

T.C.

BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ

**KİŞİSEL SES UYGULAMARI İÇİN
PARAMETRİK DİZİLERİN İNCELEMESİ
MODELLEMESİ VE DİZAYNI**

Yüksek Lisans Tezi

SEÇKİN ÇAĞIL NUHUT

İSTANBUL, 2016

T.C.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SES TEKNOLOJİLERİ
KİŞİSEL SES UYGULAMALARI İÇİN
PARAMETRİK DİZİLERİN İNCELEMESİ
MODELLEMESİ VE DİZAYNI

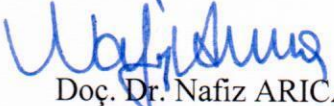
Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Mehmet Berke GÜR

İSTANBUL, 2016

T.C.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SES TEKNOLOJİLERİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

Tezin Adı: Kişisel Ses Uygulamaları İçin Parametrik Dizilerin İncelemesi Modellemesi
ve Dizaynı
Öğrencinin Adı Soyadı: Seçkin Çağıl NUHUT
Tez Savunma Tarihi:

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları yerine getirmiş olduğu Fen Bilimleri
Enstitüsü tarafından onaylanmıştır.


Doç. Dr. Nafiz ARICA
Enstitü Müdürü
İmza

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları yerine getirmiş olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Yahya Burak TAMER
Program Koordinatörü
İmza



Bu Tez tarafımızca okunmuş, nitelik ve içerik açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak
yeterli görülmüş ve kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmzalar

Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Mehmet Berke GÜR



Üye
Yrd. Doç. Dr. Yahya Burak TAMER



Üye
Doç. Dr. Can KARADOĞAN



Aileme...

ÖZET

KİŞİSEL SES UYGULAMALARI İÇİN PARAMETRİK DİZİLERİN İNCELEMESİ MODELLEMESİ VE DİZAYNI

Seçkin Çağıl Nuhut

Ses teknolojileri

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Mehmet Berke Gür

Temmuz 2016, 51 sayfa

Parametrik diziler, düşük frekanslarda oldukça yönlü ses yayınları üretmek için kullanılabilen ses kaynaklarıdır. Bu diziler birbirlerine çok yakın frekanslarda iki yüksek şiddette ultrasonik sinyaller yayarak duyulabilen sinyaller üretirler şeklinde modellenirler. Bu sinyaller, bireysel ultrasonik vericilerin ışıma genişliğine bağlı olarak oldukça yönlüdür. Ultrasonik dalgaların yayılma ortamı ile doğrusal olmayan etkileşimi, mesafelere yayılabilen ve duyulabilen sinyaller oluşturur. Bu tezde; parametrik diziler için teorik modellemeler ve sayısal benzetim sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilecek, elde edilen sonuçların gerçeğe yakınlığı tartışılacaktır. Yönselliği sayısal olarak değiştirilebilen parametrik diziler için teorik tasarım konularına değinilecek ve karşılaştırılması muhtemel problemler detaylandırılacaktır. Bu tez çalışmasının amacı parametrik dizilerin teorik modellemesini yaparak bu modellemeler yardımıyla teorik bilgilendirmeye sahip olmaktır.

Anahtar Kelimeler: Parametrik Dizi, Parametrik Dizi Hoparlörü, Ses Mühendisliği

ABSTRACT

ANALYSIS MODELLING AND DESIGN OF PARAMETRIC ARRAYS

Seçkin Çağıl Nuhut

Sound Technology

Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mehmet Berke Gür

July 2016, 51 pages

Parametric arrays are sound sources that can be used to generate highly directional audio broadcasts at low frequencies. These arrays are modelled as they produce audible signals by broadcasting ultrasonic signals at two high intensities that are at very close frequencies to each other. These signals are quite directional depending on the beam width of individual ultrasonic transducers. The non linear interaction of ultrasonic waves with propagation medium generates signals that can propagate to distances and that can be audible. In this thesis, theoretical modelling for parametric arrays and simulation results will be compared. The closeness of result obtained to the reality will be discussed. The theoretical design subjects for parametric arrays the directionality of which can be changed numerically will be mentioned and the problems likely to be encountered will be detailed. The purpose of this thesis is to theoretically model the parametric arrays and to get theoretical information with the help of these modellings.

