

Abstract**Multi - Dimensional Reproduction of Audio**

History of recording and reproduction of audio dates back to 1870s, when Edison's work on communication systems resulted in a side product which is called "phonograph". Since then, the monophonic reproduction of sound field has evolved into stereophonic and surround sound respectively, mainly driven by the requirements of entertainment industry, including music, movie and video game industries. This paper will focus on recent developments and future possibilities of reproducing multi-channel / multi-dimensional sound field from pre-recorded audio. In addition to that, the acoustical principles of human ear localization system will also be covered in order to provide a theoretical basis for related technologies.

Keywords: 3D Audio, Ambisonics, Wave Field Synthesis, Binaural Audio, HRTF

Tarihçe

Ses kayıt ve yeniden üretimi ile ilgili tarihçe ele alındığında, çoğu kişi Edison'un *phonograph* isimli icadının ilk ses kayıt cihazı olduğunu düşünür; ancak bu tam olarak doğru değildir. Bu icat için Edison (1878) tarafından yapılan 24 Aralık 1877 tarihli patent başvurusundan yirmi yıl önce, 1856 yılında, Leon Scott isimli Fransız bilim adamı *phonautograph* isimli bir cihaz icat etmiştir (Morton 2006: 2). Bu cihaz ilk ses kayıt cihazıdır; fakat kaydettiği sesi yeniden üretme özelliğine sahip değildir. Yapılan kayıtlar ses dalgalarının görsel temsili olarak değerlendirilebilir ve bu nedenle icadından sonraki yıllarda bu cihaz daha ziyade derslerde ve akademik çalışmalarda kullanılmıştır. Leon Scott'ın bu icadı, sunduğu olanaklar itibarıyla kendisi de işitme engelliler için çalışmalar yürüten Alexander Graham Bell tarafından ele alınmış ve cihazın kayıt özelliklerini gerçeğe en yakın hale getirebilmek için kadavradan elde edilmiş gerçek insan kulağı entegre edilmiş bir versiyonu da Bell tarafından üretilmiştir (Morton 2006: 4). Graham Bell, *ear phonautograph* adını verdiği bu cihaz ile olmasa da 1876 yılında icat ettiği telefon sayesinde ses ve iletişim alanında hem kendisi hem de başka mucitler tarafından atılacak çok sayıda önemli adımın öncülü olmuştur. Telefonun icadı toplum tarafından büyük ilgiyle karşılandı ve elbette dönemin önemli mucitlerinden Thomas Alva Edison da bu büyük buluşu incelemeye koyuldu. Kendisi de telekomünikasyon alanında ve özellikle telgraf alanında önemli çalışmalara imza atmış olan Edison, telefonu daha da geliştirmek için çeşitli yöntemler üzerine çalışmaya başladı (Millard 2005: 21-25). Telefonun icadından bir yıl sonra, Edison *phonograph* adını verdiği cihazı tamamladı. Başlangıçta Edison bu cihaz sayesinde telefon ile iletişim sırasında telesekreteri andırır biçimde ses sinyalinin kaydedilmesini ve ek olarak daha önceden kaydedilmiş sesli mesajların istenilen zamanda telefon aracılığı ile iletilmesini hedefliyordu; ancak çalışmaları sırasında bu amacından zamanla uzaklaşan Edison sonunda başlı başına bir ses kayıt ve yeniden üretim cihazı geliştirmiş oldu (Morton 2006: 8-10). *Phonograph* ilk ses kayıt cihazı olmayabilir; ancak kaydedilen sesi çalabilme özelliğine sahip olan ilk alettir. İcadının toplum tarafından da ilgi görmesi üzerine farklı kullanım alanları üzerine düşünmekte olan

Edison, eğlence amaçlı kullanım doğrultusunda da çalışmalara başladı. Diğer yandan icadına kullanım kolaylığı ve sağlamlık konusunda çok güvenmediğinden ev kullanıcılarını hedeflemek yerine yalnızca sınırlı sayıda mekanda ve sadece yetkili personel tarafından işletilen bir iş planı benimsedi (Morton 2006: 13-15). *Phonograph*'ın eğlence dünyası için sunduğu potansiyel, kısa zamanda birçok farklı şirketin de ilgisini çekmesine ve ev kullanımı da dahil olmak üzere çeşitli modeller üzerine çalışmalar yürütmelerine vesile oldu. Bu çalışmalar doğrultusunda Graham Bell'e ait Volta Laboratuvarları 1886 yılında *graphophone* adı verilen, *phonograph*'a kıyasla iyileştirilmiş ses kalitesi ile dikkat çeken cihazı tanıttı (Millard 2005: 31). Ardından, Emile Berliner tarafından 1887 yılında patenti alınan ve özellikle kayıt medyumunu olarak silindir yerine disk kullanmasıyla dikkat çeken *gramophone* önce Avrupa'da, 1894 yılından sonra da Amerika'da tanıtıldı (Morton 2006: xi).

Tahmin edilebileceği gibi bahsi geçen cihazların tümü sadece mono ses üretebiliyordu. Stereo ses üretiminin keşfedilip yaygın kullanım alanı bulması için on yıllar geçmesi gerekecek olmasına rağmen bu süre zarfında kilometre taşı olarak addedilebilecek önemli adımlar da atıldı. Bu konuda bilinen ilk önemli girişim 1881 yılında Paris Fuarında gerçekleşti. Bugün daha ziyade Wright kardeşler öncesinde gerçekleştirdiği uçak tasarımları ile hatırlanan Clement Ader isimli Fransız bilim insanı, canlı bir performansın telefon üzerinden aktarımını denemekteydi (Weidenaar 1995: 3). Paris Opera Binası (*Opéra Garnier*) sahnesine yerleştirdiği çok sayıda telefon vericisi ile bir kaç kilometre uzakta bulunan fuar alanındaki dinleyiciye yine telefon alıcıları ile canlı performansı ulaştırmayı hedefleyen sistem başarılı olmuş, akabinde radyonun yaygınlaşmasına kadar sürecek olan ve günümüzdeki şekliyle abonelik veya "dinle/izle öde" (*pay per view*) olarak adlandırılabilir bir iş modeli o yıllarda kurulmuş ve dinleyiciye evinden ayrılmadan telefon aracılığıyla, konser, opera vb. canlı performansları icra sırasında dinleyebilme olanağı sunulmuştur (Curtin 2014: 88-89; Pisano 2012: 83-85). Bu çalışmanın girişimcilik adına ortaya koyduğu yenilik elbette dikkat çekicidir; ancak Paris Fuarında gerçekleştirilen denemelerde kullanılan iki kanallı aktarım yönteminin ses teknolojileri açısından önemi çok daha büyüktür.

