

9.Ulusal Akustik Kongresi
ODTÜ Kültür ve Kongre Merkezi, Ankara
26-27 Mayıs 2011

KATLANMIŞ BOYNUZ TİPİ HOPARLÖRLERİN DOĞRUSAL GRAFİK TEKNİĞİ VE SONLU ELEMANLAR MODELLEMESİ İLE TASARIMI

Ayhun ÜNAL¹, Erinç ODABAŞ², Prof. Dr. Mehmet ÇALIŞKAN³

¹ Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye

² Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye; MEZZO Stüdyo Ltd., Ankara, Türkiye
Tel: 0.312 210 25 18, e-posta: erodabas@gmail.com

³ Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Çankaya, Ankara, Türkiye
Tel: 0.312 210 25 72 e-posta: prof.mehemetcaliskan@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada; çeşitli katlanmış boynuz tipi hoparlör kesitlerinin bilgisayar destekli oluşturulması, hoparlör ve sürücü sistemlerinin akustik incelemeleri yer almaktadır. Boynuz tipi hoparlör sürücü çıktısının diyafraim çevresel hızı cinsinden özellikleri, doğrusal grafik modelleme tekniği ile belirlenmiştir. Tasarımın son aşamasında katlanmış boynuz tipi hoparlörün akustik incelemesi, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. Oluşan akustik basınç alanı ve yönelme örgüsü hesaplamalarında ticari bir yazılım paketi kullanılmıştır. Doğrusal, üstel, hiperbolik ve tractrix şeklindeki boynuz tipi hoparlör geometrisi Delphi’de geliştirilmiş bir yazılım ile sonlu elemanlar analiz programı birlikte çalıştırılarak oluşturulmuştur. Bu çalışma; belirli bir frekans aralığında, dört farklı çeşit katlanmış veya katlanmamış boynuz tipi hoparlörlerin akustik performanslarının değerlendirilmesi için yararlı bir çalışmadır.

Anahtar Kelimeler: Katlanmış Boynuz Tipi Hoparlör, Sonlu Elemanlar Modellenmesi.

DESIGN OF FOLDED HORNS BY LINEAR GRAPH TECHNIQUE AND FINITE ELEMENT MODELLING

ABSTRACT

Computer aided shape generation of various types of folded horns and acoustical analysis of coupled horn and driver systems are presented in this study. A new procedure is developed for auto-construction of folded horn contours. Linear graph modeling technique is employed for specification of horn driver output in terms of diaphragm rim velocity of the driver. In the final phase of the design procedure, acoustical analysis of folded horns is carried by means of finite element analysis. A commercial software package is used to calculate directivity patterns and resulting acoustic pressure in free field. Horn geometry consisting of linear, exponential, hyperbolic and tractrix shapes is automatically constructed by parallel running of software developed in Delphi and the finite element analysis program. This study is instrumental to comparatively evaluate acoustical performances of non-folded to folded horn contours of four different types for a specified range of frequencies.

