \right] \rightarrow c_s = 1081 \text{ m/s}$$

$$\frac{\Delta t_1}{l} = \frac{1}{c_h} - \frac{1}{c_s} \rightarrow l = \frac{\Delta t_1}{\frac{1}{c_h} - \frac{1}{c_s}}$$

$$l = \frac{0.03 \times 3}{\frac{1}{343} - \frac{1}{1081}} \rightarrow l = 45 \text{ m}$$

SORU: İki dalga uzayda bir noktada aşağıdaki basınç değişimlerine sebep olmaktadır.

$$P_1 = A \sin 2\pi ft \text{ ve } P_2 = A \sin 2\pi (ft - \phi)$$

O noktadaki toplam basınç değişiminin genliği

- $\phi = 0$ için
- $\phi = \frac{1}{4}$ için
- $\phi = \frac{1}{6}$ için bulunuz.

$$\text{CEVAP: } P_1 = A \sin 2\pi ft$$

$$P_2 = A \sin 2\pi (ft - \phi)$$

$$P = A \sin 2\pi ft + A \sin 2\pi (ft - \phi)$$

$$P = A(\sin 2\pi ft + \sin 2\pi ft \cos 2\pi \phi - \cos 2\pi ft \sin 2\pi \phi)$$

- $\phi = 0$

$$p = A(\sin 2\pi ft + \sin 2\pi ft) = 2A \sin 2\pi ft = 2A$$

- $\phi = \frac{1}{4}$ için

$$p = A(\sin 2\pi ft + \sin 2\pi ft \cos \frac{\pi}{2} - \cos 2\pi ft \sin \frac{\pi}{2})$$

$$p = A(\sin 2\pi ft - \cos 2\pi ft)$$

$$-A = r \cos \varepsilon$$

$$A = r \sin \varepsilon$$

$$p = r \cos \varepsilon \cos 2\pi ft + r \sin \varepsilon \sin 2\pi ft$$

$$p = r \cos \varepsilon \cos(2\pi ft - \varepsilon)$$

$$\text{Burada } r = \sqrt{(-A)^2 + A^2} \quad r = \sqrt{2}A$$

$$\varepsilon = \arctan \frac{A}{-A} \rightarrow \varepsilon = \tan^{-1}(-1) \rightarrow \varepsilon = -\frac{\pi}{4}$$

$$p = \sqrt{2}A \cos(2\pi ft - \frac{\pi}{4})$$

$$\text{Dolayısıyla genlik } P = \sqrt{2}A$$

c) $\phi = \frac{1}{6}$ için bulunuz.

$$p = A(\sin 2\pi ft + \sin 2\pi ft \cos \frac{\pi}{3} - \cos 2\pi ft \sin \frac{\pi}{3})$$

$$\cos \frac{\pi}{3} = \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{3} = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$p = A(\sin 2\pi ft + \frac{1}{2} \sin 2\pi ft - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos 2\pi ft)$$

$$r \cos \varepsilon = -\frac{\sqrt{3}}{2} A \text{ ve } r \sin \varepsilon = \frac{3}{2} A$$

$$r = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}}{2} A\right)^2 + \left(\frac{3}{2} A\right)^2} = \sqrt{3} A$$

$$\varepsilon = \arctan \frac{\frac{3}{2} A}{-\frac{\sqrt{3}}{2} A} = \tan^{-1}(-\sqrt{3}) \rightarrow \varepsilon = -\frac{\pi}{3}$$

$$\text{Dolayısıyla } p = r A \cos(2\pi ft - \varepsilon) = \sqrt{3} A \cos\left(2\pi ft + \frac{\pi}{3}\right) = \sqrt{3} A$$

SORU: İki ses kaynağı aralarında 10 metre mesafe vardır ve bu kaynaklar aynı frekansta ve aynı genlikte ses yaymaktadır. Fakat aralarında 180° faz farkı vardır. Sesin ortamdaki yayılma hızı 343m/s ve kaynakların frekansını 30Hz olarak, iki kaynak arasında hangi noktada ses yoğunluğu maksimum olacaktır.



CEVAP:

$$I = \frac{P_e^2}{I_0 c}$$

$$P_A = P \cos[k(x - ct)]$$

$$P_B = P \cos\left[k(x - ct) + \frac{\pi}{k}\right]$$

$$P(x, t) = P \cos[k(x - ct)] + P \cos\left[k(x - ct) + \frac{\pi}{k}\right]$$

Dikkat edilirse bu dalga denkleminin özel bir çözümü.

$$P(x, t) = P \cos kx \cos kct + P \sin kx \sin kct + P \cos kx \cos kct - P \sin kx \sin kct$$

$$P(x, t) = 2P \cos kx \cos kct$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \rightarrow kc = \frac{2\pi}{\lambda} c = \frac{2\pi}{\lambda} \lambda f = 2\pi f$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\frac{c}{f}} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{\omega}{c}$$

$$P(x, t) = P \cos\left(\frac{2\pi f}{c} x\right) \cos 2\pi f t$$

$$P_e^2 = \frac{1}{T} 4P^2 \cos^2\left(\frac{2\pi f}{c} x\right) \left[\frac{T}{2}\right]$$

$$P_e^2 = 2P^2 \cos^2\left(\frac{2\pi f}{c} x\right)$$

$$I = \frac{P_e^2}{l_1 c} \rightarrow I = \frac{2P^2 \cos^2\left(\frac{2\pi f}{c} x\right)}{l c}$$

$$I = \frac{2P^2}{l c} \cos^2\left(\frac{2\pi f}{c} x\right) \text{ Bu fonksiyonun maximum olabilmesi için;}$$

$$\cos^2\left(\frac{2\pi f}{c} x\right) = 1$$

$$\rightarrow \frac{2\pi f}{c} x = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$$

$$\frac{2\pi f}{c} x = 0 \rightarrow x=0$$

$$\frac{2\pi f}{c} x = \pi \quad x = \frac{c}{2f} = \frac{343}{2 \times 30} \rightarrow x = 5,71m$$

$$\frac{2\pi f}{c} x = 2\pi \rightarrow x = \frac{c}{f} = \frac{343}{30} \rightarrow x = 11,43m \text{ Bu bizim ilgi alanımız dışında.}$$

O halde $x = 5,71m$

SORU: Bir ultrasonic metre açık havada ölçüm yapacak şekilde kalibre edilmiştir. Deniz altında ölçüm yapmakta kullanılan bu ultrasonic metre çalışır mı? Çalıştırılırsa hata miktarı ne olacaktır.

$$c_h = 343m/s; B_{ad} = 2,31 \times 10^9 \text{ Pascal } L_s = 1025kg/m^3$$

CEVAP: Ses dalgası havadaki ve sudaki hızları farklı olduğundan çalışmaz. Tekrar kalibre etmek gerekir.

$$c_{su}^2 = \frac{\gamma B_t}{l}$$

Burada B_t izotermal bulk modülüdür.

$$B_{ad} = \gamma B_t$$

$$c_{su}^2 = \frac{B_{ad}}{l} = \frac{2,31 \times 10^9}{1025} \rightarrow c_{su} = 1500m/s$$

Bu durumda hata miktarı

$$\varepsilon = \frac{1500}{343} \rightarrow \varepsilon = 4,4$$

Yani alet mesafeyi okuduğunda 4,4 kat daha yakın olarak gösterecektir.

SORU: Sıcaklığın 20 °C olduğu bir günde yaklaşan bir tren sesi raylardan dinlenirse havadaki sestene ne kadar çabuk duyulur?

$$E = 2,0 \times 10^{11} N/m^2; l = 7860kg/m^3; c_h = 343m/s$$

CEVAP:

$$C^2 = \frac{E}{l} = \frac{2,0 \times 10^{11}}{7860} \rightarrow C = 5 \times 10^3 m/s$$

$$\frac{5 \times 10^3}{343} = 15 \text{ katı bir hızla gelecektir.}$$

ÖRNEK PROBLEMLER

Misal: Sinisoidal bir yüzey dalgası, incedent bir dalga olarak suda ilerlemektedir ve su ile buzun kesiştiği noktaya ulaşıyor. Şayet suyun ve buzun sonsuza doğru uzandığı kabul edilirse aşağıdaki oranları bulunuz.

$$\text{a) } \frac{\xi_r}{\xi_i} \quad \text{b) } \frac{\xi_t}{\xi_i} \quad \text{c) } \frac{u_r}{u_i} \quad \text{d) } \frac{u_t}{u_i} \quad \text{e) } \frac{p_r}{p_i} \quad \text{f) } \frac{p_t}{p_i} \quad \text{g) } \frac{s_r}{s_i} \quad \text{h) } \frac{s_t}{s_i} \quad \text{i) } \frac{I_r}{I_i} \quad \text{j) } \frac{I_t}{I_i}$$

Bu denklemlerde ζ, u, p, s ve I sırasıyla partikül yerleştirmesi, partikül hızı, akustik basınç, yoğunlaşma ve akustik yoğunluk genlikleridir. Buradaki indisler ise r, reflected (yansıyan); t transmitted (iletilen) ve i (incident) manasındadır. Aralarındaki faz açısı durumunu da belirtiniz.

Standart şartlarda

$$(\rho c)_{su} = \rho_1 c_1 = (998)(1480) = 1480000 \text{ ray / s}$$

$$(\rho c)_{buz} = \rho_2 c_2 = (920)(3200) = 2940000 \text{ ray / s}$$

a) Birinci ortamdaki dalga için

$$\zeta_1 = x_i e^{i(\omega t - k_1 x)} + x_r e^{i(\omega t + k_1 x)}$$

İkinci ortamda iletilen dalga için

$$\zeta_1 = x_t e^{i(\omega t - k_2 x)} \text{ olacaktır.}$$

İki ortamdaki dalgaların frekanslarının aynı olduğu ve iki ortamdaki değişik yayılma hızlarından oluşan Doppler etkisinin önemsiz olduğu kabul edilecektir.

$$\text{Hatırlanacağı üzere; } p_1 = -B_1 \frac{\delta \zeta_1}{\delta x} \text{ ve } p_2 = -B_2 \frac{\delta \zeta_2}{\delta x} \text{ idi.}$$

Burada B Bulk Modülüdür.

$$p_1 = -B_1 \frac{\delta \zeta_1}{\delta x} = ik_1 B_1 e^{i\omega t} (x_i e^{-ik_1 x} + x_r e^{ik_1 x})$$

$$p_2 = -B_2 \frac{\delta \zeta_2}{\delta x} = ik_2 B_2 e^{i\omega t} (x_t e^{-ik_2 x})$$

Partikül hızları ise;

$$u_1 = \frac{\delta \zeta_1}{\delta t} = i\omega e^{i\omega t} (x_i e^{-ik_1 x} + x_r e^{ik_1 x})$$

$$u_2 = \frac{\delta \zeta_2}{\delta t} = i\omega e^{i\omega t} (x_i^{-ik_2 x})$$

$x = 0$ için;

$$p_1 = ik_1 B_1 e^{i\omega t} (x_i - x_r)$$

$$p_2 = ik_2 B_2 e^{i\omega t} x_i$$

$$u_1 = i\omega e^{i\omega t} (x_i + x_r)$$

$$u_2 = i\omega e^{i\omega t} x_i$$

Sınırdaki basınçlar ve hızlar eşit olduğundan;

$$B_1 k_1 (x_i - x_r) = B_2 k_2 x_i$$

$$x_i - x_r = x_i$$

Dolayısıyla x_i yerine konulursa,

$$B_1 k_1 (x_i - x_r) = B_2 k_2 (x_i + x_r)$$

$$B_1 k_1 x_i - B_1 k_1 x_r = B_2 k_2 x_i + B_2 k_2 x_r$$

$$(B_1 k_1 - B_2 k_2) x_i = (B_1 k_1 + B_2 k_2) x_r$$

$$\frac{x_r}{x_i} = \frac{B_1 k_1 - B_2 k_2}{B_1 k_1 + B_2 k_2}$$

Bilindiği üzere $B = \rho c^2$ 'dir.

$$Bk = B \frac{\omega}{c} \rightarrow Bk = \rho c \omega$$

$$\frac{x_r}{x_i} = \frac{\rho_1 c_1 \omega - \rho_2 c_2 \omega}{\rho_1 c_1 \omega + \rho_2 c_2 \omega} \rightarrow \frac{x_r}{x_i} = \frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}$$

$$\frac{x_r}{x_i} = \frac{(1.48 - 2.94)10^6}{(1.48 + 2.94)10^6} \rightarrow \frac{x_r}{x_i} = -0.33$$

ζ_r ile ζ_i arasındaki faz farkı 180° 'dir.

$$b) \frac{x_t}{x_i} = \frac{2\rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} = \frac{2(1.48)10^6}{(1.48 + 2.94)10^6} = 0.67$$

ζ_i ile ζ_i arasındaki faz farkı 0° 'dir.

$$c) u_i = \frac{\delta \zeta_i}{\delta t} = i\omega \zeta_i$$

$$u_t = \frac{\delta \zeta_t}{\delta t} = i\omega \zeta_t$$

$$u_r = \frac{\delta \zeta_r}{\delta t} = i\omega \zeta_r$$

$$\frac{u_r}{u_i} = \frac{i\omega \zeta_r}{i\omega \zeta_i} = \frac{\zeta_r}{\zeta_i} = \frac{x_r}{x_i} = \frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} = -0.33$$

u_r, u_i ile 180 derecelik bir faz farkına sahiptir.

$$d) \frac{u_t}{u_i} = \frac{x_t}{x_i} = \frac{2\rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} = 0.67$$

u_t, u_i ile aynı fazda

$$e) \frac{p_r}{p_i} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} = \frac{(2.94 - 1.48)10^6}{(2.94 + 1.48)10^6} = 0.33$$

p_r, p_i ile aynı fazda

$$f) \frac{p_t}{p_i} = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} = \frac{2(2.94)10^6}{(2.94 + 1.48)10^6} = 1.33$$

p_t, p_i ile aynı fazda

$$g) \text{yoğunlaşma } s_i = -\frac{\delta \zeta_i}{\delta x} = ik_i \zeta_i$$

$$s_t = -\frac{\delta \zeta_t}{\delta x} = ik_2 \zeta_t$$

$$s_r = -\frac{\delta \zeta_r}{\delta x} = ik_1 \zeta_r$$

$$\frac{s_r}{s_i} = -\frac{\zeta_r}{\zeta_i} = -\frac{x_r}{x_i} = -\frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} = 0.33$$

s_r, s_i ile aynı fazda

$$h) \frac{s_t}{s_i} = \frac{k_2 x_t}{k_1 x_i} = \frac{\frac{\omega}{c_2} x_t}{\frac{\omega}{c_1} x_i} = \frac{c_1 x_t}{c_2 x_i} = \frac{c_1}{c_2} \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} = \frac{2\rho_2 c_1^2}{c_2 (\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)}$$

$$\frac{s_t}{s_i} = \frac{2(1.48)(1480)10^6}{3200(1.48 + 2.94)10^6} = 0.3$$

s_t, s_i ile aynı fazda

$$i) \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{P_r}{P_i} \right)^2 = (0.33)^2 = 0.109$$

I_r, I_i ile aynı fazda

$$j) \frac{I_t}{I_i} = 1 - \frac{I_r}{I_i} = 1 - 0.109 = 0.891$$

I_t, I_i ile aynı fazda

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{\frac{P_t^2}{\rho_2 c_2}}{\frac{P_r^2}{\rho_1 c_1}} = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} \frac{P_t^2}{P_r^2} = \frac{(1.48)10^6}{(2.94)10^6} \left(\frac{P_t}{P_i} \right)^2 = \frac{1.48}{2.94} (1.33)^2$$

$$\frac{I_t}{I_i} = 0.8905$$

PROBLEM: Bir akustik panel elemanın özgül akustik impedansı $Z_n = 1000 - j1300i$ ray/s'dir. Ses gücü iletim ve yansımaya katsayılarını bulunuz. (Ses dalgalarının yüzey dalgaları ve panel elemanın yüzeyine dik olarak kabul ediniz.) (Havanın yoğunluğunu 1.21 kg/m^3 ve sesin havadaki yansımaya hızını 343 m/s olarak kabul ediniz.)

$$Z_h = \rho_1 c_1 \quad \rightarrow \quad Z_h = 1.21 \times 343 = 415 \text{ ray} / s$$

$$Z_h = r_n + ix_n$$

$$Z_n = 1000 - j1300$$

Yani $r_n = 1000$ ve $x_n = 1300$

Hatırlanacağı üzere (normal durumda);

$$\alpha_r = \frac{(r_n - \rho_1 c_1)^2 + x_n^2}{(r_n + \rho_1 c_1)^2 + x_n^2} = \frac{(1000 - 415)^2 + 1300^2}{(1000 + 415)^2 + 1300^2} = 0.55$$

Ses gücü iletim katsayısı;

$$\alpha_t = \frac{4\rho_1 c_1 r_n}{(r_n + \rho_1 c_1)^2 + x_n^2} = \frac{4 \times 415 \times 1000}{(1000 + 415)^2 + 1300^2} = 0.45$$

Ya da başka bir yoldan;

$$\alpha_t = 1 - \alpha_r = 1 - 0.55 = 0.45$$

PROBLEM: Bir merkezden yayılan küresel akustik basıncın tepe basıncı (peak pressure) 2 N/m² olarak kaynaktan 1m uzakta ölçülmüştür. (Atmosfer basıncında ve oda sıcaklığında) 10m uzaktaki ses yoğunluğu nedir?