Fuar alanında kurulan dinleme odalarında her bir dinleyiciye her iki kulağa yerleştirilmek üzere bir çift telefon alıcısı veriliyordu. Bu iki alıcı konser salonunda sahne üzerinde belirli aralıklarla yerleştirilmiş çok sayıda vericiden biri sahnenin sol tarafında, diğeri sağ tarafında olmak üzere iki tanesine bağlıydı (Curtin 2014: 88). Bu durumda her dinleyici için farklı yerleştirilmiş verici çiftleri olmasından ve vericilerin yerleşiminde sesin fiziksel özelliklerinden ve işitme duyusunun prensiplerinden ziyade mekanın koşulları belirleyici olduğundan tam olarak "stereo" ses üretiminden bahsetmek mümkün değildi; ancak aralıklı yerleştirilmiş vericiler sayesinde dinleyici az da olsa mekan ve konum bilgisi üzerine işitsel ipuçları içeren bir tecrübe yaşayabiliyordu (Askew 1981: 67-68; Weidenaar 1995: 3-4). Ader'in bahsi geçen alandaki çalışması her ne kadar stereo ses üretimi yolunda erken atılmış bir adım olsa da daha belirleyici gelişmeler için özellikle Bell ve EMI laboratuvarlarının mühendis ve bilim insanlarının 1930'lu yıllarda ortaya koyacağı çalışmaları beklemek gerekmiştir. Örnek vermek gerekirse, bir EMI çalışanı olan Alan Blumlein (1931), 14 Aralık 1931 tarihli ses aktarım, kayıt ve yeniden üretim sistemlerinin geliştirilmesi üzerine hazırladığı patent başvurusunda, stereo ses alanında temel prensipleri ortaya koyan bir çalışma yapmış ve hala kendi adıyla anılmakta olup günümüzde de yaygın olarak kullanılan bir stereo kayıt tekniği geliştirmiştir.

Steinberg ve Snow (1934) tarafından yürütölen bir diğer çalışma ise Ader'in Paris fuarında yaptığını anımsatan biçimde; ancak telefon verici/alıcısı yerine mikrofon/hoparlör sistemini kullanarak bir sahnedeki performansın en gerçekçi biçimde uzaktaki dinleyiciye aktarılması için ihtiyaç duyulacak olan minimum sayıdaki mikrofon/hoparlör sayısını belirlemeye yoğunlaşmıştır. Vardıkları sonuca göre Sol, Sağ ve Merkez kanallarına sahip bir aktarım ve yeniden üretim yöntemi sahnelenen performansın gerçekçi bir temsili için yeterli olmaktadır. Bu çalışma stereo sesin yeniden üretimi alanında kilometre taşı olmasının yanında şu açıdan da ilginçtir; bahsedilen üç kanal günümüz ev kullanıcıları için sol ve sağ olarak ikiye indirilmiş olmasına rağmen çok sayıda dinleyiciye aynı anda ulaşılması gereken durumlarda -örneğin sinema gibi- merkez kanal önemini korumaktadır (Rumsey 2001: 12). Her ne kadar yukarıda bahsi geçen gelişmeler 1930'larda gerçekleşmiş olsa da stereo ses üretiminin yaygın kullanım bulması II. Dünya Savaşı sonrası, 50'lere denk gelmektedir. Hem Amerika'nın hem de Avrupa ülkelerinin savunma sanayilerinin ihtiyaçları doğrultusunda yapılan çalışmalar ve özellikle Almanya'nın savaş sonrası yaşanan yenilginin ardından manyetik kayıt ve kayıt medyumları alanında ürettiği teknolojilerin dünyanın geri kalanı ile buluşması sonucu, popüler müzik endüstrisi hızla bu imkanlardan yararlanmış, stereo albümlerin yayınlanmaya başlaması ve de özellikle stereo radyo yayıncılığının yaygınlaşması ile birlikte stereo ses bugün için bile en yaygın ses üretim biçimi olarak varlığını ortaya koymuştur (Morton 2006: 127, 156-173). 1970'lere gelindiğinde ise, sadece ön sahneden ibaret stereo alanı geliştirmek adına arka alan enformasyonu da sunabilen, her biri kanalı eşkenar dörtgenin köşeleri şeklinde düşünölen dört kanallı *Quadraphonic Sound* geliştirildi (Rumsey 2001: 15-16; Toole 2008: 278-279). Bu sistem, radyo yayıncılığında da denendi; ancak aynı anda iki radyo istasyonunun ortak çalışmasını gerektirmesi ve yüksek maliyeti nedeniyle istenilen yaygınlığı yakalayamadı (Sterling 2001: 409-410). 1976 yılında çok kanallı ses üretimi konusunda kilometre taşı sayılabilecek bir gelişme müzik yerine sinema alanından geldi. Dolby Laboratuvarları isimli firma, sinemada ses kullanımı için *Dolby Stereo* adını verdiği bir sistem geliştirdi. Her ne kadar isim stereo ses üretimini ima etse de aslen bu sistem dört kanallı çevresel ses üretimi hedeflemektedir (Rumsey 2001: 15). Özellikle 1977 tarihli *Star Wars* filmi gösterimi sonrası sinemada ses teknolojisi alanında standartlar belirlenmiş ve bu sistem bir çok sinema salonu tarafından kurulmaya başlanmıştır (Kerins 2011: 32). Takip eden yıllarda hem ev hem de sinema salonları için 5.1 ve 7.1 vs. gibi çevresel ses standartları ortaya konmuştur.

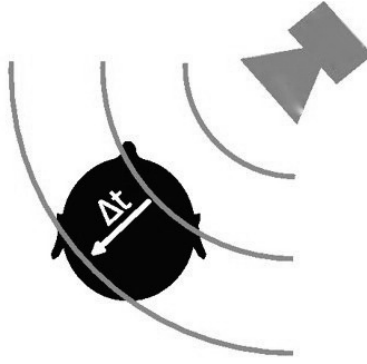
Bahsi geçen sistemler dinleyici/izleyiciye üst düzey çevresel ses deneyimi sunmakta olsa da sadece yatay eksen de işitsel veri sağlayabilmektedirler. 2000'lerden beri düşey eksen enformasyonu sağlayan farklı sistemler çeşitli ortamlarda tanıtılıp endüstride yer aramaktaydı, örneğin Hamasaki ve diğ. (2004) tarafından önerilen 22.2 ve Tomlinson Holman (2001) tarafından geliştirilen 10.2 sistemler gibi; fakat en somut adım yükseklik enformasyonu da sağlayan *Atmos* sistemi ile yine Dolby Laboratuvarlarından geldi.