Keywords: *Folded Horn Loudspeakers, Finite Element Modelling*

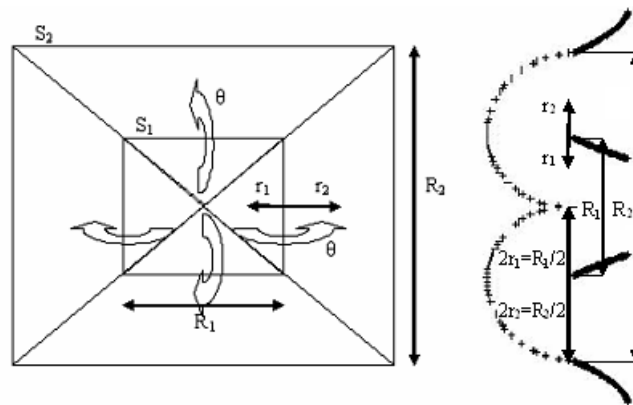
1. GİRİŞ

Hoparlörler, elektromekanik enerji çevrimi ile ses üreten, veya üretilen elektrik sinyalini bir tür mekanik sistem aracılığıyla akustik enerjisine çeviren cihazlardır. Boynuz tipi hoparlörler ise daha yüksek çıkış gücüyle istenilen yönelme örgüsüne sahip ses enerjisi üretmek için kullanılmaktadır. Boynuz tipi hoparlörler sürücü takımı, arka ve ön boşluk, ve boynuz geometrisi olarak dört ana özelliğe sahiptirler. Bu tip hoparlörlerde boynuz geometrisi genişleme oranı ile belirlenmektedir. Boynuz genişleme oranını tanımlamak için birçok matematiksel denklem kullanılmaktadır. Tipik akustik uygulamalarda en çok kullanılan denklemler konik, hiperbolik, üstel ve tractrix eğrisi denklemleri veya bunların permutasyonlarıdır. Bu çalışmada ses dalgalarının değişik katlanmış boynuz tipi hoparlörlerin boynuz içerisinde ilerleyişinin matematiksel modellenmesi değil; sesin yayılımı boynuz geometrisine özgü bir şekilde değişeceği için, katlama bölgesinde uygun bir fonksiyon bulabilmek için yeni yaklaşımların kullanılması amaçlanmıştır. Katlanmış boynuz tipi hoparlörlerde boynuz şeklini oluşturmak için çeşitli matematiksel fonksiyonlar üretilmiş olup, hoparlörün sürücü takımı çıkış gücünün diyafram hızı ve boynuz ağzı basıncı parametreleri cinsinden hesaplanmasında bir hoparlör modellemesi tekniği olan doğrusal grafik tekniği uygulanmıştır. Son olarak da hoparlörün tüm akustik analizi sonlu elemanlar modellemesi yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

2. KATLAMA TİPİ

Boynuz tipi hoparlörler, özellikle düşük frekans bandı için tasarlanmış boynuz tipi hoparlörler ses güçlendirmesi veya aktif gürültü kaldırımı gibi yüksek ve doğrusal ses gücü çıkışına ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Düşük frekans bandlarında çalışan boynuz tipi hoparlörlerin fiziksel boyutları büyük olacağı için hoparlörün boynuzunu katlanılarak fiziksel boyutlarda küçülme sağlanabilmektedir. Bu çalışmada boynuz; ekstenel uzunluğu göz önünde bulundurularak, boyutları sabit bir kutu içine sıkıştırılmak suretiyle katlanmıştır. Katlanmış boynuz üzerindeki kıvrımlar çok keskin olmayıp yanal boyutları yarı dalga boyuna yaklaşacağı şekilde tasarlandığı zaman ses aktarımı hoparlör içerisinde etkili olmaktadır. Katlama işleminin matematiksel modellenmesi esnasında, kıvrımın başlangıç noktasındaki kesit alan dört eşit üçgene bölünmüştür (Şekil 1). Katlama esnasında kıvrımın kesit alanı S_1 den S_2 ' ye yükselmektedir.

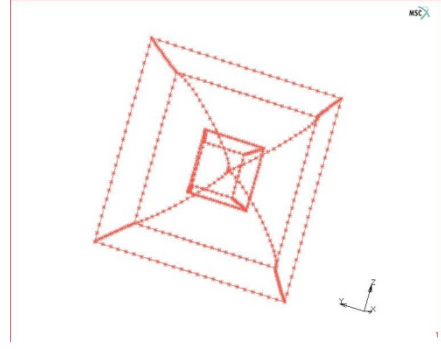
Son olarak MSC.Marc.Mentat yazılımı ile katlama işlemi ve boynuzun sonlu eleman modeli elde edilmektedir (Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5).