[$\rho_{hacim}=1.21 \text{ kg/m}^3$ ve $c=343 \text{ m/s}$]

$$I = \frac{P^2}{2\rho c} = \frac{2^2}{2(1.21)343} \rightarrow I = 0.9048 \text{ W/m}^2$$

$$W = A \times I = (4\pi r^2) I = (4\pi 1^2) 0.9048$$

$$W = 0.062 \text{ W}$$

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{0.062}{4\pi (10)^2} \rightarrow I = 0.000048 \text{ W/m}^2$$

Esasında şu şekilde de bulunabilir;

$$I_1 = \frac{W}{4\pi r_1^2} \quad \text{ve} \quad I_2 = \frac{W}{4\pi r_2^2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \rightarrow I_2 = I_1 \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

$$I_2 = \frac{I_1}{100} = 0.000048 \text{ W/m}^2$$

PROBLEM: Basit bir küresel kaynak harmonik olarak ses dalgaları yaymaktadır. Gücün 500Hz'deki gücü 10 W'tır.

Şunları hesaplayınız (Merkezden 1 metre uzakta) ($\rho=1.21 \text{ kg/m}^3$, $c=343 \text{ m/s}$)

a) Akustik yoğunluk (I)

b) Akustik basınç (P)

c) Partikül hızı (u)

d) Partikül yer değiştirme (ζ)

e) Ses basıncı seviyesi (SBS) [$P_{ref}=20 \text{ MPa}$]

$$a) I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{10}{4(3.14)1^2} \rightarrow I = 0.8 \text{ N/m}^2$$

$$b) I = \frac{P^2}{2\rho c} \rightarrow P = \sqrt{2\rho c I} = \sqrt{2 \times 1.21 \times 343 \times 0.8} \rightarrow P = 25.8 \text{ N/m}^2$$

$$c) u = \frac{P}{\rho c \cos \theta} = \frac{P}{\rho c \frac{kr}{\sqrt{1+k^2 r^2}}} \rightarrow k = \frac{\omega}{c} \rightarrow kr = \frac{\omega}{c} r$$

$$kr = \frac{2\pi f}{c} r = \frac{2\pi 500}{343} 1 \rightarrow kr = 9.18$$

$$u = \frac{25.8}{1.21(343) \frac{9.18}{\sqrt{1+9.18^2}}} \rightarrow u = 0.062 \text{ m/s}$$

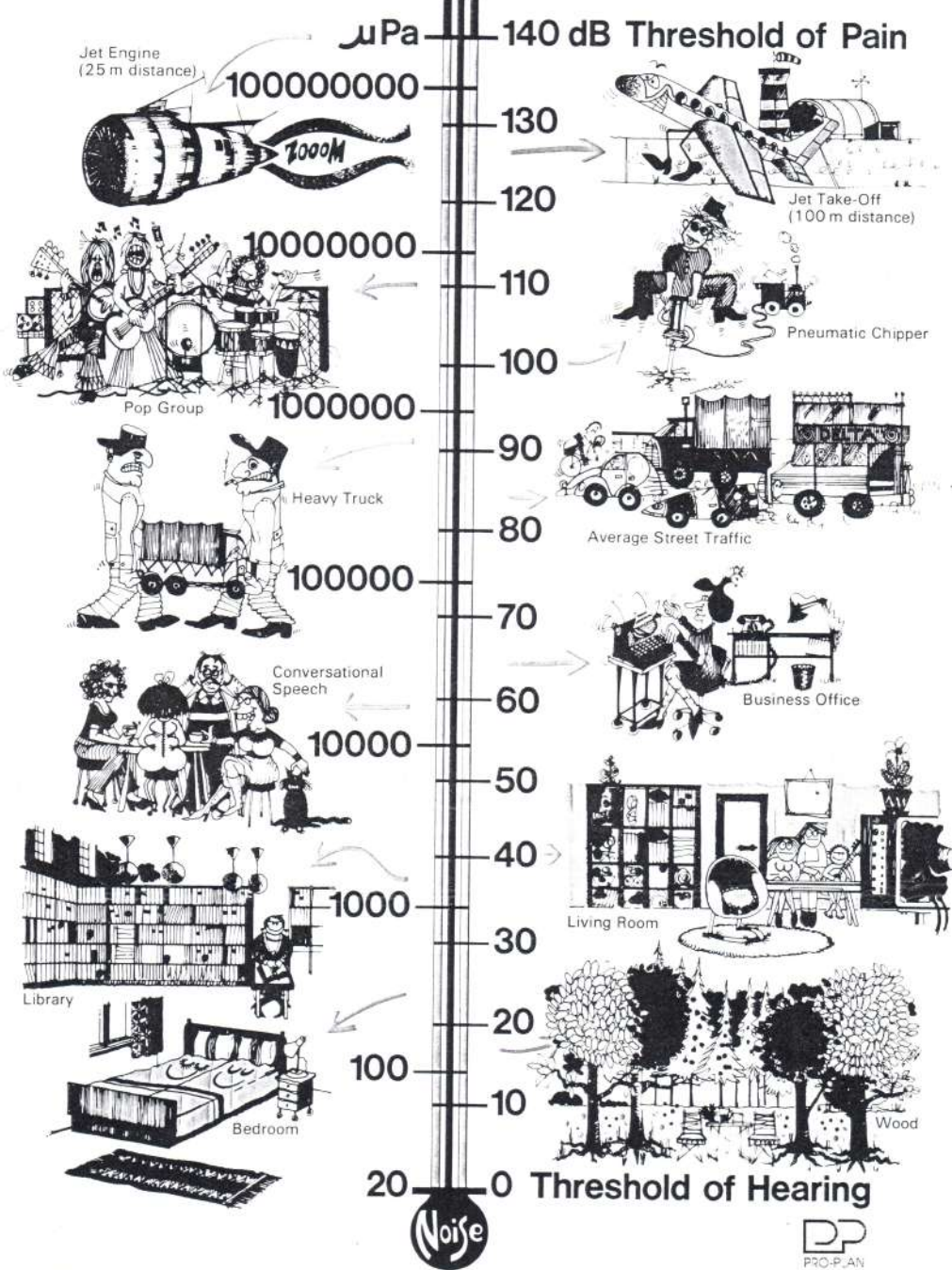
$$d) \zeta = \frac{u}{\omega} = \frac{u}{2\pi f} = \frac{0.062}{2\pi 500} \rightarrow \zeta = 1.97 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$e) SBS = \log_{10} \left(\frac{P_{ref}}{20 \times 10^6} \right) = \log_{10} \left(\frac{P/\sqrt{2}}{20 \times 10^6} \right) = \log_{10} \left(\frac{25.8/\sqrt{2}}{20 \times 10^6} \right) = 119.2 \text{ dB}$$

BOOKS on Acoustics and Noise Control

- ① Bies, P.A. ; Hansen, C.H.
"Engineering Noise Control", Unwin-Hyman, 1988
- ② Smith, B.J. ; Peters, R.J. ; Owen, S.
"Acoustics and Noise Control", Longman, 1985
- ③ Ingard, K.U.
"Fundamentals of Waves and Oscillations", Cambridge, 1988
- ④ Fender, D.H.
"General Physics and Sound", E.U.P, 1964
- ⑤ Morse, P.M.
"Vibration and Sound", 2nd Ed. New York, McGraw-Hill
1948
- ⑥ Pierce, A.D.
"Acoustics: an introduction", McGraw-Hill, 1981
- ⑦ Kinsler, L.E ; Frey, A.R.
"Fundamentals of Acoustics", 3rd Ed. John Wiley, 1982
- ⑧ French, A.P.
"Vibration and Waves", Van Nostrand-Reinhold, 1986
- ⑨ Özgüven, N.
"Endüstriyel Gürültü Kontrolü", tmmob, 1986
Yayın : 118

Sound Pressure Sound Pressure Level



Brüel & Kjær

DK-2850 Naerum · Denmark · Telephone: +45 42 80 05 00 · Telex: 37316 bruKa dk · Fax: +45 42 80 14 05



PROPLAN
Proje Müh. San. ve Tic. Ltd. Şti.
Kızıntem Sk. No 78 80620 Levent - İSTANBUL
Tel: (212) 268 25 74, 279 95 22 Faks: (212) 264 65 07
E-Posta: proplan@proplan.com.tr

BG 0857-11

Table I Elastic constants, velocity of sound, characteristic impedance

(a) SOLIDS

Solid	Density kg/m ³ ρ_0	Young's Modulus newtons/m ² Y	Shear Modulus newtons/m ² G	Bulk Modulus newtons/m ² B	Poisson's Ratio α	Velocity m/sec c		Characteristic Impedance MKS rayls $\rho_0 c$	
						Bar	Bulk	Bar	Bulk
		$\times 10^{10}$	$\times 10^{10}$	$\times 10^{10}$				$\times 10^6$	$\times 10^6$
Aluminum	2700	7.1	2.4	7.5	0.33	5150	6300	13.9	17.0
Brass	8500	10.4	3.8	13.6	0.37	3500	4700	29.8	40.0
Copper	8900	12.2	4.4	16.0	0.35	3700	5000	33.0	44.5
Iron (cast)	7700	10.5	4.4	8.6	0.28	3700	4350	28.5	33.5
Lead	11300	1.65	0.55	4.2	0.44	1200	2050	13.6	23.2
Nickel	8800	21.0	8.0	19.0	0.31	4900	5850	43.0	51.5
Silver	10500	7.8	2.8	10.5	0.37	2700	3700	28.4	39.0
Steel	7700	19.5	8.3	17.0	0.28	5050	6100	39.0	47.0
Glass (Pyrex)	2300	6.2	2.5	3.9	0.24	5200	5600	12.0	12.9
Quartz (X-cut)	2650	7.9	3.9	3.3	0.33	5450	5750	14.5	15.3
Lucite	1200	0.4	0.14	0.65	0.4	1800	2650	2.15	3.2
Concrete	2600	—	—	—	—	—	3100	—	8.0
Ice	920	—	—	—	—	—	3200	—	2.95
Cork	240	—	—	—	—	—	500	—	0.12
Oak	720	—	—	—	—	—	4000	—	2.9
Pine	450	—	—	—	—	—	3500	—	1.57
Rubber (hard)	1100	0.23	0.1	0.5	0.4	1450	2400	1.6	2.64
Rubber (soft)	950	0.0005	—	0.1	0.5	70	1050	0.065	1.0
Rubber (rho-c)	1000	—	—	0.24	—	—	1550	—	1.55

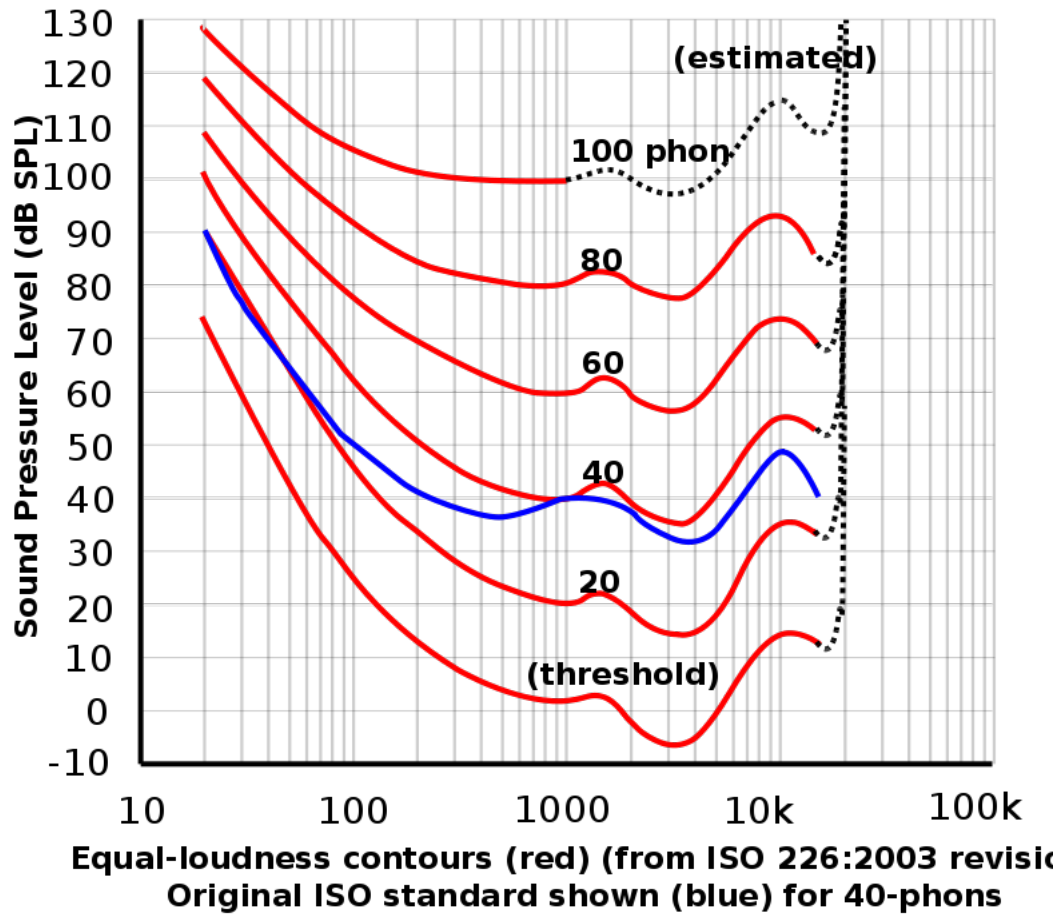
Table I (continued)

(b) LIQUIDS

Liquid	Temperature °C t	Density kg/m ³ ρ_0	Bulk Modulus newtons/m ² B_T	Ratio of Specific Heats γ	Velocity m/sec c	Characteristic Impedance MKS Rayls $\rho_0 c$	Coefficient of Viscosity newton sec/m ² η
			$\times 10^9$			$\times 10^6$	
Water (fresh)	20	998	2.18	1.004	1481	1.48	0.001
Water (sea)	13	1026	2.28	1.01	1500	1.54	0.001
Alcohol (ethyl)	20	790	—	—	1150	0.91	0.0012
Caster oil	20	950	—	—	1540	1.45	0.96
Mercury	20	13600	25.3	1.13	1450	19.7	0.0016
Turpentine	20	870	1.07	1.27	1250	1.11	0.0015
Glycerin	20	1260	—	—	1980	2.5	1.2

(c) GASES
(at a pressure of 1.013×10^5 newtons/m²)

Gas	Temperature °C t	Density kg/m ³ ρ_0	Ratio of Specific Heats γ	Velocity m/sec c	Characteristic Impedance MKS rayls $\rho_0 c$	Coefficient of Viscosity newton sec/m ² η
Air	0	1.293	1.402	331.6	428	0.000017
Air	20	1.21	1.402	343	415	0.0000181
Oxygen	0	1.43	1.40	317.2	453	0.00002
CO ₂ (low freq.)	0	1.98	1.304	258	512	0.0000145
CO ₂ (high freq.)	0	1.98	1.40	268.6	532	0.0000145
Hydrogen	0	0.09	1.41	1269.5	114	0.0000025
Steam	100	0.6	1.324	404.8	242	0.000013



ÇEVRESEL GÜRÜLTÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ VE YÖNETİMİ YÖNETMELİĞİ

BİRİNCİ BÖLÜM

Amaç, Kapsam, Dayanak ve Tanımlar

Amaç

MADDE 1 - (1) Bu Yönetmeliğin amacı; çevresel gürültüye maruz kalınması sonucu kişilerin huzur ve sükûnunun, beden ve ruh sağlığının bozulmaması için gerekli tedbirlerin alınmasını sağlamak ve kademeli olarak uygulamaya konulmak üzere; değerlendirme yöntemleri kullanılarak çevresel gürültüye maruz kalma seviyelerinin, hazırlanacak gürültü haritaları, akustik rapor ve çevresel gürültü seviyesi değerlendirme raporu ile belirlenmesi, çevresel gürültü ve etkileri hakkında kamuoyunun bilgilendirilmesi, gürültü haritaları, akustik rapor ve çevresel gürültü seviyesi değerlendirme raporu sonuçları esas alınarak; özellikle çevresel gürültüye maruz kalma seviyelerinin insan sağlığı üzerinde zararlı etkilere sebep olabileceği ve çevresel gürültü kalitesini korumanın gerekli olduğu yerlerde, gürültüyü önleme ve azaltmaya yönelik eylem planlarının hazırlanması ve bu planların uygulanması ile ilgili usul ve esasları belirlemektir.