Keywords: Parametric Array, Parametric Loudspeaker, Sound Engineering

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER	vii
KISALTMALAR	viii
SEMBOLLER	ix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. TEORİ.....	5
3.1 WESTERVELT TEOREMİ	5
3.2 BERKTAY TEOREMİ	6
3.3 İNTEGRAL METODU	7
4. TEORİK TASARIM.....	10
4.1 IŞIMA YÖNLÜLÜK FONKSİYONU	11
4.2 DİZİN İŞARET İŞLEME	11
4.2.1 Işıma kontrolü	13
4.2.2 Ana ışımaya alanı keskinliği.....	17
4.2.3 İkincil ışımaya alanının elenmesi	21
4.2.4 Yan ışımaya alanlarının baskılanması	25
4.3 MODÜLASYON BİLGİSİ.....	26
4.4 RAYLEİGH MESAFESİ VE SÖNÜMLENME MESAFESİ.....	28
4.5 ULTRASONİK SÖNÜMLENME KATSAYISI.....	30
5. SAYISAL BENZETİMLER.....	33
6. BULGULAR.....	36
7. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	38
KAYNAKÇA	40
EKLER.....	49

ŞEKİLLER

Şekil 3.1: Koordinat sisteminde kaynak ve gözlemci noktası gösterimi	9
Şekil 4.1: Bireysel zaman gecikmesi eklenen UV'ler grafiği	12
Şekil 4.2: 0 dereceye yönlendirilmiş ışıma yönlülük fonksiyonu görseli	15
Şekil 4.3: 30 dereceye yönlendirilmiş ışıma yönlülük fonksiyonu görseli	16
Şekil 4.4: 45 dereceye yönlendirilmiş ışıma yönlülük fonksiyonu görseli	16
Şekil 4.5: UV'ler arası iç boşluğun UV çapına eşit olma durumu.....	18
Şekil 4.6: UV'ler arası iç boşluğun UV yarıçapına eşit olma durumu	19
Şekil 4.7: Maximum değerde UV sayısı ve $d=a$ durumu	19
Şekil 4.8: Maximum değerde UV sayısı ve $d=a/2$ durumu	20
Şekil 4.9: UV'lerin $d=a$ ya göre konumlandırılması.....	20
Şekil 4.10: UV'lerin $d=a/2$ ye göre konumlandırılması.....	21
Şekil 4.11: 30 dereceye yönlendirilmiş ışıma $d=a$ durumu.....	23
Şekil 4.12: 30 dereceye yönlendirilmiş ışıma $d=a/2$ durumu.....	23
Şekil 4.13: 30 dereceye yönlendirilmiş ışıma $d=a$ durumu.....	24
Şekil 4.14: 30 dereceye yönlendirilmiş ışıma $d=a/2$ durumu.....	24
Şekil 4.15: Ultrasonik alanın bölümleri	28
Şekil 4.16: Farklı taşıyıcı frekanslar ve yarıçaplar için <i>Rayleigh</i> mesafeleri.....	29
Şekil 4.17: Ultrasonik sönümlenme katsayısının frekans ve sıcaklık ilişkisi	31
Şekil 4.18: Ultrasonik sönümlenme katsayısının nem değerlerine göre değişimi	32
Şekil 5.1: Teorik ve metot sonuçlarının mesafe-ses basıncı grafiği	35

KISALTMALAR

KZK	:Khoklov-Zabolotskaya-Kuznetsov
PDH	:Parametrik dizi hoparlörleri
UI	:Ultrasonik ışırma
UV	:Ultrasonik verici

SEMBOLLER

dB	:Desibel
f	:Frekans
Hz	:Hertz
kHz	:KiloHertz
ms	:Milisaniye
SPL	:Ses basınç şiddeti