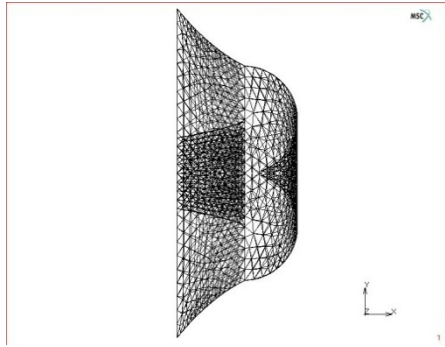
Şekil 1. Boynuzun katlama işlemi öncesinde ve sonrasındaki kesit alanları



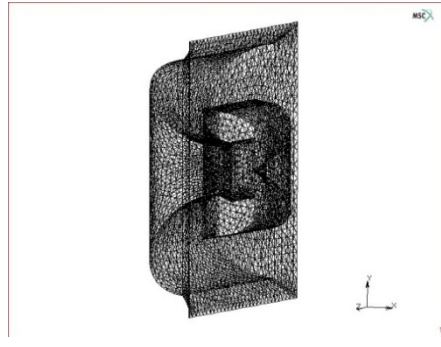
Şekil 2. Katlanmamış konik boynuz sonlu eleman modeli



Şekil 3. Tek katlı üstel boynuz şekil hatları



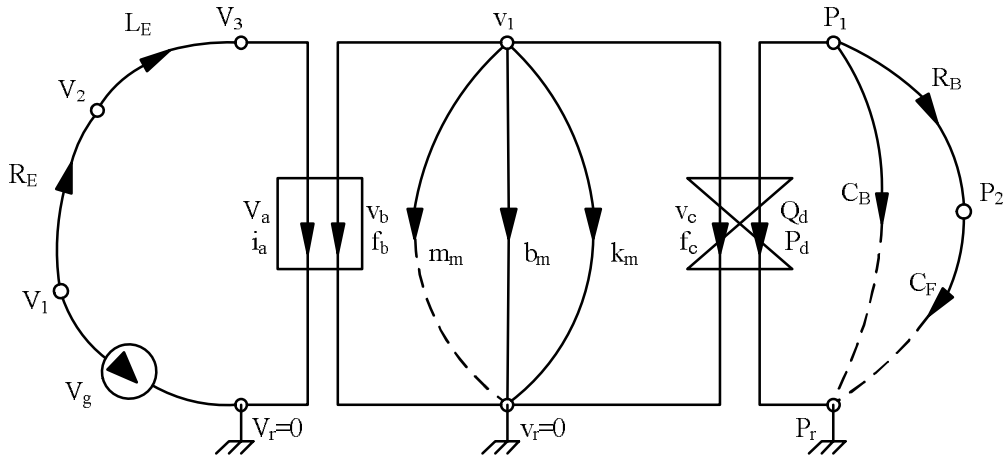
Şekil 4. Tek katlı hiperbolik boynuz sonlu eleman modeli



Şekil 5. Çift katlı tractrix boynuz sonlu eleman modeli

3. BOYNUZ SÜRÜCÜSÜNÜN DOĞRUSAL GRAFİK MODELLENMESİ

Boynuz tipi hoparlör sürücüsünün doğrusal grafik modellemesinde elektriksel, mekanik ve akustik olmak üzere üç kısım bulunmaktadır. Elektriksel kısımda bir A-tipi aktif eleman V_g (ses bobini sürücüsü gerilimi), bir T-tipi pasif eleman L_e (ses bobini indüktörü) ve bir D-tipi pasif eleman R_E (ses bobini direnci) bulunmaktadır. Mekanik kısımda bir A-tipi pasif eleman m_m (Sürücü diyafram sisteminin mekanik kütlesi), bir T-tipi pasif eleman k_m (Süspansiyon sisteminin mekanik direngenliği) ve bir D-tipi pasif eleman b_m (süspansiyon sisteminin sönümlenme katsayısı) bulunmaktadır. Akustik kısımda ise iki A-tipi pasif eleman C_B, C_F (Ön ve arka hacim sığası), iki D-tipi pasif eleman R_B (Arka hacim direnci), R_{AL} (Boynuz boğazı direnci) ve bir A-tipi pasif eleman M_{AL} (Boynuz boğazı sığası) bulunmaktadır. Boynuz boğazının empedansının hesaplanması hem boynuz geometrisine hem de frekansa bağlı olduğu için, bu parametrenin doğrusal grafik modeline etkisi daha sonra bir sonlu elemanlar modelleme yazılımı kullanılarak değerlendirilecektir. Thiele ve Small' un öncülük ettiği çalışmalara dayanan, direk yayıcı hoparlörlerin sistem analizinde sıkça kullanılan yöntemler, sistem yanıt fonksiyonunun hesaplanmasını yayılım empedansının etkisini hesaba katmadan değerlendirmektedir [1-7]. Yayılım empedansı etkisinin hesaba katılmaması, eşdeğer doğrusal grafik modelinin basitleşmesinde çok büyük bir kolaylık sağlayarak yanıt fonksiyonları ve sistem ilişkilendirmesinde büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu sadeleştirmeden sonra doğrusal grafik modeli tekrar analiz edilebilmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Boynuz tipi hoparlörün doğrusal grafik modeli