Kapsam

MADDE 2 - (1) Bu Yönetmelik; özellikle nüfusun yoğun olduğu alanlarda, parklarda veya yerleşim bölgelerindeki diğer sessiz alanlarda, açık arazideki sessiz alanlarda, okul, hastane ve diğer gürültüye hassas alanlar da dahil olmak üzere insanların maruz kaldığı çevresel gürültüler ile çevresel titreşime yönelik esas ve usulleri kapsar.

(2) Bu Yönetmelik kişinin kendisinden dolayı maruz kaldığı gürültüyü, 26 ncı maddede belirtilen ev faaliyetleri dışındaki gürültüler ile komşuların oluşturduğu gürültüyü, 22/5/2003 tarihli ve 4857 sayılı İş Kanunu kapsamındaki işyerlerinde çalışan işçilerin maruz kaldığı gürültüyü, ulaşım araçlarının iç gürültüsünü ve askeri alanlardaki askeri faaliyetlere bağlı gürültüyü kapsamaz.

Dayanak

MADDE 3 - (1) Bu Yönetmelik; 9/8/1983 tarihli ve 2872 sayılı Çevre Kanununun 14 üncü maddesi ile 1/5/2003 tarihli ve 4856 sayılı Çevre ve Orman Bakanlığı Teşkilat ve Görevleri Hakkındaki Kanunun 9 uncu maddesinin birinci fıkrasının (b) bendine dayanılarak hazırlanmıştır.

Tanımlar

MADDE 4 – (1) Bu Yönetmelikte geçen;

- a) Açık arazideki sessiz alan: Yetkili idare tarafından ulaşım, sanayi veya rekreasyon faaliyetlerinden kaynaklanan her türlü gürültü rahatsızlığına maruz kalmayacak şekilde ayrılan bir alanı,
- b) Ağırlıklama: İnsan işitme sisteminin özelliğinin dikkate alınarak, ses basıncı seviyesinin frekanslara göre farklı şekilde değiştirilmesini,
- c) Ağırlıklanmış ses azaltma indeksi (Rw): Malzemelerin ses yalıtım performansının laboratuvar şartlarında ölçülen ve tek bir değer olarak ifade edilen etiket değerini,
- ç) Akşam gürültü göstergesi (Lakşam): A ağırlıklı uzun dönem ses seviyesinin enerji ortalaması olup, yılın akşam sürelerinin tamamına göre belirlenen ve akşam süresindeki rahatsızlığı ifade etmekte kullanılan etkilenim seviyesini,
- d) Akustik gölge bölgesi: Ses dalgalarının bir çevrede yayılmaları sırasında engeller, rüzgâr etkisi ve günlük sıcaklık değişimleri gibi dış etkilerle kırılma ve kıvrılmalara uğramaları sonucu ortaya çıkan ve içerisinde ses seviyelerinin 10 dB kadar azalma gösterdiği alanları,
- e) Akustik planlama: Gelecekte var olabilecek gürültülerin arazi kullanım planlaması, trafik ve trafik planlaması için sistem mühendisliği ile ses yalıtımı tedbirleri ve gürültü kaynaklarının kontrolü gibi planlanmış tedbirler kullanılarak kontrol edilmesini,
- f) Akustik rapor: 29/4/2009 tarihli ve 27214 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2’sinde yer alan ve 7/3/2008 tarihinden önce kurulmuş veya bu tarihten sonra planlama ve kurulma aşamasını tamamlayarak faaliyete geçmiş işletmelerin, tesislerin değerlendirme yöntemleri kullanılarak oluşması muhtemel çevresel gürültü seviyelerinin belirlendiği ve sınır değerlerin aşılmadığını gösteren raporu,
- g) Alıcıda tedbirler: Gürültünün azaltılmadığı ortamlarda özellikle yüksek seviyeli gürültüden korunmak için kişilerin işitme organlarının korunmasına yönelik etkilenen kişi üzerinde alınabilecek tedbirleri,
- ğ) Ana kara yolu: Yılda üç milyondan fazla aracın geçtiği bölgesel, ulusal veya uluslararası bir kara yolunu,
- h) Ana demir yolu: Yılda otuz binden fazla trenin geçtiği bir demir yolunu,

- ı) Ana hava limanı: Hafif uçaklarla tamamen eğitim maksatlı olarak yapılanlar hariç olmak üzere, yılda elli binden fazla kalkış ve inişin gerçekleştiği sivil hava alanını,
- i) Arka plan gürültüsü: Bir çevrede incelenen sesler bastırıldığında, verilen konumdaki ve verilen durumdaki geriye kalan toplam sesi,
- j) Atölye: Zanaatçıların veya resim, heykel sanatlarıyla uğraşanların çalıştığı işyerleri ile dokuma, konfeksiyon, torna, demir, doğrama ve benzeri işyerlerini,
- k) Bakanlık: Çevre ve Orman Bakanlığını,
- l) Canlı müzik: Gerçek enstrüman ve/veya seslerle veya banttan ya da elektronik olarak yükseltilmiş ses kaynağı kullanılarak yapılan müzik türünü,
- m) Çevresel gürültü: Ulaşım araçları, kara yolu trafiği, demir yolu trafiği, hava yolu trafiği, deniz yolu trafiği, açık alanda kullanılan teçhizat, şantiye alanları, sanayi tesisleri, atölye, imalathane, işyerleri ve benzeri ile rekreasyon ve eğlence yerlerinden çevreye yayılan gürültü dâhil olmak üzere, insan faaliyetleri neticesinde oluşan zararlı veya istenmeyen açık hava seslerini,
- n) Çevresel gürültü seviyesi değerlendirme raporu: Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sinde yer almayan ve bu Yönetmeliğin yürürlüğe girmesinden önce kurulmuş veya bu Yönetmeliğin yürürlüğe girmesinden sonra kurulması planlanan veya kurulup işletmeye geçen işletmelerin, tesislerin, işyerlerinin değerlendirme yöntemleri kullanılarak oluşması muhtemel çevresel gürültü seviyelerinin belirlendiği ve sınır değerlerin aşılmadığını gösteren raporu,
- o) Çevresel tedbirler: Yapıların dışında veya içinde yer alan gürültü kaynaklarından doğan seslerin, yapı içindeki kişilere ulaşmaya kadar yayıldığı ortamda yapılabilecek her türlü gürültü kontrolü çalışmasını,
- ö) Çevresel titreşim: Maden ve taş ocakları, ulaşım araçları, sanayi ve inşaat makineleri gibi işlemlerden doğan ve yapılarda kullanım alanı dışında başka maksatlarla kullanılan hacimlerdeki faaliyetler sırasında oluşan genellikle katı, sıvı ve gaz ortamlarda yayılan ve insan vücudunca hissedilen mekanik salınım hareketlerini,
- p) Çınlama süresi (sn): Bir hacmin akustik özelliğini frekansa bağlı olarak belirleyen parametreyi ve hacim içinde faaliyette olan bir ses kaynağının susmasından itibaren ses basınç seviyesinin 60 dB azalması için geçen süreyi,
- r) **(Değişik:RG-18/11/2015-29536)** Çok hassas kullanımlar: Konut, yataklı hizmet veren sağlık kurumları, çocuk ve yaşlı bakım evleri, yatılı eğitim kurumları, öğrenci yurtları gibi kullanımları,

- ş) Darbe gürültüsü: İki kütlenin birbirine çarpması ile ortaya çıkan gürültüyü,
- ş) dB: Birbirinden merteye farklılıkları gösteren, nicelikleri anlamlı olarak ifade etmede kullanılan logaritmik bir ölçeği,
- t) dBA: İnsan işitme sisteminin düşük şiddetteki seslere karşı en çok hassas olduğu orta ve yüksek frekanslara daha fazla ağırlık veren, A ağırlıklı ses seviyesi olarak tabir edilen ve gürültünün etkilenim değerlendirilmesi ve kontrolünde yaygın olarak kullanılan bir ses seviyesi ölçütünü,
- u) Değerlendirme: Bir gürültü göstergesi veya ilgili zararlı etkilerin değerini hesaplamak, tayin etmek, öngörmek, tahmin etmek veya ölçmek için kullanılan her türlü yöntemi,
- ü) Doz-etki ilişkisi: Bir zararlı etki ile gürültü gösterge değeri arasındaki ilişkiyi,
- v) Eğlence yeri: Bir konaklama tesisi bünyesinde veya müstakil olarak faaliyet gösteren, müşterinin eğlence ihtiyacını karşılamaya yönelik canlı müzik hizmeti veren işyerini,
- y) Eşdeğer gürültü seviyesi (Leq): Belli bir süre içinde seviyeleri değişim gösteren, genellikle A ağırlıklanmış ses seviyesi olarak ölçülen, gürültünün enerji açısından eşdeğeri olan sabit seviyeyi,
- z) **(Değişik:RG-18/11/2015-29536)** Ev faaliyetleri ve komşuların oluşturduğu gürültü: Konutlarda kişilerin kendi davranış ve alışkanlıklarından kaynaklanan; kapı, pencere kapatma, yürüme, konuşma, temizlik yapma, mobilya çekme, televizyon seyretme, radyo dinleme, her türlü müzik aleti, çamaşır makinesi, buzdolabı, elektrik süpürgesi, mekanik veya motorlu dikiş makinesi, matkap, testere, öğütücü, çim biçme makinesi, koşu bandı gibi ekipmanları kullanma, hava kanalları, temiz ve pis su tesisatı, jeneratör, hidrofor, kompresör, yakma kazanı, asansör, çöp bacaları, mahalle aralarında ve meskenlerde yapılan düğün, asker uğurlamaları ve benzeri kutlamalar, evcil hayvan besleme ile bina içinde yapılacak tadilat nedeniyle oluşan gürültüyü,
- aa) Eylem planı: Gerektiğinde gürültü seviyesinin düşürülmesi de dahil olmak üzere gürültü ile ilgili sorunlar ve etkileriyle baş etmek için tasarlanan planları,
- bb) Fiziksel çevre faktörleri: Sesin kaynaktan kullanıcıya, yapı veya etkilenen kişilere iletilmesi sırasında geçtiği fiziksel çevrede bulunan ve ses yayılımını etkileyen gürültüyü artırıcı veya azaltıcı her türlü faktörü,
- cc) Gündüz, akşam, gece gürültü göstergesi (L_{gag}): A ağırlıklı uzun dönem ses seviyesinin enerji ortalaması olup, günlük toplam rahatsızlığı ifade etmekte kullanılan etkilenim seviyesini,

çç) Gündüz gürültü göstergesi (Lgündüz): A ağırlıklı uzun dönem ses seviyesinin enerji ortalaması olup, yılın gündüz sürelerinin tamamına göre belirlenen ve gündüz süresindeki rahatsızlığı ifade etmekte kullanılan etkilenim seviyesini,

dd) Gece gürültü göstergesi (Lgece): A ağırlıklı uzun dönem ses seviyesinin enerji ortalaması olup, yılın gece sürelerinin tamamına göre belirlenen ve gece süresindeki uyku kaçıracı rahatsızlığı ifade etmekte kullanılan etkilenim seviyesini,

ee) Gürültü göstergesi: Bir zararlı etki ile ilgili olarak çevresel gürültünün tanımlanmasında kullanılan fiziksel bir ölçeği,

ff) Gürültü haritalama: Yürürlükte bulunan her türlü sınır değerin aşılmadığını göstermek gayesiyle, belirli bir alanda etkilenen kişi ve maruz kalan konut sayısı da dâhil olmak üzere, mevcut veya gelecekte ortaya çıkabilecek bir gürültü durumu hakkındaki verilerin; gürültü göstergesi kullanılarak söz konusu alanın fiziksel haritası üzerinde standartlara uygun olarak belirtilmesini,

gg) Gürültü kontrolü: Herhangi bir ses kaynağından yayılan gürültü niteliğine sahip sesleri, kabul edilebilir seviyeye indirmek, akustik özelliğini değiştirmek, etki süresini azaltmak, hoş giden veya daha az rahatsız eden bir başka ses ile maskelemek gibi yöntemlerle zararlı etkilerini tamamen veya kısmen yok etmek için yapılan işlemleri,

ğğ) Hassas olmayan kullanımlar: Otoparklar, garajlar, eğlence yerleri, sanayi tesisleri gibi kendisi gürültü kaynağı olabilen alan ve kullanımları,

hh) İç ortam gürültüsü: Yapı içindeki mekanik sistemler ve diğer gürültü kaynaklarından doğan ve mekân içinde bulunan insanları olumsuz etkileyen istenmeyen ve zararlı seslerin bütünü,

ıı) İmalathane: Hammaddeleri işleyerek piyasaya çıkacak duruma getiren işyerini,

ii) İşletme: Tesis ve faaliyetlerin bütünü,

jj) İşyeri: Kamu kurum ve kuruluşları, ticari kuruluşlar, hizmet binaları, spor tesisleri, tabanca ve tüfek poligonları, alışveriş merkezleri, tedavi merkezleri, halı ve oto yıkama yerleri, depolama yerleri, matbaalar gibi yerleri,

kk) Kaynakta tedbirler: Gürültü üreten ses kaynağının yapısı, işletme tekniği, oturduğu zemin, montaj biçimi ve buna benzer doğrudan kaynak ile ilgili olarak alınabilecek tedbirleri,

ll) Kamuoyu: Bu Yönetmeliğin uygulanması açısından, bir veya daha fazla gerçek veya tüzel kişi ile bunların ulusal mevzuat veya uygulamaya uygun olarak oluşturduğu dernek, örgüt veya grupları,

mm) Kesikli titreşim: Delicilerdeki gibi sürekliliği olmayan ya da kazık çakıcılardaki gibi belirli aralıklarla tekrarlanan titreşimi,

nn) LC max: dBC olarak ölçülen, ölçüm süresi içerisinde C ağırlıklı rms tabanlı ses seviyesinin en büyük değerini,

oo) Oktav bant: Gürültü enerjisinin frekansa göre değişimini ortaya çıkarmakta yararlanılan alt ve üst frekans sınırlarının birbirinin iki katı olan frekans bandı ve bant genişliğinin merkez frekansının % 70'ine eşit olduğu bandı,