1.GİRİŞ

Uzun bir zaman aralığında gelişerek günümüze gelen geleneksel hoparlörler bulunduğu ortamı sesle doldurmakta gayet başarılı iken sesi yönlendirmede zayıf kalmaktadır. Bu noktadaki probleme yanıt olarak parametrik dizi hoparlörleri (PDH) günümüzde popüler hale gelmiştir. PDH su altı uygulamaları, askeri uygulamalar, aktif gürültü kontrol sistemi, kişisel eğlence ve ev eğlencesi gibi birçok kullanım alanına sahiptir. Ses, fiziği gereği üç boyutta hareket etme eğilimi olduğundan bu gerek iç mekanlarda gerek dış mekanlarda gürültü problemlerine ve hedef bölgeye sağlıklı bir şekilde sesin iletilmemesi problemine yol açar. Kişisel dinleme her ne kadar kulaklık materyali ile çözülsün de, uzun süreli veya yüksek ses basıncı seviyesinde kullanıldığında kulak yapısında kalıcı fiziksel etkilere yol açmaktadır. Bu noktada devreye giren PDH sesin sadece hedeflenen bölgeye iletilmesini amaçlar. PDH modellemesi, birbirlerine çok yakın frekanslarda iki yüksek şiddette ultrasonik sinyaller yayarak, bu iki sinyalin havadaki girişiminden yönlülüğü hayli yüksek duyulabilir sinyaller üretirler şeklinde tanımlanır (Kamakura 1984). Birebir aynı olmamakla birlikte, PDH konusunda F.Joseph Pompei, Nobuo Tanaka ve Motoki Tanaka, Masahide Yoneyama gibi bilim insanları çalışmalar yapmış ve kullanılabilirliğini test etmişlerdir. Literatüre bakıldığında kişisel evde ses dinleme başlığı altında sesin yönselliğinin değiştirilmesi konusu eksik bir nokta olarak tespit edilmiştir.

Bu tezin teorik çalışmasında ve teorik tasarım bölümünde yapılan tüm çalışmalar PDH'nin kişisel evde ses dinleme alanında kullanımı üzerine kurulmuş ve gerekli hesaplamalar bu minvalde yapılmıştır. Bu tezde, sesin bir ultrasonik vericiden dinleyicinin bulunduğu ortama ses aktarımında sesin bulunduğu hacmi doldurmadan direkt olarak dinleyiciye yönlendirilerek iletilmesi temel alınıp, gürültü problemlerinin önüne geçilmesi ve kişiye özel ses dinleme imkanı sunulması hedeflenmiştir.

Geçmişte yapılan çalışmalara bakıldığında her yeni yapılan araştırma bir öncekini geliştirmek ya da yeni bir kullanım alanı açmak adına yapıldığı gözlemlenmiş ve bu tezde kişisel evde ses dinleme başlığı altında PDH tasarlanması amacı ile teorik çalışmalara yer verilmiştir.

Giriş bölümüne takiben 2. Bölümde literatür taramasına, 3. Bölümde teorik bilgilere, 4. Bölümde PDH'nin teorik olarak tasarımına, 5. Bölümde sayısal benzetimler 6. Bölümde elde edilen verilerin değerlendirilmesine ve son bölümde ise elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

2.LİTERATÜR TARAMASI

Westervelt'in parametrik dizileri keşfiyle (Westervelt 1975) Hamilton ve Blackstock (1998) gibi bilim insanları PDH yönlülüğü ve bant genişliklerini arttırma gibi katkı sağlayıcı çalışmalarda bulunmuşlardır. Su altı uygulamaları için doğrusal olmayan akustik dalganın yayılımında teoriksel çalışmalar ve araştırmalar yapılmıştır (Berklay 1965) (Hamilton 1984). Bennett ve Blackstock (1975) sesin dağılmadan sadece hedef bölgeye ulaştırılması amaçlı, yüksek yönselliğe sahip iki birincil dalganın havadaki girişiminden doğan fark frekansı temelli deneysel araştırmalara öncülük ederek kanıtlamışlardır. Optimum çalışan bir PDH yapımında ilk adımları atan Yoneyama (1983) ve Aoki (1994) gibi bilim insanları, sesin havadaki doğrusal olmayan girişimi ilkesini baz alan bir PDH üretirken seste duyulabilir bozulma, ultrasonik ışımaya maruz kalma, güç tüketimi gibi konulardaki problemlerle karşılaşmıştır. Bu engeller farkındalığında ilk en uygun değerdeki prototip PDH Pompei (2002) tarafından geliştirilmiştir.¹