4. BOYNUZ TİPİ HOPARLÖRLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

MSC. Marc Mentat ile boynuz geometrisinin üç boyutlu modellenmesi ve Delphi arayüzlü bir yazılım ile diyafram hızının hesaplanmasından sonra elde edilen veriler sonlu eleman analizinin yapılması için MSC. ACTRAN yazılımına giriş verileri olarak tanımlanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile boynuz tipi hoparlörün ses basıncı düzeyi dağılımı, yönelme örgüsü ve boynuz içerisinde oluşan mod şekillerinin doğal frekansları analiz edilmektedir. Bu analizde katlama tipi ve boynuz geometrisindeki değişikliklerin yukarıda belirtilen parametrelere olan etkisi değerlendirilmektedir.

a. Boynuz tipi hoparlörlerin boynuz içi doğal frekans analizi

Boynuz tipi hoparlörün boynuz içerisindeki mod şekillerinin doğal frekansları, boynuzu sonlu elemanlar yöntemi ile inceleyerek elde edilmektedir. Bu analizde boynuz geometrisi kesim frekansları 200 Hz ve 2000 Hz olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu analiz seçilen frekans aralığında boynuzun doğal frekans sayısı ile ilgili bilgi vermektedir. Bu frekanslarda oluşan mod şekillerinin yarattığı en belirgin sonuç hoparlörden yayılan seste oluşan renklenmedir. Bir çok düşük frekanslarda etkili olan hoparlörlerin bu sebepten dolayı rezonans problemi vardır. Renklenme, hoparlörden yayılan sesdeki bazı frekans bandlarındaki ses düzeyinin geri kalan bandlara göre daha ön plana çıkmasına sebep olmaktadır. Tablo 1 ve Tablo 2’de farklı katlama tipinde ve sayısında boynuz tipi hoparlörlerin ilk on mod şekillerinin gözlemlendiği doğal frekanslar verilmiştir. Sonuç olarak hoparlörün rezonans frekansları katlama tipine ve katlama sayısına bağlı olduğu görülmektedir. Tablo 1 ve Tablo 2’de görüldüğü üzere katlama sayısı arttıkça seçilen frekans aralığındaki doğal frekans sayısında da bir artma görülmektedir.

Tablo 1. Konik ve üstel boynuz geometrisine sahip hoparlörlerin ilk on doğal frekans değerleri

Mod Şekli	Konik (Hz)			Üstel (Hz)		
	Katlanmamış	Tek Katlı	Çift Katlı	Katlanmamış	Tek Katlı	Çift Katlı
1	409.1	331.1	250.1	475.2	285.0	195.7