öö) **(Değişik:RG-27/4/2011-27917)** Az hassas kullanımlar: İdari ve ticaret binaları, çocuk bahçeleri, oyun alanları ve spor tesisleri gibi kullanımları,

pp) Planlanan faaliyetler için akustik rapor: 17/7/2008 tarihli ve 26939 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Çevresel Etki Değerlendirmesi Yönetmeliğinin Ek-I listesinde bulunan ve Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğinin Ek-1 ve Ek-2'sinde yer alan “ * ” işareti bulunmayan kurulması planlanan işletmelerin, tesislerin ve ulaşım kaynaklarının değerlendirme yöntemleri kullanılarak oluşması muhtemel çevresel gürültü seviyelerinin belirlendiği ve sınır değerlerin aşılması halinde alınacak tedbirlerin bütününe içeren raporu,

rr) Rahatsızlık: Alan araştırmaları vasıtasıyla belirlenen toplumsal gürültü veya titreşim rahatsızlığının derecesini,

ss) Rekreasyon alanı: Kişinin fiziksel ve psikolojik olarak kendisini tekrar kazanabilmesini sağlayan dinlenme, eğlenme, gezi, serbest zamanları değerlendirme gibi çeşitli faaliyetleri kapsayan geniş eylem alanlarını,

şş) Ses basıncı seviyesi (Lp): Ortamda belli bir noktada ölçülen ses basıncının, 20×10^{-6} Pa veya 20 μ Pa referans ses basıncına oranının 10 tabanına göre logaritmasının 20 ile çarpılmasıyla bulunan ve dB cinsinden ifade edilen değeri,

tt) Ses gücü seviyesi (Lw): Bir ses kaynağının yaydığı ses gücünün milletlerarası standartlarda tanımlanan referans ses gücüne oranının 10 tabanına göre logaritmasının 10 ile çarpılmasıyla bulunan ve dB cinsinden ifade edilen değeri,

uu) Seviye ayarlaması: Gürültünün türüne ya da belirgin olarak duyulan bir frekansın varlığına bağlı olarak, ölçülen ya da hesaplamayla bulunan eşdeğer gürültü seviyesine eklenecek değeri,

üü) Sınır değer: Yetkili idarece belirlenen, aşılması halinde yetkili idarece dikkate alınan ve azaltıcı tedbirlerin uygulamaya konulmasına yol açan Lgag veya Lgece, ve uygun olan hallerde Lgündüz, Lakşam, Lgece ve Leq değerini,

vv) Stratejik gürültü haritası: Farklı kaynaklar bazında mevcut gürültü durumunun veriler sayesinde sergilenmesini,

yy) Sürekli titreşim: Gündüz veya akşam veya gece vakti gibi belirlenen bir zaman dilimi boyunca engellenmeden devam eden titreşimi,

zz) Tepe değer: Verilen bir zaman aralığındaki en yüksek titreşim değerini,

aaa) Tesis: Bu Yönetmelikte tanımlanan işyeri, atölye, imalathane, eğlence yeri kapsamı dışında kalan ve Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sinde yer alan tesisleri,

bbb) Titreşimin yer değiştirme, hız, ivme cinsinden rms değeri: Belirli bir zaman aralığında ölçülen titreşim değerlerinin karelerinin ortalamasının karekökünü,

ccc) Titreşimden etkilenme sınırı: Titreşimin; insan sağlığı, performansı ve konforu üzerinde oluşturduğu hareket hastalığı gibi fizyolojik ve psikolojik etkilerle yapılarda oluşturduğu hasarların başlama sınırlarındaki, titreşim ivmesi, hızı, genliği, frekansları ve etkilenme süresi gibi parametrelerle ortaya konulmuş kriterleri,

ççç) Gürültü haritası hazırlanacak yerleşim alanı: Nüfusu yüz binden fazla olan, şehirleşmiş alan olarak kabul edilen ve nüfus yoğunluğunun kilometre kare başına 1000 kişiden fazla olduğu alanları,

ddd) Yerleşim alanı içindeki sessiz alan: Yetkili idare tarafından gürültü kaynakları için belirlenen sınır değerlerin üstüne veya yetkili idare tarafından konulmuş belli bir değerden daha büyük bir gürültü gösterge değerine maruz kalmayacak şekilde ayrılan bir alanı,

eee) Yetkili idare: İkinci bölümde belirtilen idareleri,

fff) Zararlı etkiler: İnsan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri,

ggg) **(Değişik:RG-18/11/2015-29536)** Hassas kullanımlar: Yataklı hizmet veren konaklama tesisleri, eğitim kurumları ile dini tesisleri,

ğğğ) **(Mülga:RG-18/11/2015-29536)**

hhh) **(Ek:RG-27/4/2011-27917)** Gürültüye hassas kullanımlar: Çok hassas kullanımlar, hassas kullanımlar ve az hassas kullanımları,

hhh) **(Ek:RG-18/11/2015-29536)** Açık eğlence yeri: Oluşan sesin, bütün cephelerden atmosfere direk geçişine izin verecek şekilde olan eğlence mekânlarını,

iii) (Ek:RG-18/11/2015-29536) Kapalı eğlence yeri: Bütün cepheleri ve üstü yapı elemanları (beton, tuğla, cam ve benzeri) ile kapalı olan ve içeride oluşan sesin; kapı, pencere ve benzeri açıklıklardan atmosfere direkt geçişine imkân vermeyecek şekilde önlem alınmış eğlence mekânlarını,

iii) (Ek:RG-18/11/2015-29536) Yarı açık eğlence yeri: En az bir cephesi veya üstü açık olan veya kullanılan yapı elemanı portatif veya açılıp kapanabilir özellikte olan, içeride oluşan sesin atmosfere direkt geçişine imkân verecek şekilde açıklık (kapı, pencere, havalandırma ve benzeri) bulunan eğlence mekânlarını,

ifade eder.

İKİNCİ BÖLÜM

Görev, Yetki ve Sorumluluklar

Bakanlığın görev, yetki ve sorumlulukları

MADDE 5 - (1) Bakanlık;

- a) Kişilerin huzur ve sükûnunu beden ve ruh sağlığını gürültü ile bozmayacak bir çevrenin geliştirilmesi gayesiyle, çevresel gürültüyü azaltacak program ve politikaları belirlemek, buna yönelik mevzuat ve mevzuatın uygulanmasını kolaylaştırıcı her türlü dokümanı hazırlamak, bu Yönetmeliğin uygulanmasında işbirliği ve koordinasyonu sağlamakla,
- b) Çevre Kanunu çerçevesinde il çevre ve orman müdürlükleri ve yetki devri yapılan belediyelerle işbirliği ve koordinasyon içinde gürültü kaynaklarını denetlemek, gerektiğinde gürültü kaynakları için akustik rapor veya çevresel gürültü seviyesi değerlendirme raporu hazırlattırmak, bu raporları incelemek ve değerlendirmek, bu Yönetmeliğin ihlalinin tespiti halinde idari yaptırım uygulamak, yetki devri yapılacak kurumlarda aranacak esasları belirleyip yetki devri yapmakla,
- c) Bu Yönetmeliğin uygulanmasından yetkili ve sorumlu kılınan kurum ve kuruluşlar ile bu Yönetmelik gereği hazırlanacak akustik rapor, çevresel gürültü seviyesi değerlendirme raporu, gürültü haritası ve eylem planı hazırlayacak kurum ve kuruluş temsilcilerinin uzmanlaşmasını sağlayıcı programların içeriği ve programların uygulama prosedürünü belirlemekle,
- ç) Akustik rapor, çevresel gürültü seviyesi değerlendirme raporu, gürültü haritası ve eylem planı hazırlayacak kurum ve kuruluşların sağlaması gereken esasları belirlemek, esasları sağlayanlara ön yeterlik/yeterlik belgesi vermek, ön yeterlik/yeterlik belgesi alan ve bu kapsamda görev yapan kurum ve kuruluşları denetlemek, belgelendirme esaslarına aykırı davranılmasının tespiti halinde gerekli yaptırımın uygulanmasını sağlamak ve gerekirse ön yeterlik/yeterlik belgesini iptal etmekle,

d) Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1'inde yer alan işletme ve tesislere verilecek çevre izin veya çevre izin ve lisans belgesi kapsamında değerlendirme yapmak, bu çerçevede işletmeleri denetlemek, bu Yönetmelikte belirtilen esaslara aykırılık halinde gerekli yaptırım uygulamak ve uygulanmasını sağlamakla,

e) Stratejik Gürültü Haritaları ve Eylem Planları ile ilgili olarak;

1) Yetkili ve sorumlu kurum ve kuruluşlarca hazırlanan gürültü haritaları ve eylem planlarına görüş vermekle,

2) Yetkili ve sorumlu kurum ve kuruluşlarca hazırlanarak Bakanlığa gönderilen gürültü haritaları ve eylem planları ile Ek-VI'da yer alan her türlü bilgi ve belgeye yönelik veri bankası oluşturmakla

yetkili ve sorumludur.

İl çevre ve orman müdürlüklerinin görev, yetki ve sorumlulukları

MADDE 6 – (1) İl çevre ve orman müdürlükleri;

a) Çevre Kanunu gereği yetki devri yapılmayan alanlarda gürültü kaynaklarını programlı, programsız veya şikâyetlere istinaden, gerektiğinde diğer mevzuat kapsamında yetkili kılınan kurum ve kuruluşlar ile işbirliği ve koordinasyon içinde, bu Yönetmelikte getirilen esaslara uyulup uyulmadığını denetlemek, gerektiğinde gürültü kaynakları için akustik rapor veya çevresel gürültü seviyesi değerlendirme raporu hazırlattırmak, bu raporları incelemek ve değerlendirmek, bu Yönetmeliğin ihlalinin tespiti halinde idari yaptırım uygulamakla,

b) Yetki devri yapılan kurum ve kuruluşların talepleri veya gerekli görülmesi halinde koordinasyon ve işbirliği içinde çalışmakla,

c) Yetki devri yapılmış kurumların faaliyetleri sebebiyle oluşan çevresel gürültüyü denetlemek ve idari yaptırım uygulamakla,

ç) Yetki talebinde bulunan kurum ve kuruluşların taleplerini değerlendirip Bakanlığa iletmek, yetki devri yapılan kurum ve kuruluşların yetkileri çerçevesinde çalışıp çalışmadığını denetlemek, yetkilerini yerine getirmeyenleri tespit ederek Bakanlığa bildirmekle,

d) İlde Çevre Kanununun 14 üncü maddesine istinaden yapılan denetim ve idari yaptırımların sonuçlarını Bakanlığa iletmekle,

e) Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-2'sinde yer alan işletme ve tesislere verilecek çevre izin veya çevre izin ve lisans belgesi kapsamında değerlendirme

yapmak, bu çerçevede işletme ve tesisleri denetlemek, bu Yönetmelikte belirtilen esaslara aykırılık halinde gerekli yaptırımın uygulanmasını sağlamakla,

f) Dini ve milli bayramlar ile yerel millî günler ve kutlamalar maksadıyla yapılacak faaliyetler için bu Yönetmelik çerçevesinde getirilen yasaklara İl Mahalli Çevre Kurul Kararı almak kaydıyla istisna getirmekle, istisna kapsamında alınan kararları kamuoyuna duyurmakla

yetkili ve sorumludur.

Mahalli idarelerce alınacak tedbirler

MADDE 7 - (1) İl özel idareleri;

a) Çevre Kanunu gereği yetki devri yapılan il özel idareleri belediye sınırları ve mücavir alan dışında gürültü kaynaklarını programlı, programsız veya şikâyetlere istinaden gerektiğinde diğer mevzuat kapsamında yetkili kılınan kurum ve kuruluşlar ile işbirliği ve koordinasyon içinde, bu Yönetmelikte getirilen esaslara uyulup uyulmadığını denetlemek, gerektiğinde gürültü kaynakları için akustik rapor veya çevresel gürültü seviyesi değerlendirme raporu hazırlattırmak, bu raporları incelemek ve değerlendirmek, bu Yönetmeliğin ihlalinin tespiti halinde idari yaptırım uygulamakla,

b) Belediye sınırları ve mücavir alan dışında; yapıların mimari projelerinde ve yapı ruhsatlarında 28 inci maddede belirtilen şartların aranmasıyla,

c) Stratejik Gürültü Haritaları ve Eylem Planları ile ilgili olarak;

1) Belediye sınırları ve mücavir alan dışında gürültü haritalarının hazırlanmasında gerekli olan, gürültü kaynakları dışındaki tüm verileri toplamak ve belirleyeceği esaslar çerçevesinde gürültü haritası hazırlamakla sorumlu kurum ve kuruluşların kullanımına açmakla,

2) Belediye sınırları ve mücavir alan dışındaki gürültü haritası hazırlanan alanlarda mevcut veya ileriye yönelik projelendirme veya başka bir yatırımı gerçekleştirme konusunda çalışması olabilecek ilgili tüm kurum ve kuruluşların görüşlerini almakla,

3) Belediye sınırları ve mücavir alan dışında 8 inci maddenin birinci fıkrasının (ç) bendinin (3) ve (4) numaralı alt bendine istinaden gürültü haritaları hazırlanan kaynakların; yakınındaki limanlar ile Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sinde belirtilen işletme ve tesislerin bulunduğu alanlar için ayrı ayrı gürültü haritalarını ve bu gürültü haritalarının kapsadığı alanların eylem planlarını hazırlamakla,

4) Belediye sınırları ve mücavir alan dışındaki alan için hazırlanan eylem planlarını kamuoyu görüşüne açmakla,

5) Belediye sınırları ve mücavir alan dışındaki alan için hazırlanan gürültü haritalarının ve eylem planlarının nihai hali hakkında kamuoyuna bilgi vermekle ve Bakanlığa göndermekle

ilgili hususlarda gerekli tedbirleri alır.