PDH'nin askeri uygulamaları arasında, deniz altı haberleşmede (Coates 1996), (Loubet 1996), (Kopp 2000), deniz altı zeminin yapısının görüntülenmesinde (Kozaczka 2010), denizaltı mesafe ölçümünde (Kritz 1977) ve deniz derinliğinin ölçülmesinde (Nichols 1971) yer almaktadır. Haupt (2005) gömülü mayınların buldukları konumların tespitinde, gizli silahların konum tespitinde (Heyman ve diğerleri 2005), (Castianes 2005), (Rudd 2008), (Hinders 2009), sismolojide (Reacock 2005), gibi kullanım alanları mevcuttur. Ses kirliliği yaratmadan parametrik hoparlörler kullanılarak yayalara sesli talimatlar iletilmesinde ve güvenliklerinin sağlanmasında PDH'nin rolü bulunmaktadır. (Miyachi 2006) ,(Miyachi 2007), (Miyachi 2010), (Nakatani 2008), (Kamakura 2008). Eğlence sektöründe sesin yeniden üretimi ile hedef konuma ulaştırılması ve üç boyutlu ses sistemlerinde (Johannes 2009), (Rohannes 2010), (Masayoshi 2010), (Greff 2010), (Tan 2012), (Aoki 2012), (Sugibayashi 2012), oyunculara yönelik binaural ses üretiminde (Gan 2011), interaktif ortamlarda sesin görselleştirilmesi sistemleri (Wright

¹ Pompei, F.J., 2002. Sound From Ultrasound: The parametric array as an audible sound source. *Doktora tezi*. Massachusetts Institute of Technology

2007), (Namakura 2009), (Kimura 2011), yüz tanımlama eklentisiyle tanımlı kişiyi mekanik olarak dönerek takip eden ve ses aktarımı sağlayan PDH (Mizoguchi 2002), (Ishii 2007), telekonferans görüşmelerinde kişiye özel ses aktarımı sağlayıp ortamda ses kirliliğine yol açmadan konuşmacıların birbiri ile iletişimde sağlıklı bir görüşme ortamı yaratan PDH (Nakadai 2005), (Svanfeldt 2005). Tıptaki kullanım alanları arasında, genlik modülasyonlu sesin tragus kemiğine iletimi ile duyum ölçümü (Okamoto 2003), bir diğer taraftan PDH'nin hormonlar üzerindeki etkisi (Lee2010), PDH ve insan vücudu arasındaki kısa bir mesafede endrokronolojik fonksiyonların gözlemi (Lee 2011), PDH'nin zihinsel işlev esnasındaki psikolojik fonksiyonlara etkisi (Lee 2011) gibi konulara değinilmiş ve bilimsel yazımlar yayınlanmıştır. PDH, ışıma alanı dışında kullanılan bölgelerdeki gürültü seviyesini artırmadan hedeflenen bölgedeki ses basınç şiddetini azaltmada, akustik dalga reflektörü kullanılarak (Tachi 2009), ya da dalga reflektörü kullanılmaksızın, aktif gürültü kontrol sistemi olarak da kullanılabilir (Kidner ve diğerleri 2006), (Tanaka ve Kajikawa 2014), (Shi 2013). PDH'ni mekanik olarak çevirmeden, dijital olarak yönlendirilebilen bir ses ışıması yayan PDH fikrini ortaya sunarak üzerinde yaptıkları deneylerle çalışırılığını kanıtlamışlardır (Tanaka ve Tanaka 2010), (Tanaka 2014).

Nakashima (2005) ve Limei Xu ve Xuesheng Li (2010) günümüzde sıklıkla kullanılan cep telefonlarına yerleştirdiği PDH ile kişisel ses dinleme konusuna yenilik katmıştır. Daha sonra kişisel ses dinleme başlığı altında PDH kişisel kullanım amaçlı gözlük (Dong ve diğerleri 2012) gibi aksesuarlara monte edilerek kullanım alanına yenilikler katılmıştır. Günümüzde halen daha PDH' nin teorik çalışması, sinyal işleme teknikleri, duyulabilir ses bozunması, güç tüketimi ve zayıf bas bölgesi cevabı gibi konular birçok bilim insanı tarafından araştırılmakta ve geliştirilmeye devam etmektedir.