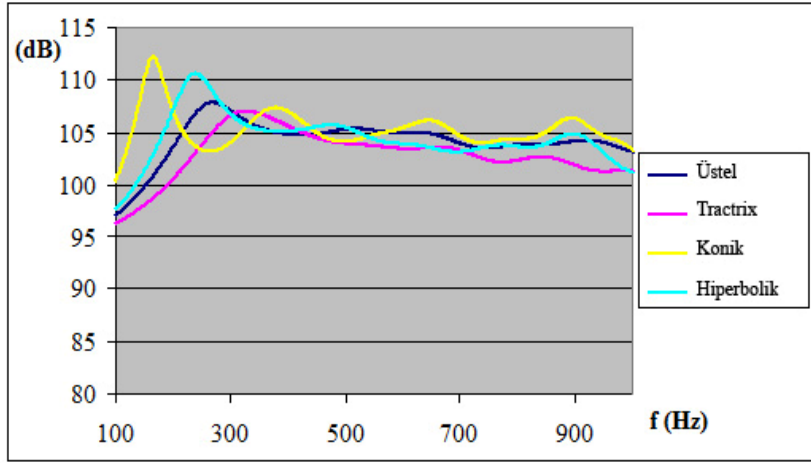
2	434.0	331.2	250.1	475.3	285.1	195.8
3	434.1	399.2	331.4	476.4	406.8	286.5
4	565.2	512.8	383.3	630.3	499.5	362.0
5	594.2	617.9	489.8	817.1	572.4	399.5
6	728.1	665.8	551.2	900.7	605.0	438.3
7	728.4	676.2	551.3	914.2	605.1	438.4
8	810.2	676.3	600.4	915.0	681.1	503.9
9	836.9	798.8	615.9	1024.8	741.5	568.1
10	876.5	799.0	616.1	1035.2	741.7	568.2

Tablo 2. Hiperbolik ve tractrix boynuz geometrisine sahip hoparlörlerin ilk on doğal frekans değerleri

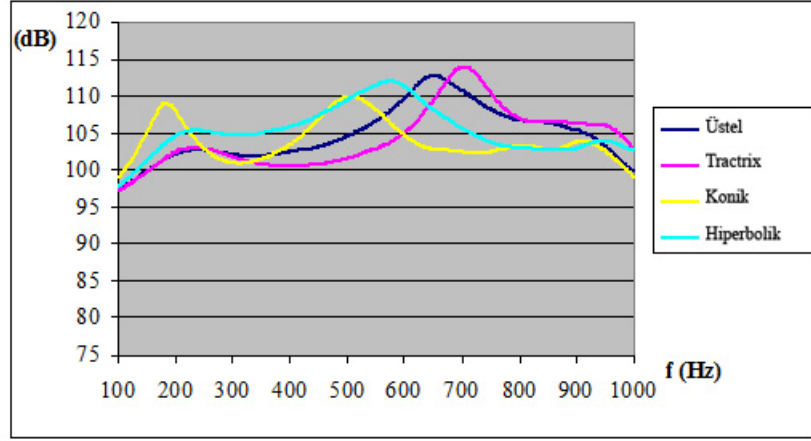
Mod Şekli	Hiperbolik (Hz)			Tractrix (Hz)		
	Katlanmamış	Tek Katlı	Çift Katlı	Katlanmamış	Tek Katlı	Çift Katlı
1	393.9	289.3	210.8	526.9	323.8	225.1
2	474.3	289.4	210.9	527.1	323.9	225.2
3	474.6	417.7	312.1	571.5	468.5	330.6
4	629.6	427.4	376.1	686.2	571.4	384.9
5	734.3	580.9	434.0	913.5	649.8	454.2
6	898.4	601.3	475.0	987.6	707.7	499.6
7	900.1	601.4	475.1	988.2	707.8	499.7
8	900.7	609.5	522.5	990.5	788.8	565.2
9	929.2	713.5	618.5	1148.5	822.6	616.2
10	1010.7	714.0	618.6	1149.9	823.7	616.4