(2) Belediyeler;

a) Çevre Kanunu gereği yetki devri yapılan belediyeler, belediye sınırları ve mücavir alan içinde gürültü kaynaklarını programlı, programsız veya şikâyetlere istinaden gerektiğinde diğer mevzuat kapsamında yetkili kılınan kurum ve kuruluşlar ile işbirliği ve koordinasyon içinde, bu Yönetmelikte belirlenen esaslara uyulup uyulmadığını denetlemek, gerektiğinde gürültü kaynakları için akustik rapor veya çevresel gürültü seviyesi değerlendirme raporu hazırlattırmak, bu raporları incelemek ve değerlendirmek, bu Yönetmeliğin ihlalinin tespiti halinde idari yaptırım uygulamakla,

b) Yetki devri yapılmış belediyeler; belediye sınırları ve mücavir alan içinde yapılan denetim sonuçlarını il çevre ve orman müdürlüklerine göndermekle,

c) Belediye sınırları ve mücavir alan içinde ilgili belediye; yapıların mimari projelerinde ve yapı ruhsatlarında 28 inci maddede belirtilen şartların aranmasıyla,

ç) Nazım İmar Planları ve Uygulama İmar Planlarının hazırlanması aşamasında 27 nci maddede öngörülen gürültüye maruz kalma kategorilerini dikkate almakla,

d) Stratejik Gürültü Haritaları ve Eylem Planları ile ilgili olarak;

1) Belediye sınırları ve mücavir alan içinde gürültü haritası hazırlanacak yerleşim alanlarını Bakanlık merkez ve taşra teşkilatı ile koordinasyon ve işbirliği içinde belirlemekle,

2) Belediye sınırları ve mücavir alan içindeki yerleşim alanlarının, gürültü haritalarının hazırlanmasında gerekli olan, gürültü kaynakları dışındaki tüm verileri toplamak ve belirleyeceği esaslar çerçevesinde gürültü haritası hazırlamakla sorumlu kurum ve kuruluşların kullanımına açmakla,

3) Belediye sınırları ve mücavir alan içinde gürültü haritası hazırlanacak yerleşim alanlarında yer alan; karayolu, tramvay ile yerüstünden geçen metro yolları trafiği, limanlar ve Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sindeki işletme/tesisler veya atölye-imalathane-eğlence yerleri gibi gürültü kaynaklarının bulunduğu alanlar için ayrı ayrı gürültü haritalarının hazırlanmasıyla,

- 4) Belediye sınırları ve mücavir alan içindeki gürültü haritası hazırlanan yerleşim alanlarında mevcut veya ileriye yönelik projelendirme veya başka bir yatırımı gerçekleştirme konusunda çalışması olabilecek ilgili tüm kurum ve kuruluşların görüşlerini almakla,
- 5) Belediye sınırları ve mücavir alan içindeki gürültü haritası hazırlanan yerleşim alanında 8 inci maddede yetkili kılınan kurum veya kuruluş tarafından hazırlanan gürültü haritalarını da göz önünde bulundurularak; karayolları, demiryolları, tramvay ile yerüstünden geçen metro yolları, havaalanları, limanlar ve Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sindeki işletme/tesisler veya eğlence yerleri, imalathane gibi gürültü kaynaklarının bulunduğu alanları kapsayan eylem planlarını hazırlamakla,
- 6) Belediye sınırları ve mücavir alan içindeki yerleşim alanı için hazırlanan eylem planlarını kamuoyu görüşüne açmakla,
- 7) Belediye sınırları ve mücavir alan içindeki yerleşim alanı için hazırlanan gürültü haritalarının ve eylem planlarının nihai hali hakkında kamuoyuna bilgi vermekle ve Bakanlığa göndermekle,
- 8) Büyükşehir belediye başkanlıkları, büyükşehir belediye sınırları ve mücavir alan içinde belirlenen yerleşim alanı veya alanlarında yer alan; karayolu, tramvay ile yerüstünden geçen metro yolları trafiği, limanlar ve Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sinde yer alan işletme/tesisler veya atölye-imalathane- eğlence yerleri gibi gürültü kaynaklarının bulunduğu alanlar için ayrı ayrı gürültü haritalarını ilgili belediyelerle koordinasyon ve işbirliği içinde hazırlamakla

ilgili hususlarda gerekli tedbirleri alır.

Kurum, kuruluş ve işletmelerce alınacak tedbirler

MADDE 8 – (1) Kurum, kuruluş veya işletmelerden;

a) Sağlık Bakanlığı; 13/12/1983 tarihli ve 181 sayılı Sağlık Bakanlığının Teşkilat ve Görevleri Hakkında Kanun Hükmünde Kararname gereği işitme sağlığı ve kritik sağlık etkileri göz önüne alınarak gürültüden etkilenme seviyelerinin belirlenmesi ve izlenmesine ilişkin esas ve usullerin belirlenmesiyle,

b) Diyanet İşleri Başkanlığı; dini tesislerde ses yükseltici kullanımından çevreye yayılan sesin kontrolüne ilişkin esasların belirlenmesiyle,

c) İşletme, tesis (fabrika), işyeri, atölye, imalathane, eğlence yeri ve ulaşım kaynaklarını planlayan ve işletenler;

1) Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sinde yer alan işletme ve tesisler için çevre izin veya çevre izin ve lisans belgesine esas olacak akustik raporu hazırlamak ve bu Yönetmelik ile belirlenen sınır değerlerin sağlanmadığı durumlarda gerekli tedbirlerin alınmasını sağlamakla,

2) Kurulması planlanan ve Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sinde yer alan işletme ve tesisler ile 18, 19, 20 ve 21 inci maddelerinde yer alan ulaşım kaynakları için hazırlanacak çevresel etki değerlendirme raporu veya proje tanıtım dosyasının gürültü ile ilgili bölümünün bu Yönetmelikte yer alan esaslar çerçevesinde hazırlanmasını sağlamakla,

3) Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sinde yer almayan işletme, tesis, işyeri, imalathane ve atölyeler ile eğlence yerleri ve benzeri yerlerle ilgili işyeri açma ve çalışma ruhsatı safhasında veya programlı, programsız veya şikâyete istinaden yapılacak denetimlerde, yetkili idarenin talebine istinaden çevresel gürültü seviyesi değerlendirme raporu hazırlamakla,

4) Sanayi tesisi, atölye, imalathane, eğlence yeri gibi işletmeciler ile liman işletmecileri; bu alanların gürültü haritalarının hazırlanmasından sorumlu kurum ve kuruluşun talebi halinde istenen verileri belediyeye veya il özel idarelerine iletmekle,

ç) Ulaştırma Bakanlığı;

1) Devlet yolları ve otoyollardan, ana karayolları sınıfına giren karayollarını, ana demiryolları ve ana havaalanlarını belirleyip listesini Bakanlığa bildirmekle,

2) Yerleşim alanları içindeki devlet yolları ve otoyollar için gürültü haritası hazırlanmasında gerekli olacak verileri Belediyeye iletmekle,

3) Yerleşim alanı dışında devlet yolları ve otoyollardan, ana karayolları sınıfına giren karayollarının gürültü haritasını hazırlamakla,

4) Yerleşim alanı dışında yer alan ana demiryolları ve ana havaalanlarının gürültü haritasını hazırlamakla,

5) Sorumluluk alanlarına göre yerleşim alanı dışında; ana karayolu, ana demiryolu ve ana havaalanı yakınındaki alanlarda yer alan devlet yolları ve otoyollar ile demiryolları ve havaalanlarının gürültü haritasını hazırlamakla,

6) Yerleşim alanı içinde yer alan ve sorumluluk alanına giren demiryollarının ve havaalanlarının gürültü haritasını hazırlamakla,

7) Planlanan karayolları, demiryolları ve havaalanları için mevcut veya ileriye yönelik projelendirme veya başka bir yatırım gerçekleştirme konusunda çalışması olabilecek ilgili tüm kurum ve kuruluşların görüşlerini almak, bu görüşler çerçevesinde gürültü kontrol tedbirlerine ilişkin programlar hazırlamakla,

8) Gürültü haritalarının nihai hali hakkında kamuoyuna bilgi vermekle ve Bakanlığa göndermekle ilgili hususlarda gerekli tedbirleri alır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

Kaynakların Ses Seviyeleri

Kara yolu araçlarında uyulması gereken şartlar

MADDE 9 – (1) Motorlu kara yolu araçları aşağıdaki esaslara uyar.

a) Motorlu kara yolu araçlarının kara yoluna uygunluğu ve teknik esasları 13/10/1983 tarihli ve 2918 sayılı Karayolları Trafik Kanununun 29 uncu maddesi uyarınca; araçların, yapım ve kullanım bakımından kara yolu yapısına ve trafik güvenliğine uyması zorunludur. Bununla ilgili alt düzenleyici işlemlerin belirlenmesini Sanayi ve Ticaret Bakanlığı yapar.

b) Kamuya açık yerlerde çalıştırılan motorlu kara yolu taşıtlarının dış gürültü seviyesi ve egzoz sistemleri ile ilgili olarak 30/11/2000 tarihli ve 24246 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Motorlu Araçların Dış Gürültü Emisyonları ve Egzoz Sistemleri ile İlgili Tip Onayı Yönetmeliği (70/157/AT) kapsamında getirilen esaslar sağlanır.

c) Motorlu kara yolu araçlarının kornaları gibi sesli uyarı cihazları ile ilgili olarak, 1/5/1999 tarihli ve 23682 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Motorlu Araçların Sesli İkaz Cihazları ve Bunların Takılması ile İlgili Tip Onayı Yönetmeliği (70/388/AT) kapsamında getirilen esasların sağlanması zorunludur. Geçiş üstünlüğünü haiz taşıtlara 18/7/1997 tarihli ve 23053 mükerrer sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Karayolları Trafik Yönetmeliğinin 141 inci maddesi uygulanır.

ç) Tekerlekli tarım veya orman traktörlerinin dış gürültü seviyeleri ile ilgili olarak, 13/6/2002 tarihli ve 24784 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Tekerlekli Tarım veya Orman Traktörlerinin Bazı Parçaları ve Özellikleri ile İlgili Tip Onayı Yönetmeliği (74/151/AT) kapsamında getirilen esaslar sağlanır.

d) İki veya üç tekerlekli motorlu kara yolu araçlarının dış gürültü seviyeleri ile ilgili olarak, 18/7/2003 tarihli ve 25172 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan İki veya Üç Tekerlekli Motorlu Araçların Bazı

Aksam ve Özellikleri ile İlgili Tip Onayı Yönetmeliği (97/24/AT)'nin ekindeki Kısım 9'da getirilen esaslar sağlanır.

Demir yolu ulaşım araçlarında uyulması gereken şartlar

MADDE 10 – (1) Banliyö ve şehirlerarası trenler ile ağır ve hafif metroların dış gürültü seviyeleri ile yolcu ve tren çalışanlarının kulak sağlığı ve konforu açısından iç gürültü ve vagon içi titreşim seviyelerine ilişkin düzenlemeleri 9/4/1987 tarihli ve 3348 sayılı Ulaştırma Bakanlığının Teşkilat ve Görevleri Hakkında Kanun hükümleri uyarınca Ulaştırma Bakanlığı yapar.

Hava yolu ulaşım araçlarında uyulması gereken şartlar

MADDE 11 – (1) Türk sicilindeki ve yabancı ülke sicilindeki hava yolu araçlarının iç ve dış trafiğe açık hava alanlarımıza iniş ve kalkış yapabilmeleri için hava alanı araçlarının dış gürültü seviyeleri ile yolcu ve hava aracı çalışanlarının kulak sağlığı ve konforu açısından iç gürültü ile araç içi titreşim seviyelerine ilişkin düzenlemeleri Ulaştırma Bakanlığının Teşkilat ve Görevleri Hakkında Kanun hükümleri uyarınca Ulaştırma Bakanlığı yapar.

Su yolu ulaşım araçlarında uyulması gereken şartlar

MADDE 12 – (1) Deniz, göl veya başka suyollarında kullanılan araçların dış gürültü seviyeleri ile yolcu ve su yolu aracı çalışanlarının kulak sağlığı ve konforu açısından iç gürültü ile araç içi titreşim seviyelerine ilişkin düzenlemeleri 10/8/1993 tarihli ve 491 sayılı Denizcilik Müsteşarlığının Kuruluş ve Görevleri Hakkında Kanun Hükmünde Kararname hükümleri uyarınca Denizcilik Müsteşarlığı yapar.

Açık alanda kullanılan ekipmanlarda uyulması gereken şartlar

MADDE 13 – (1) Açık alanda kullanılan ekipmanların gürültü seviyesi, 30/12/2006 tarihli ve 26392 dördüncü mükerrer sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Açık Alanda Kullanılan Teçhizat Tarafından Oluşturulan Çevredeki Gürültü Emisyonu ile İlgili Yönetmelik (2000/14/AT) hükümlerine tabidir. Açık alanda kullanılan ancak söz konusu yönetmelikte yer almayan ekipmanlarla ilgili düzenlemeleri Sanayi ve Ticaret Bakanlığının Teşkilat ve Görevleri Hakkında Kanun hükümleri uyarınca Sanayi ve Ticaret Bakanlığı yapar.

Ev aletlerinde uyulması gereken şartlar

MADDE 14 – (1) Ev ekipmanlarının gürültü seviyesi, ilgili mevzuat hükümlerine tabidir. Ev işlerinde kullanılan, ancak söz konusu mevzuatta yer almayan elektrikli veya elektriksiz aletlerle ilgili düzenlemeleri Sanayi ve Ticaret Bakanlığının Teşkilat ve Görevleri Hakkında Kanun hükümleri uyarınca Sanayi ve Ticaret Bakanlığı yapar.

Sanayi tesislerinde kullanılan alet, ekipman ve makinelerde uyulması gereken şartlar

MADDE 15 – (1) Sanayi tesislerinde kullanılan alet, ekipman ve makinelerde 3/3/2009 tarihli ve 27158 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Makina Emniyeti Yönetmeliğinde (2006/42/AT) belirtilen esaslar sağlanır. Sanayi tesislerinde kullanılan alet, ekipman ve makinelerin ses gücü seviyeleri ile ilgili düzenlemeleri Sanayi ve Ticaret Bakanlığının Teşkilat ve Görevleri Hakkında Kanun hükümleri uyarınca Sanayi ve Ticaret Bakanlığı yapar. Sanayi tesislerinde çalışanların kulak sağlık ve konforu açısından maruz kaldıkları gürültü ve titreşim seviyeleri için; 23/12/2003 tarihli ve 25325 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Gürültü Yönetmeliği ile 23/12/2003 tarihli ve 25325 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Titreşim Yönetmeliğinde belirtilen esaslar sağlanır.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

Çevresel Gürültü Esas ve Kriterleri

Çevresel gürültü göstergeleri ve bu göstergelerin uygulanması

MADDE 16 – (1) Çevresel gürültü göstergelerinin seçimine ve bu göstergelerin uygulanmasına ilişkin esaslar aşağıda belirtilmiştir:

- a) Gürültü haritaları ve bunların revizyonu çalışmalarında Ek-I-1.1.1 ve Ek-I-1.1.2’de belirtilen L_{gag} ve L_{gece} gürültü göstergeleri kullanılır.
- b) Akustik planlama, akustik gölge bölgeleme çalışmaları için L_{gag} ve L_{gece} gürültü göstergeleri dışında başka gürültü göstergeleri kullanılabilir.
- c) (a) ve (b) bentleri dışındaki özel durumlar için Ek-I-1.2’de listelenen ilave gürültü göstergeleri kullanılabilir.

Değerlendirme yöntemleri

MADDE 17 – (1) Çevresel gürültü seviyelerinin değerlendirilmesine ilişkin yöntemler aşağıda belirtilmiştir:

- a) Ek-I’de tanımlanan çevresel gürültü göstergeleri Ek-II’de belirtilen değerlendirme yöntemleri aracılığı ile belirlenir.
- b) Mevcut gürültü seviyesinin toplum üzerindeki etkilenme derecesi ve gürültünün günlük yaşamda çeşitli eylemler üzerinde olabilecek zararlı etkileri Ek-III’de verilen doz-etki ilişkisi kullanılarak tespit edilir. Doz-etki ilişkisine ait etkilenme analizine dair kılavuz Sağlık Bakanlığının uygun görüşü alınarak Bakanlıkça hazırlanır.

Kara yolu çevresel gürültü kriterleri

MADDE 18 – (1) Kara yolundan çevreye yayılan gürültü seviyesi ve gürültünün önlenmesine ilişkin sınır değerler Ek-VII Tablo-1’de belirtilmiştir. Karayollarından kaynaklanan çevresel gürültü seviyesi Ek-VII’de yer alan Tablo-1’deki sınır değerleri aşamaz.

Raylı sistem çevresel gürültü kriterleri

MADDE 19 – (1) Raylı sistemlerden kaynaklanan gürültü seviyesi ve gürültünün önlenmesine ilişkin kriterler aşağıda belirtilmiştir:

- a) Raylı ulaşım sistemlerinden çevreye yayılan gürültü seviyesi Lgündüz 65 dBA, Lakşam 60 dBA ve Lgece 55 dBA sınır değerlerini aşamaz.
- b) Hafif raylı sistemlerin yer altından geçtiği kapalı alanlar ile yer üstünden geçtiği alanlarda; bekleme, iniş ve biniş platformlarında, istasyonlarda ve havalandırma kanallarında zaman dilimine bağlı olarak oluşabilecek Leq cinsinden çevresel gürültü sınır değerleri Ek-VII’de yer alan Tablo-2’deki değerleri aşamaz.
- c) Hafif raylı sistemlerin yer altından geçtiği yerlerde istasyon boş iken 500 Hz’de maksimum çınlama süresi proje hedef değeri için 1.4, kabul değeri için ise 1.6 saniye olur. Kent içi ve dışında hafif raylı ulaşım sisteminin gürültüye hassas alanlardan geçtiği yerlerde gürültü perdeleme teknikleri dikkate alınarak etkin ve uygulanabilir tedbirler alınır.