Ses Kaynağı Konum Tespitini Etkileyen Temel Faktörler

Kulaklar arası zaman farkı (ITD)

Çok kanallı/çok boyutlu ses üretim sistemlerini ve hangi prensiplere dayanarak çalıştıklarını anlamak için insan işitme duyusunun ses kaynağı konum tespit mekanizmalarının da dikkate alınması yararlı olacaktır. Ele alınacak ilk mekanizma zamansal verilere dayanmaktadır. Sol ve sağ kulak arasında çizilebilecek bir doğru ile dik açı oluşturan düzlemde yer almayan her kaynaktan çıkan ses dalgaları,

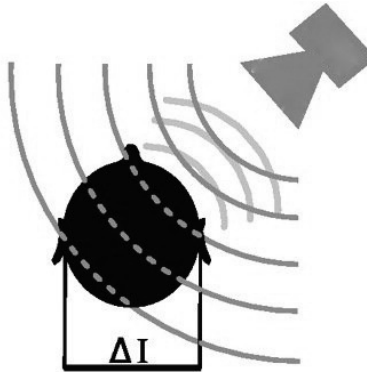
önce yakın olan kulağa, sonra diğerine ulaşacaktır. Bu durum kulaklar arası zaman farkı olarak adlandırılabilir (Şekil 1). Bu mekanizma, özellikle 700 Hz altı frekanslarda belirleyici olup iç kulak yapısına ve hassasiyetine son derece bağlıdır (Howard ve Angus 2001: 97-101).



Şekil 1. Kulaklar arası zaman farkı (Grothe 2010: 985)

Kulaklar arası şiddet farkı (IID)

Bir diğer konum tespit mekanizması ise iki kulak arasında işitilen ses yoğunluğuna bağlıdır. Bu durum insan kafasının iki kulak arasında bir bariyer işlevi görmesinden kaynaklanabileceği gibi (gölge efekti) bir kulağa daha uzakta olan ses kaynağının o kulağa ulaşan ses şiddetinin yakın kulağa oranla daha az olmasından da kaynaklanacaktır (Howard ve Angus 2001: 101-102) (Şekil 2). “Gölge efekti” adı verilen durumun, insan kafasının boyutları göz önüne alındığında, yaklaşık olarak 700 Hz üzeri frekanslarda daha belirleyici rol oynayacağı söylenebilir; çünkü bu frekans ve üzerindeki ses dalgalarının dalga boyu insan kafasının ebatlarından küçük olduğu için insan kafasının bariyer işlevi önem kazanacaktır. Bu konuda yapılan çalışmalar, kulaklar arası ses şiddeti farkı mekanizmasının 4 kHz üzerinde iyi işlev gördüğü, fakat 1 kHz ile 4kHz arasında insanın ses kaynağının yerini belirlemede biraz daha zorlandığı (en yüksek hata oranı 3kHz bölgesindedir) görülmektedir (Rossing 1990: 76). Bu durumda, kulaklar arası zaman farkı ve şiddet farkı mekanizmalarının belirtilen frekans aralığında bir arada verimli çalışmadığı söylenebilir.



Şekil 2. Kulaklar Arası Şiddet Farkı (Grothe 2010: 985)

Sol ve sağ kulağa ulaşan ses şiddetindeki farklılık, aynı zamanda mono kaydedilmiş bir kaynağın stereo ses alanı içerisinde konumlandırma konusunda en önemli parametrelerden biridir; çünkü stereo sistemlerde sol ve sağ hoparlörlerde hangi yoğunlukta ses olacağı, kaynağın stereo alan içerisine sol ya da sağ olarak nerede konumlandırılacağını belirlemektedir.

Uzaklık algısı

Uzaklık algısını belirleyen üç temel faktör vardır; bu konu hakkında Snow (1953) tarafından açıklanan görüşler şu şekilde özetlenebilir: Öncelikle ses kaynağı uzaklaştıkça dinleyiciye ulaşan sesin şiddeti azalır. İkinci olarak, hava akustik enerji için sönümlendirici işlevi görür. Tiz frekansları öncelikle etkileyen bu durum, yakın ses kaynağının üst frekans içeriğinin kaybolmadan dinleyiciye ulaşmasına, uzaktaki kaynağın ise tiz frekansları azalmış bir halde dinleyiciye ulaşmasına sebep olur. Bu durum, yıldırım düşmesi olayında rahatlıkla gözlemlenebilir. Eğer yıldırım yakına düşerse tiz frekanslardaki çatırtı duyulabilir iken uzakta olduğunda sadece alt frekanslarda bir uğultu işitilir.

Bu faktörlere ek olarak, kapalı alanlarda önem kazanan üçüncü bir durum da kaynak ile dinleyici arasındaki mesafe arttıkça dinleyiciye ulaşan direkt ses ile yansımalar arasındaki oranın değişmesidir. Bu durumda kaynak uzaklaştıkça mekanın ses üzerindeki etkisi artmaktadır.

Dikey ekseninde konum tespiti ve “Head Related Transfer Functions”

Yukarıda bahsi geçen zaman farklılığı ve ses şiddeti farklılığına dayalı konum tespit mekanizmalarının her ikisi de işitilen sesin kaynak pozisyonunu yatay ekseninde tespit etmeye yardımcı olmaktadır. Her iki kulağa da eşit mesafede bulunan bir kaynağın pozisyonunun tespiti için insan beyninin daha fazla veriye ihtiyacı vardır. Bu noktada dış kulağın, özellikle de kulak kepçesinin fiziksel yapısı önem kazanmaktadır. Bu bölge, şekli itibarıyla farklı pozisyonlardan gelen ses dalgalarına, geliş açılara bağlı olarak farklı yansıma kalıpları ile cevap veren bir odaklayıcı işlevi görmektedir. Bu, Jens Blauert tarafından değinildiği üzere, şu anlama da gelmektedir; kulak kepçesinde oluşan yansımalar, omuz ve gövde bölgelerinden gelen yansımalar ile birleşerek, işitilen seste orijinale göre frekans içeriği değişiklikleri oluşurmaktadır (Rumsey, 2001: 24-25'te atıfta bulunulduğu gibi). Bunun sonucunda ses, iç kulağa belirli bir filtre uygulanmış gibi ulaşmaktadır. Bu etki, her iki kulak için de olmak üzere kaynağın rastgele herhangi bir pozisyonu için biriciktir ve “Head Related Transfer Functions (HRTFs)” olarak adlandırılır (Rumsey 2001: 23-24).