b. Akustik ses basıncı düzeyleri

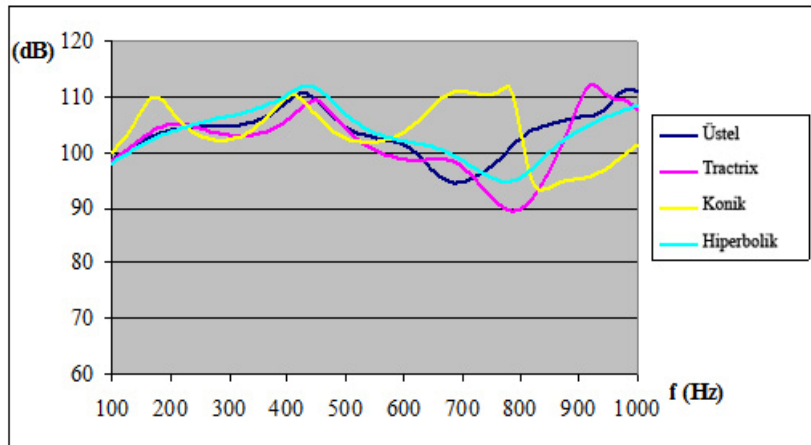
Hoparlörlerin oluşturdukları ses basıncı düzeyleri ve yönelme örgüsü gerçek hayatta anekoik odalarda yapılan ölçümlerle belirlenir. Sayısal yöntemlerde ise bu parametrelerin öngörülmesi, sesin serbest alandaki değerleri göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Sonlu alan noktaları hoparlörün içi ve dışı olmak üzere iki farklı alan üzerine yerleştirilerek sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizde ses basıncı düzeyleri, alıcının ses kaynağından aksel olarak 1 metre uzakta olduğu kabul edilerek gerçekleştirilmiştir. Farklı katlama tipi ve sayısında, ses kaynağından 1 metre uzaklıkta oluşan ses basıncı düzeyi değerleri Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9’da görülmektedir.



Şekil 7. Katlanmamış boynuz tipi hoparlörlerin ses kaynağından aksenal 1 metre uzaklıktaki ses basınç düzeyleri



Şekil 8. Tek katlı boynuz tipi hoparlörlerin ses kaynağından aksenal 1 metre uzaklıktaki ses basınç düzeyleri



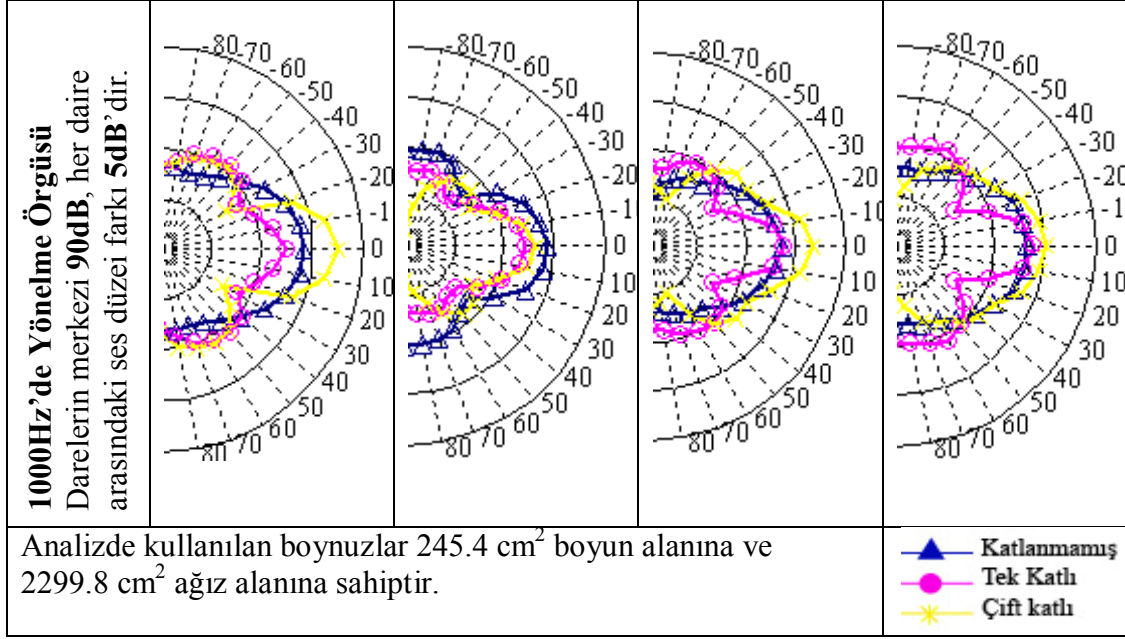
Şekil 9. Çift katlı boynuz tipi hoparlörlerin ses kaynağından aksenal 1 metre uzaklıktaki ses basınç düzeyleri