Hava alanları çevresel gürültü kriterleri

MADDE 20 – (1) Hava alanlarından çevreye yayılan gürültü seviyesi ve gürültünün önlenmesine ilişkin kriterler aşağıda belirtilmiştir.

- a) Havaalanlarından çevreye yayılan gürültü seviyesi Ek-VII’de yer alan Tablo-3’te verilen sınır değerleri aşamaz.
- b) Ambulans helikopterleri hariç, helikopter iniş pistlerinden çevreye yayılan gürültü seviyesi Lgündüz 65 dBA, Lakşam 60 dBA ve Lgece 55 dBA sınır değerlerini aşamaz.
- c) Yılda elli binden fazla iniş/kalkışın yapıldığı hava alanlarında Ulaştırma Bakanlığı tarafından; havaalanı çevresinde çevresel gürültü seviyesini tespit etmek amacıyla gürültü ölçüm/kontrol/izleme sistemi kurulur.

ç) (Mülga:RG-18/11/2015-29536)

Su yolları için çevresel gürültü kriterleri

MADDE 21 – (1) İskele, liman ve benzeri yerler ile deniz, göl, boğaz, nehir gibi su yollarında kullanılan ulaşım araçlarından çevreye yayılan gürültü seviyesi aşağıda belirtilmiştir:

a) İskele, liman gibi yerler ile deniz, koy, göl, boğaz, nehir gibi suyollarında kullanılan ulaşım araçlarından yayılan çevresel gürültü seviyesi Gündüz 65 dBA, Akşam 60 dBA ve Gece 55 dBA sınır değerlerini aşamaz.

b) İskele, liman gibi yerler ile deniz, koy, göl, boğaz, nehir gibi suyollarında kullanılan araçlar ve bu araçlarda canlı müzik yayını yapılması sonucu yayılan toplam çevresel gürültü seviyesi bu maddede yer alan sınır değeri en fazla gündüz zaman dilimi için 5 dBA, akşam zaman dilimi için 3 dBA aşabilir, gece zaman dilimi için aşamaz.

İşletme, tesis ve işyerleri için çevresel gürültü kriterleri

MADDE 22 – (1) İşletme, tesis, atölye, imalathane ve işyerlerinden çevreye yayılan gürültü seviyesine ilişkin kriterler aşağıda belirtilmiştir:

a) Her bir işletme ve tesisten çevreye yayılan gürültü seviyesi Ek-VII'de yer alan Tablo-4'te verilen sınır değerleri aşamaz.

b) **(Değişik:RG-27/4/2011-27917)** Gürültüye hassas kullanımları etkileyebilecek şekilde yakınında, bitişiğinde, altında veya üstünde faaliyetini sürdüren; her bir işyeri, atölye, imalathane ve benzeri işletmelerden hava yoluyla çevreye yayılan veya ortak bölme elemanları, ara döşemeler, tavan veya bitişik duvarlar aracılığıyla gürültüye hassas kullanımlara iletilen çevresel gürültü seviyesi Leq gürültü göstergesi cinsinden arka plan gürültü seviyesini 5 dBA'dan fazla aşamaz.

c) Birden fazla işyeri, atölye, imalathane gibi işletmeler ile organize sanayi bölgesi veya küçük sanayi sitesinden çevreye yayılan toplam çevresel gürültü seviyesi Leq gürültü göstergesi cinsinden arka plan gürültü seviyesini 7-10 dBA aralığından fazla aşamaz. Bu aralık esas alınmak kaydıyla, toplam çevresel gürültü seviyesi; gürültüye maruz kalınan alandaki etkilenen kişi sayısı, gürültü kaynağı ile gürültüye hassas mekânlar arasındaki mesafe ve benzeri faktörler göz önünde bulundurularak İl Mahalli Çevre Kurulu Kararı ile belirlenir. Bu bentte verilen sınır değer aşıldığında, arka plan gürültü seviyesine katkısı olan her bir işyeri sınır değer aşımından eşit olarak sorumludur. Gürültüye katkı oranları belirlendikten sonra her bir işletme gerekli tedbirleri alır.

ç) İşletme, tesis, atölye, imalathane ve işyerlerinin faaliyeti sonucu oluşabilecek darbe gürültüsü LCmax gürültü göstergesi cinsinden 100 dBC'yi aşamaz.

Şantiye alanları için çevresel gürültü kriterleri

MADDE 23 – (1) Şantiye alanlarından çevreye yayılan gürültü seviyesi ve gürültünün önlenmesine ilişkin kriterler aşağıda belirtilmiştir:

- a) Şantiye alanındaki faaliyet türlerinden çevreye yayılan gürültü seviyesi Ek-VII’de yer alan Tablo-5’te verilen sınır değerleri aşamaz.
- b) Konut bölgeleri içinde ve yakın çevresinde gerçekleştirilen şantiye faaliyetleri gündüz zaman dilimi dışında akşam ve gece zaman dilimlerinde sürdürülemez.
- c) Haftasonu ve resmî tatil günlerinde gerçekleştirilecek şantiye faaliyetlerine, konut bölgeleri ve yakın çevresinden gelen şikayetlerin yoğunluğu dikkate alınarak, İl Mahalli Çevre Kurulu Kararı ile yasaklama getirilebilir.
- ç) Kamu yararı gerektiren baraj, köprü, tünel, otoyol, şehir içi anayol, toplu konut gibi projelerin inşaat faaliyetleri ile şehir içinde gündüz trafiği engelleyecek inşaat faaliyetleri gündüz zaman diliminde çalışmamak koşuluyla Ek-VII’de yer alan Tablo-5’teki gündüz değerlerinden akşam için 5 dBA, gece için 10 dBA çıkartılarak elde edilen sınır değerlerin sağlanması ve bu kapsamda alınacak İl Mahalli Çevre Kurulu Kararı ile sürdürülebilir.
- d) Şantiye faaliyeti sonucu oluşabilecek darbe gürültüsü, LCmax gürültü göstergesi cinsinden 100 dBC’yi aşamaz.
- e) Faaliyet sahibi tarafından şantiye alanında; inşaatın başlama, bitiş tarihleri ve çalışma periyotları ile büyükşehir belediyesi veya il/ilçe belediyesinden alınan izinlere ilişkin bilgiler inşaat alanında herkesin kolayca görebileceği bir tabelada gösterilir.
- f) Tatil beldelerinde ve turistik alanlarda gerçekleştirilen tüm şantiye faaliyetleri büyükşehir belediyesi ve/veya il/ilçe belediyesinin kararı doğrultusunda hafta sonları veya bir kaç ay süre ile tamamen durdurulabilir.

Eğlence yerlerine ilişkin esaslar

MADDE 24 – (Başlığı ile birlikte değişik:RG-27/4/2011-27917)

(1) Müzik yayını yapan eğlence yerlerinden kaynaklanan çevresel gürültünün önlenmesine ilişkin esaslar aşağıda belirtilmiştir:

a) (Mülga:RG-18/11/2015-29536)

- b) Etkilenen yapı ile bitişik nizamda olan eğlence yerinden/yerlerinden kaynaklanan çevresel gürültü, Leq gürültü göstergesi cinsinden etkilenen yapı içindeki arka plan gürültü seviyesi değerini aşamaz.

c) Etkilenen yapı ile bitişik nizamda olmayan eğlence yerinden kaynaklanan çevresel gürültü, Leq gürültü göstergesi cinsinden arka plan gürültü seviyesini 5 dBA'dan ve 7 dBC'den daha fazla aşamaz.

ç) **(Değişik:RG-18/11/2015-29536)** Birden fazla eğlence yerinden gürültüye hassas kullanımlara iletilen toplam çevresel gürültü seviyesi, Leq gürültü göstergesi cinsinden arka plan gürültü seviyesini 7-10 dBA ve 9-12 dBC aralığından fazla aşamaz. Bu aralık esas alınmak kaydıyla, toplam çevresel gürültü seviyesi, gürültüye maruz kalınan alandaki etkilenen kişi sayısı, gürültü kaynağı ile gürültüye hassas kullanımlar arasındaki mesafe gibi faktörler göz önünde bulundurularak İl Mahalli Çevre Kurulu Kararı ile belirlenir. Bu bentte verilen sınır değer aşılması halinde, arka plan gürültü seviyesine katkısı olan her bir işletme sınır değer aşımından eşit olarak sorumludur. Gürültüye katkı oranlarına göre her bir işletme ve tesis gerekli tedbirleri alır.

d) **(Değişik:RG-18/11/2015-29536)** Çok hassas ve hassas kullanımların bulunduğu alanlarda faaliyet gösteren açık ve yarı açık eğlence yerlerinde, 24:00-07:00 saatleri arasında canlı müzik yayını yapılması yasaktır. Yörenin özelliğine bağlı olarak gerekli görülmesi halinde, canlı müzik yayınının yapılacağı zaman dilimleri İl Mahalli Çevre Kurulu Kararı ile yeniden düzenlenebilir. Diğer saatlerde ise (b) ve/veya (c) ve/veya (ç) bentlerinde belirtilen sınır değerleri sağlayacak şekilde faaliyetlerini sürdürür.

e) **(Değişik:RG-18/11/2015-29536)** Çok hassas ve hassas kullanımların bulunduğu yerlerde faaliyet gösteren açık ve yarı açık eğlence yerlerinin, yapılan denetimlerde (b) ve/veya (c) ve/veya (ç) bentlerinde belirtilen sınır değerleri bir yıl içinde üç defa sağlamadığının tespiti halinde, fiziki olarak tamamen kapalı hale getirilir.

f) Fiziki olarak tamamen kapalı bir mekanda faaliyet gösteren eğlence yerlerinden çevreye yayılan gürültü seviyesi, (b) ve/veya (c) ve/veya (ç) bentlerinde belirtilen sınır değerleri sağlayacak şekilde faaliyetlerini sürdürür.

g) Az hassas ve hassas olmayan kullanımların bulunduğu alanlarda açık ve yarı açık olarak faaliyet gösteren eğlence yerlerinden çevreye yayılan çevresel gürültü seviyesi, (b) ve/veya (c) ve/veya (ç) bentlerinde belirtilen sınır değerleri sağlayacak şekilde faaliyetlerini sürdürür.

ğ) Bu madde kapsamında canlı müzik yapabilecek eğlence yeri veya yerlerinin 14/7/2005 tarihli ve 2005/9207 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile yürürlüğe konulan İşyeri Açma ve Çalışma Ruhsatlarına İlişkin Yönetmelik hükümlerine göre canlı müzik izni alması şarttır. Bu izin verilirken yetkili idarenin bu maddede belirtilen esaslara ilişkin uygun görüşü alınır, gerekli görüldüğü takdirde yetkili idare Çevresel Gürültü Seviyesi Değerlendirme Raporu hazırlar ve rapora ilişkin yetkili idarenin uygun görüşü esas alınır.

h) Bu maddede belirtilen esasların sağlanıp sağlanmadığı, yetkili idarenin belirleyeceği sürelerde sunulacak Çevresel Gürültü Seviyesi Değerlendirme Raporu ve/veya yetkili idare koordinasyonunda diğer mevzuat kapsamında yetkili kılınan kurum ve kuruluşlar ile işbirliği içinde yapılacak denetimler çerçevesinde kontrol edilir. Bu maddede belirtilen sınırların sağlanmadığı durumlarda iç mekanda ses seviyesini kontrol altında tutan sistemler kurdurulabilir.

ı) Birden fazla eğlence yerinin bulunduğu alanlarda, yetkili idare tarafından gerekli görülmesi halinde yukarıda sıralanan esasların dışında ayrıca çevresel gürültü seviyesinin kontrol altına alınması amacıyla periyodik olarak veya gerekli görülmesi halinde gürültü seviyesinin sürekli ölçülmesine yönelik sistem kurulur veya kurdurulur.

i) Kapalı eğlence yerlerinin dış giriş kapılarının üzerine "Dikkat: İçerideki ses seviyesi insan sağlığına zararlıdır." şeklinde ışıklı ikaz levhalarının asılması zorunludur.

j) Bu maddede belirtilen eğlence yerlerinde gürültüden etkilenme seviyesinin işitme sağlığı ve kritik sağlık etkilerinin değerlendirilmesi ve izlenmesi, 8 inci maddenin birinci fıkrasının (a) bendi çerçevesinde yapılır.

k) **(Ek:RG-18/11/2015-29536)** Canlı müzik izni alınmadan hiçbir suretle müzik faaliyeti gerçekleştirilemez.

BEŞİNCİ BÖLÜM

Çevresel Titreşim Esas ve Kriterleri

Yapılarda çevresel titreşim kriterleri

MADDE 25 - (Değişik:RG-27/4/2011-27917)

(1) Çeşitli titreşim kaynaklarının sebep olacağı çevresel titreşimin kontrol altına alınmasına ilişkin esaslar aşağıda belirtilmiştir:

a) Maden ve taş ocakları ile benzeri faaliyette bulunan alanlardaki patlatmaların çevredeki çok hassas ve hassas kullanımlarda oluşturduğu zemin titreşim seviyesi Ek-VII'de yer alan Tablo-6'da verilen sınır değerleri aşamaz.

b) İnşaatlarda kazık çakma gibi titreşim oluşturacak uygulamalar ile ağır inşaat makinelerinin sebep olacağı titreşimlerin çevrelerindeki çok hassas ve hassas kullanımlarda oluşturacağı titreşim seviyesi Ek-VII'de yer alan Tablo-7'de verilen sınır değerleri aşamaz.

c) Konut ve ofis olarak kullanılan binalarda, elektrik motoru, pompa, fan gibi makine ve teçhizatın sebep olacağı titreşimler Ek-VII'de yer alan Tablo-8 de verilen sınır değerleri aşamaz. Bu değerlerin üzerinde titreşim oluşturan makine ve teçhizat için, başta titreşim yalıtımı olmak üzere gerekli teknik tedbirler alınarak, binada ölçülen titreşimler sınır değerlerin altına indirilir. Çok hassas ve hassas kullanımların yakınında bulunan demir yolu ve kara yolu ulaşım araçları ile işletme ve tesislerin çok hassas ve hassas kullanımlarda yaratacağı titreşimler için de bu sınır değerler kullanılır.

ALTINCI BÖLÜM

Gürültüye Hassas Kullanımların Bulunduğu Alanlar İçin Esas ve Kriterler

Gürültüye hassas kullanımlar için gürültü kontrolü

MADDE 26 – (1) Gürültüye hassas kullanımlardaki çevresel gürültü esasları aşağıda belirtilmiştir.