3.TEORİ

Parametrik dizilerin incelenmesi, modellenmesi ve dizaynını daha iyi kavrayabilmek için teorik olarak incelenmesi gerekmektedir. Bilimsel yazımlar içerisinde bu teoremin menşei olan *Westervelt* teoremi, Berktaç teoremi ve integral metodu bulunmaktadır. Aşağıdaki kısımlarda, belirlenen modeller incelenecek ve bu çalışmalar, gerçek ortamlardaki PDH'nin kullanımları için benzetim sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

3.1 WESTERVELT TEOREMİ

Parametrik dizinin ortaya çıkışı yaklaşık 50 yıl önce *Westervelt*'in "sesin sesle saçılımı" çalışmasına dayanır. *Westervelt*, *Lighthill*'in "*arbitrary fluid motion*" denklemini esas alarak, doğrusal olmayan girişim tarafından üretilen ikincil dalgaların ses basıncının hesaplanmasını hedefleyen, homojen olmayan dalga denklemini türetmiştir (*Westervelt* 1957).

$$\nabla^2 p_s - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p_s}{\partial t^2} = -\rho_0 \frac{\partial q}{\partial t} \quad (3.1)$$

Bu denklemde ∇^2 *Laplacian* operatörü, p_s ikincil dalganın ses basıncı, ρ_0 hava yoğunluğu, c_0 ses hızı, q ise kaynak mukavemet yoğunluğunu gösterir. Havadaki doğrusal olmayan dinamikler sonucu denklemde bulunan q kaynak mukavemet yoğunluğu denklem (3.2) gösterildiği gibi yazılır.

$$q = \frac{1}{\rho_0^2} \frac{\partial}{\partial t} \left(p_p^2 \right) \left[1 + \frac{\rho_0}{2c_0} \left(\frac{\partial^2 p_p}{\partial p^2} \right)_{\rho=\rho_0} \right] \quad (3.2)$$

Westervelt'in çıkarımında iki birincil dalga eşit genlikte ve saçılım sırasında eşit sönümlenme katsayılarına sahip olduğu ve bu iki birincil dalganın paralel olduğu varsayılır ve birincil dalgaların oluşturduğu ışımının eksen üzerindeki saçılımı ifadesi

tanımı denklem (3.3) deki gibidir. Denklemde ω_1 birinci dalganın açısal frekansı, ω_2 ikincil dalganın açısal frekansı, α_0 dalganın sönümlenme katsayısını ifade eder.

$$p_i(r,0) = p_0 e^{-\alpha_0 r} [\cos(\omega_1(t-r/c_0)) + \cos(\omega_2(t-r/c_0))] \quad (3.3)$$

Kaynak ve gözlemci noktaları arasındaki ve sönümlenme mesafesinden daha uzak alanda ışınım yapan iki birincil paralel dalganın havadaki girişiminden meydana gelen fark frekansının basıncı denklem (3.4) deki gibidir. Burada β doğrusal olmama katsayısı, p_0 başlangıç basıncını pascal cinsinden, w_d iki birincil dalgadan meydana gelen fark frekansının açısal frekansını, ρ hava için ortam yoğunluğunu, k_d fark frekansının dalga sayısını ifade eder.

$$p_d(r, \theta) = \left[\frac{-i\beta p_0^2 w_d^2 e^{-i w_d (t-r/c_0)}}{8\pi\rho c^4 r [i\alpha_0 + k_d \sin^2(\theta/2)]} \right] \quad (3.4)$$

3.2 BERKTAY TEOREMİ

Westervelt'in teorisine Berktaý tarafından genişletilme getirilmiştir. *Westervelt*, iki birincil dalgayı aynı genlikte ve aynı sönümlenme katsayısı ile tanımlarken, Berktaý ışınımı oluşturan iki birincil dalga bileşenlerine ayrı tanımlar getirilmesi gerektiğini öne sürmüş ve çalışmasında birincil ve ikincil dalgaya ayrı genlikler ve ayrı sönümlenme katsayılarını denklem (3.5) te görüldüğü gibi geliştirdiği ifadesinde belirtmiştir.

$$p_i(r, \theta) = p_1 e^{-\alpha_1 r} \cos(\omega_1(t-r/c_0)) + p_2 e^{-\alpha_2 r} \cos(\omega_2(t-r/c_0)) \quad (3.5)$$