c. Yönelme örgüsü karakteristiği

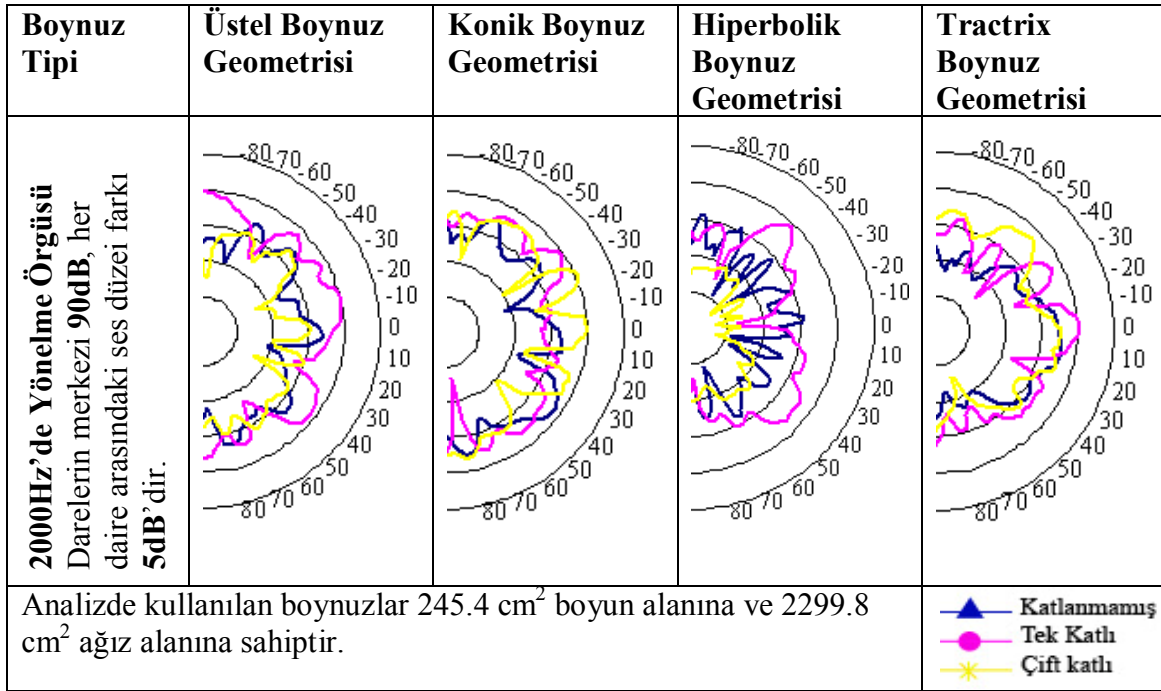
Yönelme örgüsünün değerlendirilmesi için hoparlör boynuzunun çıkış noktasını merkez kabul eden bir küre üzerinde bütün noktadaki ses basıncı düzeylerine bakılmaktadır. Bu noktaların ses kaynağına olan uzaklığı ses kaynağının boyutlarından büyük ve eşit olmalıdır. Boynuz tipi hoparlörlerin farklı katlama tiplerinde yönelme örgüsü grafikleri Tablo 3 ve Tablo 4'te görülmektedir.

Tablo 3. Farklı katlama tiplerinde 250Hz, 500Hz ve 1000Hz'de yönelme örgüsü grafikleri

Boynuz Tipi	Üstel Boynuz Geometrisi	Konik Boynuz Geometrisi	Hiperbolik Boynuz Geometrisi	Tractrix Boynuz Geometrisi
250Hz'de Yönelme Örgüsü Darelerin merkezi 90dB, her daire arasındaki ses düzeyi farkı 5dB'dir.				
500Hz'de Yönelme Örgüsü Darelerin merkezi 90dB, her daire arasındaki ses düzeyi farkı 5dB'dir.				