HRTF konusunda ilginç olan bir diğer nokta da, Theile ve Warren'ın çalışmalarında değindiği gibi insan beyninin bu veriyi sesin tınısının bir parçası olarak değil de ses kaynağının pozisyonu ile ilgili bir veri olarak ele alabilmesidir (Toole 2008: 38'de atıfta bulunulduğu gibi). Her bireyin kulak kepçesi yapısındaki farklılıklar, vücut, omuz yapısı vb. gibi fiziksel özelliklerinin farklılığı, lokalizasyon için genel geçer HRTF verileri elde etmeye izin vermemektedir. Ayrıca yapılan araştırmalarda, beynin fiziksel yapıdaki değişikliklere alışma ve adapte olma özelliği olduğu da gözlemlenmiştir (Hofman ve diğ. 1998). Örneğin kulakları kapatmakta olan uzun saçların kesilmesiyle belirli bir pozisyondaki ses kaynağı için oluşacak filtre fonksiyonu değişecek, fakat insan beyni bu yeni HRTF verisine de hızla adapte olacaktır.

HRTF konusunda yapılan çalışmalar, kaynak ses spektrumu üzerinde oluşan filtre etkisinin üst frekanslarda daha belirgin olduğunu tespit etmiştir (Hebrank ve Wright 1974). Bu durum insan kulağının ses kaynağı pozisyonunu tespit ederken tiz frekanslarda pes frekanslara oranla daha doğru tespit yapabilmesinin sebeplerinden biridir. HRTF ölçümleri genellikle yansımasız (*anechoic*)

odalarda ya bir cansız manken başı içine yerleştirilen mikrofonlarla, ya da bir insanın kulak kanalına yerleştirilen mikrofonlar aracılığıyla gerçekleştirilir (Şekil 3).



Şekil 3. HRTF ölçüm deneylerine örnekler (*HRTF measuring system* ve *HRTF measurement*)

Çok Kanallı/Çok Boyutlu Ses Üretim Uygulamaları

Ambisonics

Üç boyutlu sesin yeniden üretimini gerçekleştirebilen sistemlere örnek olarak *Ambisonics* verilebilir. Bu teknoloji 1970'lerde Michael Gerzon önderliğinde bir grup bilim insanı tarafından geliştirilmiştir. Teorik olarak 1930'lara dayanan Blumlein'a ait stereo tekniğin, stereo yerine çoklu kanal desteği sunan ve yükseklik verisi içeren bileşke bir versiyonu olduğu söylenebilir (Elen 1991). Sistem; kayıt, depolama, aktarım ve yeniden üretim gibi aşamalara dair veri işleme yöntemlerini kapsamaktadır (Rumsey 2001: 111). Sistem dahilinde kullanılan sinyal formatları "A, B, C ve D format" olarak adlandırılan dört temel sinyal tipinden oluşmaktadır. "A-format" olarak adlandırılan ilk sinyal tipi, *Ambisonics* için tasarlanan özel mikrofonlar tarafından kaydedilen veridir. "B-format" ise stüdyo ortamında ses işleme için kullanılır. "A-format" veri "B-format" hale dönüştürülebileceği gibi herhangi bir mikrofonla yapılmış kayıt da *Ambisonics* sistemine dahil edilebilmek için "B-format" haline dönüştürülebilir (Rumsey 2001: 112-115). Bu dönüşümün nasıl yapıldığı ve *Ambisonics* sistemine uygun miks işleminin stüdyoda nasıl uygulandığına dair detaylı bir örnek Elen (1983) tarafından verilmiştir.

Stüdyo işlemleri tamamlanan veri, aktarım ve depolama amacıyla "C-format" haline dönüştürülür. Sistem uyumluluğu göz önüne alınarak kodlaması yapılan ve geliştiricileri tarafından "UHJ" olarak da adlandırılan bu format, dört kanal veri taşıyabilmekte; bu verinin tamamı uygun şekilde çözüldüğünde yükseklik bilgisi de içeren ses üretimi yapılabilmekte, üç kanal veri ile çevresel ses ve iki kanal veri ile herhangi bir çözücüye ihtiyaç olmadan stereo ses üretimi yapılabilmektedir (Elen 1991). "D-format" olarak adlandırılan son sinyal türü de "UHJ" verisinin çözücünden geçip hoparlörlere uygun biçimde aktarılmaya hazır hale gelen şeklidir (Rumsey 2001: 115).

Bu sistemin en önemli artlarından birisi, yapısı gereği, mevcut sistem olanakları dahilinde mono, stereo, günümüzün çevresel ses formatları ve tam küresel 3 boyutlu ses uyumlu olmasıdır (Elen 1991). Ambisonics formatlı bir kayıt, dinleyicinin hoparlör kurulumuna uygun olarak çözümlenebilir; yani farklı mecralar için farklı ses formatlarına gerek duyulmamaktadır. Bu özellik, yani tek bir dosya ile çoklu format desteği, bugün gittikçe artan depolama alanları ve ses dosyalarının özellikle video gibi diğer dosyalara oranla daha küçük boyutlarda olmaları sonucu pek önemsenmese de, depolama adına bir avantaj sunmaktadır.

Dinleyici açısından bakıldığında bir diğer önemli özellik de, diğer sistemler gibi ideal dinleme tecrübesi için kişiyi *sweet spot* tabir edilen dar bir dinleme odağına hapsedmeme iddiasında olmasıdır. *Sweet spot* terimi, tüm hoparlörlere göre en uygun olan ve dinleyiciye en doğru dinleme tecrübesini sunan noktaya denmektedir. Eğer dinleyici bu noktadan uzaklaşırsa, hayali imajlarda (*phantom image*) kayma yaşanacak ve ses alanı işitsel konum tespiti konusunda bulanıklaşacaktır. Bahsedilen bu problem Ambisonics ile yaşanmamaktadır; çünkü bu sistem çoğu güncel ses sistemlerinin hayali imaj oluşturmak için kullandığı hoparlörler arası ses şiddeti farklılığının yanı sıra zaman farklılıkları ve faz bileşenlerini de kullanmaktadır (Elen 1998). Öte yandan, Ambisonics sistemini uygun bir kurulumda ve hem yansız (*anechoic*) oda ortamında hem de normal bir oda ortamında tecrübe ettiğini belirten Toole (2008: 286), bu önermeye katılmamakta, yansız odada ses sahnesinin kulaklığa benzer şekilde kafa içerisinde oluştuğunu ve normal odada ise dinleme odağının bahsedildiği kadar geniş olmayıp dinleme pozisyonu değişikliklerine göre kaymaların yaşandığını belirtmektedir. Dinleme konumu hakkında Malham tarafından yapılan bir çalışma ilgi çekici bir noktaya temas etmektedir. Buna göre dinleyici hoparlör dizilimi dışından dinlediğinde, dinleme alanı içinde oluşan ses sahnesine dışarıdan “bakabilmektedir” (Malham ve Myatt 1995: 66’da atıfta bulunduğu gibi).