- a) **(Değişik:RG-18/11/2015-29536)** Mevcut yapılarda, yapı içinde veya dışında herhangi bir yerde bulunan soğutma fanı, klima gibi kaynaklardan; ortak bölme elemanları, ara döşemeler, tavan ve bitişik duvarlar veya hava aracılığıyla gürültüye hassas kullanımlara iletilen gürültü seviyesi Leq gürültü göstergesi cinsinden arka plan gürültü seviyesini 5 dBA'dan fazla aşamaz.
- b) Dini tesislerde ses yükseltici kullanımından çevreye yayılan sesin kontrolüne ilişkin düzenlemeler 8 inci maddenin birinci fıkrasının (b) bendi çerçevesinde yapılır.
- c) Susturucu veya ses giderici diğer parçaları olmadan bir motorlu kara taşıtı çalıştırılmaz veya çalışmasına sebep olunmaz, bakım onarım veya diğer değiştirme amacı dışında bir motorlu araç veya motosiklet üzerindeki susturucu veya ses giderici parça çıkarılmaz, çalışamaz hale getirilemez, Motorlu Araçların Sesli İkaz Cihazları ve Bunların Takılması ile İlgili Tip Onayı Yönetmeliğine uyulur, tip onayı verilen sesli ikaz cihazlarında (korna) değişiklik yapılamaz.
- ç) Bir motorlu araç üzerinde veya içinde; korna veya ses çıkaran başka bir cihazın zorunlu haller dışında gürültü rahatsızlığına neden olacak şekilde çalınması yasaktır.
- d) **(Değişik:RG-27/4/2011-27917)** Radyo, televizyon, müzik seti ve her türlü müzik aletlerini gürültüye hassas kullanımların bulunduğu alanlar ile toplu taşıma araçlarında çalmak yasaktır.
- e) **(Değişik:RG-18/11/2015-29536)** Gürültüye hassas kullanımların bulunduğu alanlarda; yüksek sesle konuşarak, bağırarak, anons sistemleri gibi ses yükseltici araçlar kullanılarak ve darbeli düzenli veya düzensiz sesler çıkararak reklam, duyuru, tanıtım ve satış yapmak yasaktır.

f) **(Değişik:RG-27/4/2011-27917)** Çok hassas ve hassas kullanımların bulunduğu alanlarda; deniz motoru, motosiklet veya herhangi bir motorlu araçta 19.00-07.00 saatleri arasında deneme çalışmaları yapmak yasaktır.

g) **(Mülga:RG-18/11/2015-29536)**

ğ) **(Değişik:RG-18/11/2015-29536)** Dini ve milli bayramlar ile yerel milli günler ve il genelinde yapılan festival gibi büyük kutlamalar dışında; eğlence maksadıyla patlayıcı, maytap, havai fişek ve benzeri şeyleri kullanmak, ateşlemek gibi benzeri faaliyetlerin, çok hassas ve hassas kullanımların bulunduğu yerlerde yapılması yasaktır. Bu faaliyetler az hassas kullanımların bulunduğu yerlerde ancak 14/8/1987 tarihli ve 87/12028 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile yürürlüğe konulan Tekel Dışı Bırakılan Patlayıcı Maddelerle Av Malzemesi ve Benzerlerinin Üretimi, İthali, Taşınması, Saklanması, Depolanması, Satışı, Kullanılması, Yok Edilmesi, Denetlenmesi Usul ve Esaslarına İlişkin Tüzüğün 117 nci maddesine istinaden yerel mülki amirinden izin alınarak yapılabilir.

h) Siren, düdük veya benzeri acil ve olağanüstü durum sinyal aletlerinin acil ve olağanüstü durum dışında kisten çalıştırılmaları veya çalıştırılmasına izin verilmesi yasaktır. Olağanüstü durum sinyallerinin denenmesi saat 10.00'dan önce ve 20.00'den sonra olmamak şartıyla uygulanır.

ı) **(Değişik:RG-18/11/2015-29536)** Çok hassas kullanımların bulunduğu alanlarda konser, gösteri, miting, festival gibi açık hava faaliyetlerinin 24:00-07:00 saatleri arasında yapılması yasaktır. Yörenin özelliğine bağlı olarak gerekli görülmesi halinde, bu maddede belirtilen açık hava faaliyetlerinin yapılacağı zaman dilimi çevre ve şehircilik il müdürlüğü veya yetki devri yapılmış ilgili belediye başkanlığı tarafından yeniden düzenlenebilir.

i) **(Değişik:RG-27/4/2011-27917)** İşyeri Açma ve Çalışma Ruhsatlarına İlişkin Yönetmelikte yer almayan ve gürültü rahatsızlığına sebep olan poligonlar gibi yerlerin, 7/3/2008 tarihinden itibaren çok hassas ve hassas kullanımların bulunduğu alanlarda kurulması yasaktır.

YEDİNCİ BÖLÜM

Planlama Aşamasında Temel Kriterler

Gürültüye maruz kalma kategorileri

MADDE 27 - (1) Yeni konut alanlarının planlanması aşamasında aşağıda verilen gürültüye maruz kalma kategorileri dikkate alınır:

a) Kategori A (Lgündüz cinsinden <55 dBA) Alanı: Bu kategorinin en üst seviyesindeki gürültü rahatsızlık verici derecede değildir. Planlama kararı verilirken gürültü belirleyici bir faktör olarak değerlendirilmeye alınmaz.

b) Kategori B (Lgündüz cinsinden 55- 64 dBA) Alanı: Planlama kararlarında gürültü seviyesi göz önüne alınır. Gürültüye karşı gerekli tedbirler alınarak planlama kararları verilir.

c) Kategori C (Lgündüz cinsinden 65-74 dBA) Alanı: Planlama kararı genellikle verilmez. Ancak kamu yararı gerektiren hallerde, daha sessiz bir yer bulunamaması nedeniyle izin verilmek zorunda kalınması halinde arka plan gürültü seviyesi göz önünde bulundurularak gürültüye karşı tedbirler alınır.

ç) Kategori D (Lgündüz cinsinden >74 dBA) Alanı: Planlama kararı verilmez.

Planlama aşamasında uyulması zorunlu kriterler

MADDE 28 – (1) Planlama aşamasındaki faaliyetler için uyulması zorunlu kriterler aşağıda belirtilmiştir:

a) 7/3/2008 tarihinden sonra inşa edilmiş ve bu Yönetmeliğin yayım tarihinden sonra inşa edilecek yapıların mimari projelerinde, yapı tiplerine bağlı olarak Ek-VII’de yer alan Tablo-9’da verilen sınır değerlerin sağlanması zorunludur.

b) Planlama aşamasında; ulaşım, işletme, tesis, eğlence yeri, imalathane, atölye, işyeri gibi planlanan faaliyetler 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 ve 25 inci maddede verilen esas ve kriterlere göre değerlendirilir. Uygun olmayan durum varsa faaliyete izin verilmez.

c) Nazım İmar Planları ve Uygulama İmar Planlarının hazırlanması aşamasında 27 nci maddede öngörülen gürültüye maruz kalma kategorileri dikkate alınır.

ç) Çevre Düzeni Planları, Nazım İmar Planları ve Uygulama İmar Planlarının hazırlanması aşamasında alanda akustik planlamanın yapılabilmesi ve yerleşim alanları içindeki sakin alan ve açık arazideki sakin alanların oluşturulması için gürültü haritaları ve eylem planlarının plan eki olarak istenmesi ve plan kararlarına esas olması zorunludur.

d) **(Değişik:RG-27/4/2011-27917)** Çok hassas ve hassas kullanımların bulunduğu yerlerde daha sakin çevre oluşturabilmek amacıyla ilgili kurum kuruluşların da görüşü alınarak belediye sınırları ve mücavir alan içinde belediye, belediye sınırları ve mücavir alan dışında ise yetki devri yapılan il özel idarelerince; yetki devri yapılmadığı takdirde il çevre ve orman müdürlüğünce ek sınırlayıcı tedbirler alınabilir. Bu çerçevede; bölgede kurulacak yeni bir gürültü kaynağında çevresel gürültü seviyesi ile ilgili geçici veya sürekli sınırlandırma kararları alınabilir veya yeni işletmenin bu bölge içinde kurulmasına izin verilmeyebilir.

SEKİZİNCİ BÖLÜM

Stratejik Gürültü Haritalama Esas ve Kriterleri

Stratejik gürültü haritalama esasları

MADDE 29 - (1) a) (Değişik:RG-18/11/2015-29536) En geç 31/12/2016 tarihine kadar;

- 1) İki yüz elli binden fazla yerleşik nüfusu olan yerleşim alanları,
- 2) Yılda altı milyondan fazla aracın geçtiği ana kara yolları,
- 3) Yılda altmış binden fazla trenin geçtiği ana demir yolları,
- 4) Yılda elli binden fazla hareketin gerçekleştiği ana hava alanları,

için bir önceki takvim yılındaki durumu gösteren stratejik gürültü haritaları hazırlanır.

b) En geç 30/6/2011 tarihine kadar ve daha sonra her beş yılda bir stratejik gürültü haritası hazırlanması zorunlu olan; yılda altı milyondan fazla aracın geçtiği ana kara yolları, yılda altmış binden fazla sayıda trenin geçtiği ana demir yolları, ana hava alanları ve iki yüz elli binden fazla yerleşik nüfusu olan yerleşim alanları Bakanlığa bildirilir.

c) 30/6/2018 tarihine kadar ve bu tarihten sonra her beş yılda bir;

- 1) Yüz binden fazla yerleşik nüfusu olan yerleşim alanları,
- 2) Yılda üç milyondan fazla aracın geçtiği ana kara yolları,
- 3) Yılda otuz binden fazla trenin geçtiği ana demir yolları

için bir önceki yıldaki durumu gösteren stratejik gürültü haritaları hazırlanır.

ç) En geç 30/6/2014 tarihine kadar ve daha sonra her beş yılda bir stratejik gürültü haritası hazırlanması zorunlu olan; yılda üç milyondan fazla aracın geçtiği ana kara yolları, yılda otuz binden fazla sayıda trenin geçtiği ana demir yolları ve yüz binden fazla yerleşik nüfusu olan yerleşim alanları Bakanlığa bildirilir.

d) Stratejik gürültü haritaları Ek-IV'te yer alan stratejik gürültü haritalama için asgari gereksinimleri karşılayacak nitelikte hazırlanır.

e) Komşu konumda olan ülkelerin sınırlarına yakın bölgelerin stratejik gürültü haritalarının hazırlanmasında, Dışişleri Bakanlığı koordinasyonunda işbirliği yoluna gidilir.

f) Stratejik gürültü haritaları hazırlandıkları tarihten sonra en az beş yılda bir gözden geçirilir ve gerektiğinde revize edilir.

g) Bu maddenin birinci fıkrasının (a) bendinin (1) numaralı alt bendi ile (c) bendinin (1) numaralı alt bendinde verilen yerleşim alanları için hazırlanacak gürültü haritaları; kara yolu, demir yolu, hava yolu trafik gürültüsü ile limanlar, sanayi alanları, atölye-imalathane-eğlence yerleri ve benzeri işletmelerin bulunduğu alanlar için ayrı ayrı yapılır.

DOKUZUNCU BÖLÜM

Eylem Planları

Eylem planları hazırlama esasları

MADDE 30 – (1) Eylem Planlarına ilişkin esaslar aşağıda belirtilmiştir:

a) **(Değişik:RG-18/11/2015-29536)** Gerektiğinde en geç 31/12/2017 tarihine kadar;

1) Yılda altı milyondan fazla aracın geçtiği ana kara yolları, yılda altmış binden fazla trenin geçtiği ana demir yolları, ana hava limanları ve yakınındaki yerler,

2) İki yüz elli binden fazla yerleşik nüfusu olan yerleşim alanları,

için gürültü seviyesinin azaltılması da dâhil olmak üzere gürültü ile ilgili hususlar ve gürültünün etkileri ile baş etmeye yönelik eylem planlarının hazırlanmış olması gerekir. Eylem planları dâhilindeki tedbirler yetkili idarenin insiyatifi altındadır. Ancak, bu Yönetmelikte verilen sınır değerlerin aşıldığı durumlar ya da yetkili idarelerce seçilen diğer kriterler olarak tanımlanan öncelikler eylem planında özellikle belirtilir ve stratejik gürültü haritalamaları ile tespit edilen önemli bölgelerde uygulanır.

b) En geç 18/7/2019 tarihine kadar;

1) Yılda üç milyondan fazla aracın geçtiği ana kara yolları, yılda otuz binden fazla trenin geçtiği ana demir yolları ve yakınındaki yerler,

2) Yüz binden fazla yerleşik nüfusu olan yerleşim alanları

için, bu Yönetmelikte verilen sınır değerlerin aşılması durumu ya da yetkili idarelerce seçilen diğer kriterler olarak tanımlanan önceliklere belirgin bir şekilde yer veren eylem planlarının hazırlanmış olması temin edilir.

c) (a) ve (b) bentlerinde belirtilen kriterler hakkında yetkili idarelerce Bakanlığa bilgi verilir.

ç) Eylem planları Ek-V'te verilen eylem planları için asgari gereksinimleri karşılayacak şekilde hazırlanır.

d) Mevcut gürültü durumunu etkileyen çok önemli bir değişikliğin meydana gelmesi üzerine ve hazırlandıkları tarihten itibaren en az beş yılda bir eylem planları gözden geçirilir ve gerekiyorsa revize edilir.

e) Komşu konumda olan ülkelerin sınırlarına yakın bölgeler için eylem planlarının hazırlanmasında, Dışişleri Bakanlığı koordinasyonunda işbirliği yoluna gidilir.

f) Eylem planlarının hazırlanma ve gözden geçirilmesine katılım için önceden ve etkili fırsatların verilmiş olması şartıyla, eylem planlarını hazırlamakla sorumlu kurum ve kuruluşlarca eylem planlarının kamuoyuna danışılması, bu katılım sonuçlarının dikkate alınması ve kamuoyunun alınan karar konusunda bilgilendirilmesi temin edilir. Bu bilgiler kolay ulaşılabilir ve tam anlaşılır şekilde sunulur. Bilgilerin en önemli noktalarını özetleyen bir metin yurt çapında yayın yapan yüksek tirajlı en az bir gazete ile mahalli gazetede ilan edilir. Eylem planları ile ilgili dokümanlar ilanın yayımından itibaren dört ay süreyle kamuoyunun kullanımına açık tutulur. Bu süre içerisinde eylem planları ile ilgili görüşler yazılı olarak eylem planlarını hazırlayan kurum ve kuruluşlara verilir. Bu süreden sonra yapılacak itirazlar kişisel haklarla ilgili değilse dikkate alınmaz.

ONUNCU BÖLÜM

Kamuoyunu Bilgilendirme, Verilerin Toplanması ve Raporlama

Kamuoyunu bilgilendirme

MADDE 31 – (1) Kamuoyunun bilgilendirilmesine yönelik esaslar aşağıda belirtilmiştir:

a) 29 uncu ve 30 uncu maddelere istinaden Ek-IV ve Ek-V'de yer alan esaslar çerçevesinde yapılan stratejik gürültü haritaları ve eylem planları 9/10/2003 tarihli ve 4982 sayılı Bilgi Edinme Hakkı Kanunu uyarınca kamuoyunun ulaşımına açık tutulur ve bilgi teknolojilerinden de yararlanılarak yayımlanır.

b) Stratejik gürültü haritaları ve eylem planlarına yönelik bilgiler açık, tam anlaşılabilir, kolay ulaşılabilir şekilde sunulur. Bilgilerin en önemli noktalarını özetleyen bir metin yurt çapında yayın yapan yüksek tirajlı en az bir gazete ile mahalli gazetede veya internet sayfasında ilan edilir.

Verilerin Bakanlık tarafından toplanması ve yararlanması

MADDE 32 – (1) Stratejik gürültü haritaları ve eylem planlarına ilişkin verilerin Bakanlık tarafından toplanması ve yararlanıcıların kullanımının sağlanmasına yönelik esaslar aşağıda belirtilmiştir.

a) Ek-VI'da belirtildiği gibi 29 uncu ve 30 uncu maddelerde belirtilen tarihlerden itibaren en geç altı ay içinde stratejik gürültü haritalarından alınan bilgiler ile eylem planlarının özetleri Bakanlığa gönderilir.

b) Bakanlık; kurumlar arasında teknik ve bilgi sağlayıcı nitelik taşıyan işleri kolaylaştırmak için stratejik gürültü haritalarındaki bilgiler ile ilgili bir veri bankası kurar.

c) Bakanlık, beş yılda bir stratejik gürültü haritaları ve eylem planlarındaki bilgileri özetleyen bir raporu hazırlayarak ilgili kurum ve kuruluşların kullanımına açar. İlk rapor 18/6/2015 tarihine kadar hazırlanır.

ONBİRİNCİ BÖLÜM

İşletmeler, Tesisler ve İşyerlerinin Çevresel Gürültü Yönünden Değerlendirilmesi

Çevre izni veya çevre izin ve lisans belgesine tabi işletme ve tesislerde çevresel gürültüye yönelik değerlendirme

MADDE 33 – (1) Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sinde belirtilen işletme ve tesisler için çevre izni ve çevre izin ve lisans belgesine esas olacak kriterler aşağıda belirtilmiştir.

a) Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sinde belirtilen işletme ve tesislerin çevre izni veya çevre izin ve lisans belgesi işlemleri Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmelik hükümleri çerçevesinde yürütülür.

b) Çevresel gürültü, 36 ncı maddenin birinci fıkrasının (a) bendi ile aynı maddenin ikinci fıkrası çerçevesinde uzmanlık deneyimine sahip ve Bakanlıktan ön yeterlik/yeterlik belgesi almış kurum veya kuruluşlarca hazırlanacak akustik rapora istinaden değerlendirilir.

c) Çevre izni veya çevre izin ve lisans belgesine tabi tesisler için hazırlanacak akustik rapor formatı ile açıklayıcı dokümanlar Bakanlıkça belirlenerek yayımlanır.