Tablo 4. Farklı katlama tiplerinde 2000Hz'de yönelme örgüsü grafikleri



Tablo 3 ve 4'e bakıldığında yüksek frekanslarda hoparlörün daha kötü bir yönelme örgüsüne sahip olduğu görülmektedir. Frekans arttıkça yönelme örgüsündeki lobların sayısı artmakta ve sistemin doğrusal olmayan davranışları baz alınan frekansın 4 katındaki kesim frekansın daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu durum hoparlör çıkışındaki havanın aşırı yüklenmesi sonucu oluşan bozulmadan kaynaklanmaktadır. Beranek [8], bozulma oranının f/f_c ye bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Bu çalışmada f_c 200Hz, $4f_c$ 800Hz olarak alınmıştır. Bu da 800Hz üzerindeki frekanslarda yönelme örgüsünde yüksek oranda bozulma olacağını göstermektedir. Ayrıca katlama sayısı arttıkça kıvrım sayısı arttığı için, yüksek frekanslarda oluşan bozulma da daha fazla olmaktadır.

5. DEĞERLENDİRMELER

Boynuz tipi hoparlörlerin doğrusal grafik yöntemi ve sonlu elemanlar analizi ile modellenmesinde ortaya çıkan en belirgin sonuç kullanılan boynuz geometrisi ve katlama sayısının ortaya çıkarttığı renklenmedir. Boynuz geometrisi ve katlama sayısı, hoparlörün bazı doğal frekanslarında yanıt fonksiyonunun etkilenmesine sebep olmaktadır. Bu durum, yanıt fonksiyonunun bazı frekans bandlarında yükselmelere ve azalmalara sebep olmaktadır. Sonlu elemanlar analizinin yapıldığı frekans aralığına bakıldığında katlama sayısı arttıkça frekans aralığında kalan doğal frekans sayısında bir artma görülmektedir. Bu da bu frekans aralığındaki renklemenin artması demektir. Hoparlörün doğal frekansları göz önünde bulundurulduğunda katlama sayısındaki artış düz ve sabit bir yanıt fonksiyonundan uzaklaşmaya sebep olmaktadır.

Yapılan analiz sonrasında ortaya çıkan bir diğer sonuç ise yönelme örgüsünde frekansa bağlı olan değişimlerdir. Frekans yüksekçe yönelme örgüsündeki lobların sayısı artmakta ve yine ses basınç düzeyi yüksek frekanslarda, kaynaktan 1 metre uzaklıktaki her yerde aynı seviyeyi göstermemektedir. Bunun sebebi ise hoparlör çıkışındaki havanın aşırı yüklenmesi sonucu ses dalgası üzerinde oluşan bozulmadan kaynaklanmaktadır. Beranek [8], bu durumu inceleyip ortaya çıkan bozulma oranının kesim frekansının 4 katında daha belirgin bir hale geldiğini ortaya koymuştur. Ayrıca katlama sayısındaki artış boynuz geometrisindeki kıvrım sayısını arttırdığından yüksek frekanslardaki ses dalgalarının bu kıvrımlarda doğrusal olmayan bir şekilde yayılım göstermesinden ötürü, yüksek frekanslardaki yönelme örgüsünde çok fazla değişim görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Small, R. H., "Closed-box loudspeaker systems, part i: Analysis", Journal of the Audio Engineering Society, vol.20(10), pp. 798-808, December 1972.
- [2] Small, R. H., "Direct-radiator loudspeaker system analysis", Journal of the Audio Engineering Society, vol.20(5), pp. 383-395, June 1972.
- [3] Small, R. H., "Closed-box loudspeaker systems, part ii: Synthesis", Journal of the Audio Engineering Society, vol.21(1), pp. 11-18, February 1973.
- [4] Small, R. H., "Simplified loudspeaker measurements at low frequencies", Journal of the Audio Engineering Society, vol.20(1), pp. 28-33, January-February 1972.
- [5] Thiele, A. N., "Loudspeakers in vented boxes: Part 1", Journal of the Audio Engineering Society, vol.19(5), pp. 382-391, May 1971.
- [6] Thiele, A. N., "Loudspeakers in vented boxes: Part 2", Journal of the Audio Engineering Society, 19(6):471, June 1971.
- [7] Thiele, A. N., "Loudspeakers, enclosures and equalisers. In Proceedings of the Institution of Radio and Electronics Engineers", vol. 34, pp. 425-448, November 1973.
- [8] Plach, D.J. "Design Factors in Horn-Type Speakers", J. Audio Eng. Soc., Vol. 1, pp. 276-281, October 1953.