Ambisonics formatında bir ses kayıt tecrübesi için bu sistem için özel üretilmiş mikrofonlar kullanılabilir (Şekil 4). Bu mikrofonlar ile yapılan kayıtlar, yukarıda bahsedilen *Ambisonics* sinyal formatlarına uygun olarak “A-format” türündedir (*SoundField*). Bu format, mikrofonun dört kapsülünden elde edilen sinyalleri içermektedir. Bu sinyal, stüdyo kullanımı için mikrofonla beraber kullanılan sinyal işlemci sayesinde dört temel bileşene sahip “B-format” haline dönüştürülmektedir (*SoundField*). Temel bileşen “W” adı verilen mono ve “*omni-directional*” (mikrofonlarda tüm yönlere eşit hassasiyet gösteren alıcı kalıbı) sinyal olmakla birlikte “X”, “Y” ve “Z” olarak adlandırılan diğer bileşenler de sırasıyla ön-arka, sol-sağ ve yukarı-aşağı eksenlerine ait sinyal verileridir (Malham ve Myatt 1995: 62). Sinyalin bu şekilde bileşenlere ayrılması, yapılan kaydın belirgin herhangi bir kayba uğramadan hem *Ambisonics* hem de *surround/stereo/mono* formatlarına uygun hale getirilebilmesini sağlamaktadır. Bu durumun sağladığı bir diğer avantaj da bileşenlerin farklı kombinasyonlarını kullanarak mikrofon sabit dururken yönelimin uzaktan değiştirilebilmesine olanak tanınması ve arka alan cevabının istenilen miktarda azaltılabilmesi sayesinde “odaklanma” adı verilen etkiyi sağlayabilmesidir (Malham ve Myatt 1995: 65).

İyi geliştirilmiş ve teorik olarak sağlam bir zemine oturtulmuş olan *Ambisonics*, bahsettiğimiz arti özelliklerine rağmen geniş bir kabul görmemiştir. Bu durumun bir çok sebebi olabilir, örneğin sistemin geliştirildiği 70’li yıllarda stereonun tahtını zorlaması beklenen *quadraphonic* sistemin beklentileri karşılayamaması dönemin yatırımcılarının yeni bir denemeye şüpheyile yaklaşmalarına sebep olmuştur. Ek olarak, *Ambisonics*’in somut bir ürün olmak yerine teoriler ve matematiksel denklemler bütünü halinde olması, sistemin tanıtım ve lisanslama konularında sıkıntılar yaşamasına

sebebi olmuştur (Rumsey 2001: 16-17). Son olarak, yine 70'li yıllarda sinema sektörü aracılığıyla önemli bir başarı yakalayan Dolby Stereo, endüstriyel ilginin çok kanallı çevresel ses sistemlerine odaklanmasına neden olmuştur. *Ambisonics* belki bugün son kullanıcı tarafında popülerlik kazanamamış olabilir; ancak yine de bazı meraklıların ve araştırmacıların bu sisteme ilgi gösterdiği bir gerçektir, örneğin geçtiğimiz yıllarda BBC'nin Ar&Ge birimi bu sistemin sunduğu imkanları yeniden incelemeye almıştır (Baume ve Churnside 2010).

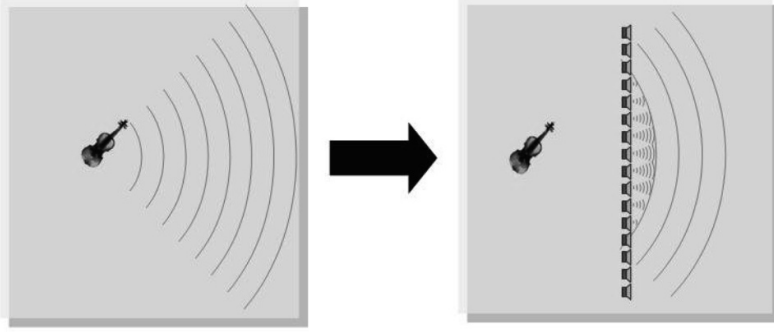


Şekil 4. Ambisonics uyumlu Soundfield mikrofoni (*Soundfield Microphone*)

Wave Field Synthesis (WFS)

Stereo sesin yeniden üretimi konusunda yapılan çalışmalara değinirken, Steinberg ve Snow (1934) tarafından, kaynağın gerçeğe uygun bir temsili için, sol sağ ve merkez olmak üzere minimum üç kanala ihtiyaç olduğunun tespit edildiğini belirtmiştik. Ancak; bahsedilen çalışmada ve Snow (1953)'un stereonun temel prensiplerini ele aldığı bir diğer makalede, üç kanal gerçekçi temsil için yeterli kabul edilmekle birlikte ideal temsilin çok sayıda küçük mikrofoni ve hoparlör aracılığıyla elde edileceği de belirtilmekteydi. Snow'un değindiği bu fikir, Berkhout (1988) tarafından teorik bir zemine oturtulmuş ve daha sonra yine Berkhout ve diğerleri (1993) tarafından ilk kez *Wave Field Synthesis* adı altında geliştirilmiştir. Bu teori, dalga yayılımı konusundaki önemli prensiplerden olan *Huygens İlkesi*'ne dayanmaktadır. Bu ilkeye göre homojen bir ortamda kaynağın oluşturduğu dalga cephesi (*wavefront*) üzerindeki herhangi bir nokta ikincil kaynak olarak kabul edilebilir (Berkhout ve diğ. 1993).

WFS açısından ele alındığında, bahsedilen ikincil kaynak işlevini hoparlörler yerine getirmektedir. Bu hoparlörler, WFS aracılığıyla orijinal kaynağa ait ses alanının dinleyici için yeniden oluşturulmasını sağlamak için ikincil bir ses kaynağı olarak görev yaparlar (Şekil 5). Bu teori açısından bakıldığında, WFS ile diğer sistemler arasındaki en önemli fark, insan kulağının işitme mekanizmaları ve psiko-akustik prensipleri kullanarak gerçeğin bir temsili elde etmek yerine kaynağa ait ses alanını fizik prensipleri ile bire bir yeniden oluşturmaya çalışmak olarak göze çarpmaktadır.



Şekil 5. Orijinal kaynağa ait ses alanının bir ikincil kaynak olarak görev yapan hoparlör dizini ile yeniden üretilmesi (WFS)

WFS ile üretilen bir ses alanının dinleyiciye sunduğu artılardan bir diğeri ise ideal dinleme pozisyonunun genişlemesidir. Teorik olarak, dinleyici sentezlenen ses alanı içerisinde hareket ettiğinde stereo veya *surround* sistemlerdeki gibi konumlama problemlerine maruz kalmamalı, aksine gerçek kaynağın karşısında hareket ediyormuş gibi bir tecrübe yaşamalıdır; ancak hoparlör sayısının sınırlı olması, hoparlör dizininin her iki uçta sonlanıyor olması ve dinleme mekanındaki yansımalar nedeni ile belirli kısıtlamalar oluşmaktadır (Spors ve diğ. 2008).