ç) **(Değişik:RG-27/4/2011-27917)** Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sinde “ * ” işareti ile muafiyet getirilmiş işletme ve tesisler ile çevre izni veya çevre izin ve lisans belgesi alması gereken işletme ve tesislerden; 7/3/2008 tarihinden önce kurulmuş ve açılma ve çalışma ruhsatı almış olanlar ile kurulduğu tarih ve ruhsatı olup olmadığına bakılmaksızın, çok hassas ve hassas kullanımlardan itibaren en az 500 metre mesafede olan veya bu Yönetmelik çerçevesinde gürültü haritaları hazırlanması gereken yerleşim yerleri dışında bulunan işletme ve tesisler için çevre izni veya çevre izin ve lisans belgesine esas değerlendirme yapılmaz.

Ancak, yetkili idarenin talep etmesi halinde işletme ve tesisler için akustik rapor hazırlanması zorunludur.

d) (ç) bendinde belirtilen çevre izin ve lisans belgesinden muaf olacak işletme ve tesisler için il çevre ve orman müdürlüğünün görüşü alınır.

Açma ve çalışma ruhsatı

MADDE 34 – (1) Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sinde yer alan işletme ve tesisler için işyeri açma ve çalışma ruhsatı verilmesi aşamasındaki iş ve işlemler; İşyeri Açma ve Çalışma Ruhsatlarına İlişkin Yönetmelik ile Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmelik hükümleri çerçevesinde yürütülür.

(2) **(Değişik:RG-27/4/2011-27917)** Çok hassas ve hassas kullanımları etkileyebilecek şekilde yakınında, bitişiğinde, altında, üstünde bulunan ve Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sinde yer almayan işletme, tesis, işyeri, imalathane, atölye gibi yerler için, İşyeri Açma ve Çalışma Ruhsatlarına İlişkin Yönetmelik kapsamında verilecek açma ve çalışma ruhsatlarında yetkili idare tarafından çevresel gürültü yönünden değerlendirme yapılır, gerektiğinde çevresel gürültü seviyesi değerlendirme raporu talep edilir ve bu rapora ilişkin yetkili idarenin uygun görüşü esas alınır.

Planlanan işletmelerde çevresel gürültü seviyesi değerlendirme prosedürü

MADDE 35 – (1) Planlanan işletmelerde çevresel gürültü seviyesi değerlendirilirken; Çevresel Etki Değerlendirme Yönetmeliğinin Ek-I listesinde bulunan ve Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sinde yer alan “ * ” işareti bulunmayan tesis ve faaliyetler ile ulaşım kaynakları için hazırlanacak çevresel etki değerlendirme raporunun gürültü ile ilgili bölümünün, kapasite artırımını hariç, Bakanlıkça belirlenecek format içeriğinde hazırlanması gerekmektedir.

ONİKİNCİ BÖLÜM

Rapor, Harita ve Eylem Planı Hazırlayacaklarda Değerlendirme Kriterleri

Uzmanlık deneyimine yönelik esas ve kriterler

MADDE 36 – (1) Uzmanlık deneyimine ilişkin esas ve kriterler aşağıda belirtilmiştir:

a) Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sinde yer alan işletme ve tesisler için bu Yönetmelikte belirtilen akustik raporları hazırlayacak kişilerin

üniversitelerin mühendislik, mimarlık ve fen fakültelerinden mezun ve bu çalışmalarını yürütecek seviyede uzmanlığa sahip olması,

b) Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sinde yer almayan işletme ve tesisler, imalathane, atölye, işyeri, eğlence yeri ve benzeri için çevresel gürültü seviyesi değerlendirme raporu hazırlayacak kişilerin üniversitelerin mühendislik, mimarlık ve fen fakültelerinden mezun ve bu çalışmalarını yürütecek seviyede uzmanlığa sahip olması,

c) Çevresel Etki Değerlendirme sürecinde, çevresel gürültü konusunda değerlendirme ve arka plan gürültü seviyesi ölçümü yapacak kişilerin üniversitelerin mühendislik, mimarlık ve fen fakültelerinden mezun ve bu çalışmalarını yürütecek seviyede uzmanlığa sahip olması,

ç) 29 uncu maddeye istinaden gürültü haritası hazırlayacak kişilerin üniversitelerin mühendislik, mimarlık ve fen fakültelerinden mezun ve bu çalışmalarını yürütecek seviyede uzmanlığa sahip olması, tercihen ulusal veya uluslararası projeler bazında ve benzeri çalışmalarda gürültü haritası hazırlanmasına katılım sağlamış olması,

d) 30 uncu maddeye istinaden eylem planı hazırlayacaklar ve 28 inci maddenin birinci fıkrasının (a) bendi gereği yapı akustiği konusunda değerlendirme yapacak kişilerin üniversitelerin mühendislik, mimarlık ve fen fakültelerinden mezun ve bu çalışmalarını yürütecek seviyede uzmanlığa sahip olması, tercihen yalıtım, trafik planlaması, arazi planlaması, gürültü bariyeri ve benzeri konularda uygulama projesi yapmış olması,

e) 25 inci maddeye göre değerlendirme yapacakların, üniversitelerin mühendislik, mimarlık ve fen fakültelerinden mezun ve bu çalışmalarını yürütecek seviyede uzmanlığa sahip olması

zorunludur.

(2) Birinci fıkranın (a), (b), (c), (ç), (d) ve (e) bentlerinin her biri için istenecek uzmanlığa yönelik esaslar Bakanlıkça belirlenir.

(3) Bakanlıkça hazırlanan ve duyurulan uzmanlığa yönelik konularda teorik veya uygulamalı çalışmalar yapmış öğretim görevlileri ile bu konularda yüksek lisans ve doktora programlarını tamamlamış kişiler de birinci fıkrada belirtilen çalışmalarını yürütecek seviyede uzman olarak değerlendirilir.

Ölçüm ve hesaplamalara yönelik yeterlik şartları

MADDE 37 – (1) Ölçüm ve hesaplamalara yönelik yeterlik şartları aşağıda belirtilmiştir:

- a) Çevre izni veya çevre izin ve lisans belgesine tabi olan işletme ve tesisler için akustik raporu hazırlayacaklar; Ek-II-2.1'deki işletmeler için verilen ölçüm ve hesaplama ile ilgili standartlara göre Bakanlıktan alınan ön yeterlik/yeterlik belgesine,
- b) Çevre izni veya çevre izin ve lisans belgesine tabi olmayan işletme ve tesisler, imalathane, atölye, işyeri, eğlence yeri ve benzeri işletmelerden kaynaklanan çevresel gürültü seviyesinin değerlendirilmesine yönelik çevresel gürültü seviyesi değerlendirme raporu hazırlayacaklar; Ek-II-3'te izne tabi olmayan tesisler için verilen ölçüm ve hesaplama ile ilgili standartlara göre Bakanlıktan alınan ön yeterlik/yeterlik belgesine,
- c) Çevresel etki değerlendirme sürecinde arka plan gürültü seviyesi ölçümü yapacaklar; Ek-II-2.2'de verilen ölçüm standartlarına göre Bakanlıktan alınan ön yeterlik/yeterlik belgesine,
- ç) Ulaşım ve yerleşim alanları için gürültü haritası hazırlayacaklar; Ek-II-1.1'de gürültü haritası hazırlanması için verilen hesaplama ile ilgili lisanslı yazılım programına,
- d) Yerleşim alanı ve ulaşım kaynakları ve yakınındaki yerler için eylem planı hazırlayacaklar ile yapılarda yalıtım değerlendirmesi çalışması yapacaklar; Ek-II-4'te verilen standartlara göre Bakanlıktan alınan ön yeterlik/yeterlik belgesine ve hesaplama yöntemlerine veya buna ilişkin yazılım programına,
- e) Ek-II-5'teki çevresel titreşim seviyesi için değerlendirme yöntemlerini kullanacaklar Bakanlıktan alınan ön yeterlik/yeterlik belgesine

sahip olmak zorundadır.

(2) Bakanlık ön yeterlik/yeterlik belgesi verdiği kurum/kuruluşların listesini ve listedeki iptal ve değişiklik bilgilerini kendi internet sitesinde yayınlamalıdır.

Rapor, harita ve eylem planı hazırlayacaklarda aranan esas ve kriterler

MADDE 38 – (1) Rapor, harita ve eylem planı hazırlayacakların;

- a) Çevre Kanununda Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sinde yer alan işletme ve tesisler için çevre izni veya çevre izin ve lisans belgesine esas akustik raporu hazırlayacakların 36 ncı maddesinin birinci fıkrasının (a) bendi ile 37 nci maddesinin birinci fıkrasının (a) bendinde getirilen şartları,
- b) Çevre Kanununda Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sinde yer almayan işletme ve tesisler, imalathane, atölye, işyeri, eğlence yeri ve benzeri için çevresel gürültü

seviyesi değerlendirme raporu hazırlayacakların 36 ncı maddenin birinci fıkrasının (b) bendi ile 37 nci maddenin birinci fıkrasının (b) bendinde getirilen şartları,

c) Çevresel Etki Değerlendirme Yönetmeliğinin Ek-1 listesinde ve Çevre Kanununca Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmeliğin Ek-1 ve Ek-2'sinde yer alan işletmeler ile ulaşım kaynakları için çevresel etki değerlendirme sürecinde planlanan işletmeler için akustik raporu hazırlayacakların 36 ncı maddenin birinci fıkrasının (c) bendi ile 37 nci maddenin birinci fıkrasının (c) bendinde getirilen şartları,

ç) Bu Yönetmelik çerçevesinde ulaşım sektörü ve yerleşim alanları için gürültü haritası hazırlayacakların 36 ncı maddenin birinci fıkrasının (ç) bendi ile 37 nci maddenin birinci fıkrasının (ç) bendinde getirilen şartları,

d) Bu Yönetmelik çerçevesinde yerleşim alanı ve ulaşım kaynaklarının yakınındaki yerler için eylem planı hazırlayacaklar ile yapılarda yalıtım değerlendirmesi çalışması yapacakların 36 ncı maddenin birinci fıkrasının (d) bendi ile 37 nci maddenin birinci fıkrasının (d) bendinde getirilen şartları,

e) Çevresel titreşimin değerlendirilmesine yönelik ölçüm yapıp, rapor hazırlayacakların 36 ncı maddenin birinci fıkrasının (e) bendi ile 37 nci maddenin birinci fıkrasının (e) bendinde getirilen şartları

sağlaması zorunludur.

ONÜÇÜNCÜ BÖLÜM

Şikâyetlerin Değerlendirilmesi, Denetim ve İdari Yaptırımlar

Şikâyetlerin değerlendirilmesi veya denetim

MADDE 39 – (1) Bu Yönetmelikte yer alan gürültü kaynakları bazında yaşanan sorunlar nedeniyle oluşan şikâyetlerin değerlendirilmesi veya programlı ve programsız yapılacak denetimlerde aşağıdaki esaslara uyulur:

a) Bu Yönetmelikte getirilen esaslar çerçevesinde gerek programlı veya programsız gerekse şikâyeti değerlendirmek amacıyla yapılacak denetimler; belediye sınırları ve mücavir alan içerisinde Çevre Kanununa istinaden yetki devri yapılan belediyelerce; belediye sınırları ve mücavir alan dışında yetki devri yapılan il özel idarelerince; yetki devri yapılmadığı takdirde ise İl Çevre ve Orman Müdürlüklerince, gerektiğinde diğer mevzuat kapsamında yetkili kılınan kurum ve kuruluşlar ile işbirliği ve koordinasyon içinde yapılır.

b) Şikâyetleri değerlendirme, denetim ve idari yaptırım konusunda yetki devri yapılmış kurum ve kuruluşlarda; Çevre Denetim Biriminin kurulması, Bakanlıkça esasları belirlenmiş uzmanlığa sahip en az 2 personelin görevlendirilmesi, bu personellerden en az birinin dört yıllık üniversite mezunu olması ve bu kişinin gözetiminde göreve katılım sağlayacak diğer personelin iki yıllık yüksek okul veya lise ve dengi okullardan mezun olması ve bu Yönetmelik kapsamında getirilen esas ve standartlara uygun ölçüm ekipmanının bulundurulması zorunludur.

c) Yapılan denetimlerde, bu Yönetmelikte verilen sınır değerlerin aşıldığının tespiti halinde, gürültü rahatsızlığına ve sınır değerlerin sağlanması için alınacak tedbirin özelliğine bağlı olarak, süre verilmesi, kapatılması ve benzeri uygulamalara yönelik esaslar denetim yapan personel veya birimi tarafından belirlenir.

Uygulamaya yönelik açıklayıcı doküman hazırlanması

MADDE 40 – (1) Bu Yönetmeliğin uygulanmasına yönelik olarak; gürültü haritalama, gürültü kontrol tedbirleri, uzmanlığa yönelik esaslar, akustik ve çevresel gürültü seviyesi değerlendirme raporu, ölçüm metotlarına ilişkin açıklayıcı dokümanlar ile idari yaptırım konularına açıklık getirecek açıklayıcı dokümanlar gibi her türlü doküman Bakanlıkça hazırlanır ve yayımlanır.

(2) Bu Yönetmelikte belirtilen arka plan gürültü seviyesinin belirlenmesine yönelik usul ve esaslar Bakanlıkça belirlenir.

İdari yaptırımlar

MADDE 41 – (1) Bu Yönetmelik hükümlerine aykırı davrananlar hakkında 30/3/2005 tarihli ve 5326 sayılı Kabahatler Kanunu ve Çevre Kanununun 20 nci maddesinde öngörülen idari yaptırımlar uygulanır.

ONDÖRDÜNCÜ BÖLÜM

Çeşitli ve Son Hükümler

Yürürlükten kaldırılan yönetmelik

MADDE 42 – (1) 7/3/2008 tarihli ve 26809 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği (2002/49/EC) yürürlükten kaldırılmıştır.

Havaalanlarındaki gürültünün izlenmesi

GEÇİCİ MADDE 1 – (1) 20 nci maddenin birinci fıkrasının (c) bendinde belirtilen gürültü ölçüm/kontrol/izleme sistemi 7/3/2011 tarihine kadar kurulur.

Hava yolu taşıtları için tazminat

GEÇİCİ MADDE 2 – (Mülga:RG-18/11/2015-29536)

Açık ve yarı açık eğlence yerlerinde alınacak tedbirlere yönelik verilen süre

GEÇİCİ MADDE 3 – (Mülga:RG-18/11/2015-29536)

Yürürlük

MADDE 43 – (1) Bu Yönetmelik yayımı tarihinde yürürlüğe girer.

Yürütme

MADDE 44 – (1) Bu Yönetmelik hükümlerini Çevre ve Orman Bakanı yürütür.

[Ekleri görmek için tıklayınız.](#)

⁽¹⁾ Danıştay Ondördüncü Dairesinin 23/10/2013 tarihli ve E.: 2011/13995, K.: 2013/7052 sayılı Kararı ile 27/4/2011 tarihli ve 27917 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmeliğin 1 inci maddesi ile bu bendin değiştirilerek “çok hassas kullanımlar” tanımından “konut” alanlarının çıkarılmasına ilişkin kısmı iptal edilmiştir.

Yönetmeliğin Yayımlandığı Resmî Gazete’nin		
	Tarihi	Sayısı
	4/6/2010	27601
Yönetmelikte Değişiklik Yapan Yönetmeliklerin Yayımlandığı Resmî Gazete’lerin		
	Tarihi	Sayısı
1.	27/4/2011	27917
2.	18/11/2015	29536