WFS üzerine yapılan çalışmalar çok sayıda hoparlöre gereksinim duymaktadır ve bu çalışmalar genellikle doğrusal hoparlör dizilimi ile düzlemsel ses alanı üretimi hedeflenmektedir (Spors ve diğ. 2008). Üç boyutlu ses üretimi ile ilgili çalışmalar ise özellikle 2000'lerden başlayarak giderek artış göstermektedir. Çeşitli üniversite laboratuvarlarında kurulan sistemler (Şekil 6), *CARROUSO* gibi Avrupa Birliği tarafından fonlanan araştırma projeleri ve *IOSONO* gibi özel sektör girişimleri bu alanda yapılan çalışmalara katkıda bulunmaktadır.



Şekil 6. Salford Üniversitesi dinleme odasında kurulu *Wave Field Synthesis* sistemi

Binaural audio

Stereo kayıt teknikleri genel olarak incelendiğinde yöntem olarak insan kulağının işitme mekanizmalarından yararlanıldığı görülmektedir. Örneğin “AB” gibi aralıklı mikrofon çiftleri ile yapılan kayıtlar öncelikle sesin mikrofonlara ulaşım zamanındaki farklılıklardan yararlanırken “XY” gibi diyafram eksenleri dik açı ile çakışık olarak yerleştirilmiş mikrofonlarla yapılan kayıtlarda ses her iki mikrofona da aynı zamanda ulaşmakta fakat stereo duyum şiddet ve frekans değişiklikleri aracılığı ile elde edilmektedir. *Binaural Audio* tekniğinde de benzer şekilde mikrofonlar arası mesafeden kaynaklanan zaman farklılığı, iki mikrofon arasındaki bariyerden kaynaklanan ses şiddet ve frekans farklılığı diğer stereo kayıt teknikleri ile örtüşmektedir. Ancak Snow (1953), stereo ve *binaural audio* arasındaki farkı açıklarken iki hoparlör arası ses alanı yaratmaya çalışan stereo sistemine karşılık *binaural audio* tekniğinin insan kulağındaki duyumu yeniden üretmeye çalıştığına altını çizmiştir. Bauer’in belirttiği gibi stereo kayıt teknikleri ile yapılan kayıtlar kulaklık ile dinlendiğinde stereo alan iki kulak arasında sanki kafanın içindeymiş gibi oluşmakta iken *binaural audio* kulaklık ile dinlendiğinde daha farklı tecrübelerle olanak tanımaktadır (Rumsey 2001: 59’da atıfta bulunduğu gibi). Bu yöntemin arkasındaki fikir şu şekilde özetlenebilir; eğer bir ses kaynağı insan kulaklarının içine yerleştirilmiş mikrofonlar aracılığı ile kaydedilirse, bu kayıt insan beyninin üç boyutlu lokalizasyon için ihtiyaç duyacağı kulaklar arası zaman farklılığı, kulaklar arası şiddet farklılığı ve HRTF verilerinin tümünü içerecektir (Rumsey 2001: 65-66). Eğer bu kayıt dinleyiciye kulaklık aracılığı ile dinletilirse, hoparlörden dinletilirken oluşabilecek kulakkeçesi, omuz ve vücut yansımalarının ikincil kümülatif etkisi ortadan kalkacak, dinleyici yalnızca ilk kayıt anındaki kaynak ve mikrofon arasındaki konum durumunu yüksek doğruluk oranı ile tecrübe edebilecektir.

İdeal bir sonuç elde etmek için, mikrofonlar gerçek insan ebatlarında hazırlanmış baş veya baş artı gövde şeklinde üretilmiş mankenlerin kulak kanallarına yerleştirilir. Halihazırda akademik çalışmalar ve HRTF deneyleri için kullanılmakta olan bu yöntem, ses mühendisleri tarafından son kullanıcıya yönelik uygulamalarda da karşımıza çıkabilmektedir. Yüksek gerçeklikteki mekan hissiyatı sebebiyle bu teknikle yapılmış kayıtlara, özellikle klasik müzik prodüksiyonlarında rastlanılabilmektedir. Ayrıca dinleyiciye sunduğu “orada olma” hissiyatı sebebiyle kendisini çevreleyen ve performansın içinde hissettirebilen bu teknik, radyo tiyatroları, piyesler ve canlandırma sesli kitap uygulamalarında da karşımıza çıkabilmektedir.

Öte yandan, gerçekçi lokalizasyon hissiyatına rağmen bu tekniğin birtakım dezavantajları bulunmaktadır. İlk olarak bu tip kayıtlar dinleyiciyi kulaklığa mahkum etmektedir; aksi halde sunduğu üç boyutlu tecrübe çok zayıflamaktadır. Bunun sebebi yapılan kaydın hoparlörden dinletilmesi durumunda ikincil mekan ve vücut yansımalarının kayıta yer alan lokalizasyon verilerini tamamen bulandırmasıdır. Ayrıca bir dinleme aygıtı olarak kulaklık, her iki kulağa ayrı ayrı ses gönderebilmektedir; fakat hoparlör ile dinleme esnasında, yalnızca sol ya da sağ kulağa ulaşması hedeflenen veri diğer kulağa da gitmektedir ve bu durum lokalizasyon verilerinin beyin tarafından doğru algılanmasını engellemektedir (Rumsey 2001: 60). Bir diğer problem de her bireyin fiziksel yapısının farklı olmasından dolayı kayıta kullanılan manken/mikrofon kombinasyonunun herkes için aynı derecede başarılı sonuçlar vermemesidir (Rumsey 2001: 67-68). Bu durum *binaural audio* tecrübesinin dinleyiciden dinleyiciye tutarsızlık göstermesine sebep olmaktadır; kimi dinleyici çok memnun kalırken kimisi hiç bir özel durum hissetmeyebilir. *Binaural audio* tekniğinin bir diğer negatif yönü de yine kulaklık sisteminden kaynaklanmaktadır. Kulaklıkla dinlemede ses alanı başın pozisyonuna göre sabit kalmaktadır, yani başın hareketine rağmen lokalizasyon verileri sabit

kalmakta, ses alan imajı ise başın hareketine göre hareket etmektedir, oysa gerçek hayatta bir insan başını hareket ettirdiğinde çevreleyen ses alanı aynı kalmakta, kulağa ulaşan lokalizasyon verileri değişmektedir. Bu durum beyin için ses alanı algısında çok küçük de olsa problem yaratmaktadır, çünkü normal şartlar altında insan beyni kesin pozisyon belirlemede sıkıntı yaşanan durumlarda küçük baş hareketleri aracılığıyla oluşan lokalizasyon veri değişikliklerinden de önemli ölçüde yararlanmaktadır. Bahsedilen problemlerin çözümlerine dair çeşitli çalışmalar yürütülmektedir; ancak son kullanıcıya ulaşan yaygın bir uygulama henüz gerçekleşmemiştir.

Sesin yeniden üretiminde HRTF uygulamaları

Yukarıda bahsi geçen sorunlar için ara çözümler üretmek adına kullanılan yöntemlerden biri HRTF veri tabanlarının kayıt sonrasında uygulanmasıdır. Bu yöntemde, geleneksel metotlarla kaydedilmiş herhangi bir kayıt kullanılabilmekte ve kaynak üzerine sonradan uygulanan HRTF bazlı filtreler aracılığı ile beynin lokalizasyon algısı manipüle edilebilmektedir. HRTF verileri, ses kaynağının pozisyonu sebebiyle kaynak üzerinde oluşan filtre etkileri olarak düşünülebileceğinden, aynı filtreyi her hangi bir kaynağa uygulamak o kaynağın aslında HRTF verisi alınan pozisyonda bulunduğu algısını yaratabilmektedir. Dinleyicinin konumu ile ilgili problemler ise kafa takip (*head tracking*) sistemleri ile çözülmeye çalışılmaktadır. Bu sistemlerde dinleyicinin başının pozisyonu değiştiği zaman, takip sistemi aracılığıyla tespit edilen bu hareket doğrultusunda otomatik olarak uygulanacak HRTF filtreleri güncellenmektedir (Song 2011). Sonuçta dinleyicinin hareketi ile eş zamanlı lokalizasyon verileri sağlayabilen ve mekânsal gerçekçilik hissiyatını arttıran inandırıcı bir sistem oluşturulabilmektedir.

Hoparlör ile ses üretimi hakkında daha önce *Binaural Audio* başlığı altında belirtilen problemler geçerliliğini korumaktadır. Örneğin sol kulak için tespit edilen HRTF verileriyle oluşturulan filtreler sol hoparlör kanalına uygulanacak; ancak sol hoparlörden çıkan sesin dinleyicinin sağ kulağına da ulaşması sonucu beynin lokalizasyon algısında çatışma yaşanacaktır. Bu problemin çözümü için kullanılabilir yöntemlerden biri Cooper ve Bauck tarafından 1989 tarihli çalışmada ortaya konan *Crosstalk* iptal filtreleridir (Malham ve Myatt 1995: 60'ta atıfta bulunduğu gibi). *Crosstalk* terimi kanallar arası çapraz geçişme olarak özetlenebilir, burada ise yukarıdaki soruna işaret etmektedir; yani sol hoparlörden gelen sesin yalnız sol kulağa değil de sağ kulağa da ulaşması durumudur. İptal filtresi ise istenmeyen kulağa giden sinyali nötrlemek adına diğer kanala uygulanmaktadır. İdeal tasarımı sistemi çok zorlayan ve yan etkileri olan bir metot olsa da *Crosstalk* iptal filtreleri ile tatmin edici sonuçlar yakalanabilmektedir. En önemli negatif yanı ise hoparlör ve dinleyici pozisyonunun önceden biliniyor olması ve dinleme sırasında kesinlikle bu pozisyonların korunmasını gerektirmesidir; aksi halde filtreler işlevini yitirecektir (Malham ve Myatt 1995: 60).

Sonuç: Günümüzde Ve Gelecekte Çok Boyutlu Ses

Bu yazı kapsamında bahsi geçen teknolojiler yakın gelecekte evlerimizde kendilerine yer bulamayabilirler; ancak yine de çoğu halihazırda çeşitli uygulamalarda kullanım alanı bulmaktadır. Örneğin *Ambisonics* için geliştirilen mikrofon, pratikliği ve geniş format uyumluluğu nedeni ile *surround* kayıtlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca formatın kendisi de arşiv amaçlı uygulamalar için önemli bir opsiyondur. Sanal gerçeklik platformları, bilimsel araştırma ve eğitim simülatörü gibi alanlar üç boyutlu ses sistemlerinden yararlanmaktadır. Kulaklıklar için geliştirilen kafa takip sistemleri, profesyonel ses piyasasında, stüdyo dışında da çevresel ses üzerine

çalışmayı isteyen ses mühendislerini hedefleyen ürünlerde yer almaktadır. Ev kullanıcısı için şu an pahalı sayılabilecek bu ürünler, maliyetlerin düşmesi halinde ve talebe bağlı olarak yaygınlaşma potansiyeli taşımaktadır.

Oyun dünyası da çok boyutlu ses konusunda itici güç olan sektörlerden birisidir. Konsol/bilgisayar başında bulunan kullanıcıların çoğunlukla sabit durduğu ve fazla hareket etmediği oyunlarda üç boyutlu ses uygulamaları yapabileme imkanı oluşabilmektedir. Ayrıca oyuncunun oyun alanına bakış perspektifini değiştirmek için başını hareket ettirmek yerine kontrol kumandaları aracılığı ile bunu yapması, kafa takip sistemlerine olan ihtiyacı ortadan kaldırmakta, oyun görselindeki değişimlere uygun işitsel konum verilerinin gerçek zamanlı güncellenmesini kolaylaştırmaktadır. Ek olarak, oyun geliştiriciler çevresel ses üretimini oyuncunun arkasından da gelebilen sesler aracılığıyla heyecanı arttırmak için kullanabilmektedir (Collins 2008: 64). Örneğin gece geç bir saatte oynanan gerilimli bir oyunda kulaklıkta arkadan gelen bir ses duymak oyuncu için ürkütücü bir sürpriz olabilir. Yine oyun dünyasının sanal gerçeklik üzerine yürüttüğü ve oyuncunun fiziksel hareketleri ile dahil olabileceği platformlar üzerine yapılan çalışmalar, gerçekçi bir atmosfer için üç boyutlu ses entegrasyonunu da hedeflemektedir. Cep telefonlarının, tablet, dizüstü bilgisayar gibi mobil cihazların gördüğü ilgi ve üreticiler arasında yaşanan yüksek rekabet, kullanıcılara iyileştirilmiş dinleme tecrübeleri sunmayı amaçlayan özellikler geliştirilmesine sebep olmaktadır. Portatif cihazların fiziksel olarak çok küçülmeleri hoparlörlerin arasındaki mesafenin çok kısılmasına, dolayısıyla dinleme esnasında çok daralmış bir stereo imaj oluşmasına neden olmaktadır. Bunun önüne geçmek için üreticiler daha önce bahsettiğimiz yöntemlerin çeşitli türevlerine başvurabilmektedir.

Sinema endüstrisi de ses teknolojilerinin gelişmesine katkıda bulunan itici güçlerden birisidir. *Surround* ses sistemleri gelişmeye devam etmektedir ve Dolby laboratuvarları *Atmos* adını verdikleri yükseklik enformasyonu için ayrı kanal içeren ses sistemlerini kullanıma sokmuştur.

Konu müzik endüstrisi olduğunda ise geleceğe yönelik tahminlerde bulunmak güçleşmektedir; çünkü günümüzde pratikliğin ses kalitesinin önünde tutulduğu bir anlayış yaygın kabul görmektedir. Müzik dinleyicisine farklı bir tecrübe sunmak isteyen denemelerin tümü son kullanıcı nezdinde yaygınlaşmamakta, sadece belirli kesimler tarafından takip edilmektedir.

Referanslar

- Askew Antony. 1981. "The Amazing Clément Ader." *The Studio Sound And Broadcast Engineering*, 23(8): 44-48, (9): 66-68, (10): 100-102.
- Baume Chris ve Anthony Churnside. 2010. "Scaling New Heights in Broadcasting Using Ambisonics." <http://www.bbc.co.uk/rd/publications/scaling-new-heights-in-broadcasting-using-ambisonics> (05.02.2015).
- Berkhout, A.J. 1988. "A Holographic Approach to Acoustic Control." *Journal of the Audio Engineering Society* 36, December 1988: 977-995.
- Berkhout, A. J., Diemer D. Vries ve Peter Vogel. 1993. "Acoustic control by wave field synthesis." *The Journal of the Acoustical Society of America*, 93 (5): 2764-2778.
- Blumlein, Alan. D. 1931. "Improvements in and relating to Sound-transmission, Sound-recording and Sound-reproducing Systems." *British Patent*, No: 394325, Kısmi Yeniden Basım 1958: *JAES*, Vol.6, No.2.
- Collins, Karen. 2008. *Game Sound*. Massachusetts: MIT Press.

- Curtin, Adrian. 2014. *Avant-Garde Theatre Sound: Staging Sonic Modernity*. New York: Palgrave Macmillan.
- Edison, Thomas. A. 1878. "Phonograph or Speaking Machine." *United States Patent*, No: 200521.
- Elen, Richard. 1991. "Whatever Happened to Ambisonics." *AudioMedia Magazine*. http://www.ambisonic.net/ambi_AM91.html (27.01.2015).
- Elen, Richard. 1998. "Ambisonics: Surround-Sound in the Age of DVD." *AudioMedia Magazine*. <http://www.ambisonic.net/ambidvd.html> (27.01.2015).
- Grothe, Benedict, Michael Pecka ve David McAlpine. 2010. "Mechanisms of Sound Localization in Mammals." *Physiological Reviews*, 90 (3): 983-1012.
- Hamasaki, Kimio, Koichiro Hiyama, Toshiyuki Nishiguchi, ve Kanuho Ono. 2004. "Advanced Multichannel Audio Systems with Superior Impression of Presence and Reality." 116th Convention, *Audio Eng. Soc.*, Preprint 6053.
- Hebrank, Jack. ve Donald Wright. 1974. "Spectral Cues Used In The Localization of Sound Sources On The Median Plane." *Journal of Acoustic Society of America*, 56: 1829-1834.
- Hofman, Paul. M., Jos G. A. Van Riswick, ve A. John Van Opstal. 1998. "Relearning Sound Localization with New Ears." *Nature Neuroscience*, 1(5): 417-421.
- Holman, Tomlinson. 2001. "The Number of Loudspeaker Channels." 19th International Conference, *Audio Eng. Soc.* Paper No. 1906.
- Howard, David M. ve James Angus. 2001. *Acoustics and Psychoacoustics* (Second Edition). Oxford: Focal Press.
- "HRTF measurement" (b.t). http://www.kar.fi/KARAudio/Services/HRTF_meas1.jpg (26.01.2015)
- "HRTF measuring system." (b.t). http://www.nagaoka-ct.ac.jp/ee/lab_syano/HRTF_measuring_system.jpg (26.01.2015)
- Kerins, Mark. 2011. *Beyond Dolby: Cinema in the Digital Sound Age*. Bloomington: Indiana University Press.
- Malham, David. G. ve Anthony Myatt. 1995. "3-D Sound Spatialization Using Ambisonic Techniques." *Computer Music Journal*, 19 (4): 58-70.
- Millard, Andre. 2005. *America on Record: A History of Recorded Sound* (Second Edition). New York: Cambridge University Press.
- Morton, David. L. 2006. *Sound Recording: The Life Story of a Technology*. Baltimore: John Hopkins University Press.
- Pisano, Giusy. 2012. "The Théatrophone, An Anachronistic Hybrid Experiment Or One Of The First Immobile Traveller Devices." Andre Goudreault, Nicolas Dulac, ve Santiago Hidalgo, ed., *A Companion to Early Cinema*: 80-98. Oxford: Wiley Blackwell.
- Rumsey, Francis. 2001. *Spatial Audio*. Oxford: Focal Press.
- Rossing, Thomas D. 1990. *The Science of Sound* (Second Edition). USA: Addison-Wesley Publishing.
- Snow, William. B. 1953. "Basic Principles of Stereophonic Sound." *Journal of the SMPTE*, 61 (5): 567-589.
- Song, Muyung-Suk, Cha Zhang, Dinei Florencio, ve Hong-Goo Kang. 2011. "An Interactive 3-D Audio System with Loudspeakers." *IEEE Transactions*, 13 (5): 844-855.
- "SoundField." (b.t). <http://www.tslproducts.com/wp-content/uploads/2013/05/SoundField-Brochure-Singles-LR-v2.pdf> (27.06.2015)

- "Soundfield Microphone." (b.t). <http://mat.ucsb.edu/240/D/static/notes/Ambisonics.html> (27.01.2015).
- Spors, Sascha, Rudolf Rabenstein, ve Jens Ahrens. 2008. "The Theory of Wave Field Synthesis Revisited." *AES Convention Paper*, 124th Convention, May 2008, Netherlands.
- Steinberg, John. C. ve William. B. Snow. 1934. "Auditory Perspective – Physical Factors." *Electrical Engineering*, January, 1934: 12-17.
- Sterling, Christopher H. ve John Michael Kittross. 2001. *Stay Tuned: A History of American Broadcasting*. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Toole, Floyd E. 2008. *Sound Reproduction: Loudspeakers and Room*. Oxford: Focal Press.
- "Wave Field Synthesis in Salford University Listening Room" (b.t). https://acousticengineering.files.wordpress.com/2013/12/wavefield_synthesis_in_salford_university_listening_room.jpg (05.02.2015).
- Weidenaar, Reynold. 1995. *Magic Music From The Telharmonium*. London: The Screcrow Press.
- "WFS." (b.t). <http://www.limsi.fr/Scientifique/aa/thmsonesp/images/wfs.jpg> (04.02.2015).