Berktaý'ın ifadesinde p_1 birincil dalganın pascal cinsinden basıncını, p_2 ikincil dalganın basıncını, α_1 birincil dalganın sönümlenme katsayısını, α_2 ikincil dalganın sönümlenme

katsayısını ifade eder. Havadaki iki birincil dalganın girişiminden doğan fark frekansının ışıma eksenini üzerindeki basıncı tanımı Berktaý'ın metodu ile denklem (3.6) daki gibidir.

$$p_d(r, \theta) = \frac{p_1 p_2 (w_1 - w_2)^2 S}{4\pi \rho_0 c_0^4 r} \exp(-\alpha r) \frac{1}{\left[(\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_s)^2 + [2(k_1 - k_2) \sin^2(\theta/2)]^2 \right]^{1/2}} \quad (3.6)$$

Denklem (3.21)' de bulunan, w_1 ve w_2 sırasıyla birinci ve ikinci açısal frekanslar, k_1 ve k_2 dalga sayıları devamı S ultrasonik ışıma yapan PDH'nin yüzey alanını, r hedef noktayı (gözlemci noktası) ifade eder ve matematiksel tanımı $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ şeklindedir. Berktaý'ın uzak alan yaklaşımı birçok bilim insanı tarafından kullanılmaktadır (Boullosa 2016, Shi 2016, Tanaka 2010, Ji 2014, Yang 2014).

3.3 İNTEGRAL METODU

Teorik olarak yine Westervelt'in çalışmasına dayanan Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov (KZK) denklemi, sonlu ses ışması atımını, saçılma ve sönümlenme terimleriyle, doğrusal olmayan akustik için nümerik modellemeyi en doğru şekilde tanımlayan denklemdir ve bu denklem bir çok araştırmacı tarafından doğrulanmıştır (Yang 2005, Lam 2014, Tseng 2014, Aoki 1991, Yang 2014, Pompei 2002, Gan 2010, Cervenka 2011, Zhang 2012, shi 2016, Ju 2010). Denklem (3.7).

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z \partial t} = \frac{c_0}{2} \nabla_r^2 p + \frac{\delta}{2c_0^3} \frac{\partial^3 p}{\partial t^3} + \frac{\beta}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2} \quad (3.7)$$

KZK denkleminde eşitliğin sağ tarafı sırasıyla kırınım, doğrusal olmama ve termoviskoz sönümlenme terimleridir. Burada p ses basıncı, z ışıma eksenini, c_0 ses hızı, ρ_0 ortam yoğunluğunu, δ sesin yayılma gücünü ve β doğrusal olmama katsayısı, ∇^2 Laplacian operatörünü ifade eder. KZK denklemi doğrusal benzeri yaklaşımla

çözülmemektedir ve denklem iki bölümden oluşmaktadır. $p = p_1 + p_2$ burada p_1 doğrusal ultrasonik alanı ifade ederken p_2 doğrusal olmayan ultrasonik alanı ifade etmektedir. Denklem (3.7) de doğrusal olmama katsayısı olan β sıfır alındığında doğrusal ultrasonik alan hesaplanabilmektedir.

Denklem (3.7) de p yerine p_1 yazılarak doğrusal ultrasonik alan, doğrusal olmayan p_2 alanın hesaplanmasında kaynak olması amacıyla çözümlenir.

$$\frac{\partial^2 p_1}{\partial z \partial t} = \frac{c_0}{2} \nabla_r^2 p_1 + \frac{\delta}{2c_0^3} \frac{\partial^3 p_1}{\partial t^3} \quad (3.8)$$

Doğrusal olmayan kısmı çözmek için p yerine p_2 yazılır. $x \gg L$ durumunda alan toplamından, yüksek frekansların $H(r)$ birim adım fonksiyonu ve α sönümlenme katsayısına göre düşme frekansı, doğrusal olmayan alan hesaplanması için denklemin son halini verir.

$$p_2 = \frac{\beta p_0^2 a^2}{16 \rho_0 \alpha c_0^4 x} \frac{d^2}{dt^2} E^2(t) \quad (3.9)$$

Denklemde bulunan $E(t)$ modülasyon zarfı terimi, duyulabilir sinyalin zamana göre iki kez integrali alındıktan sonra modülasyon indeksi olan m ile çarpılıp, bir ile toplanmasıyla elde edilir.

$$E(t) = \left[1 + m \iint g(t) dt^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

Zamana göre iki kere türevi alınarak elde edilen modülasyon zarfı terimi aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi ifade edilir.

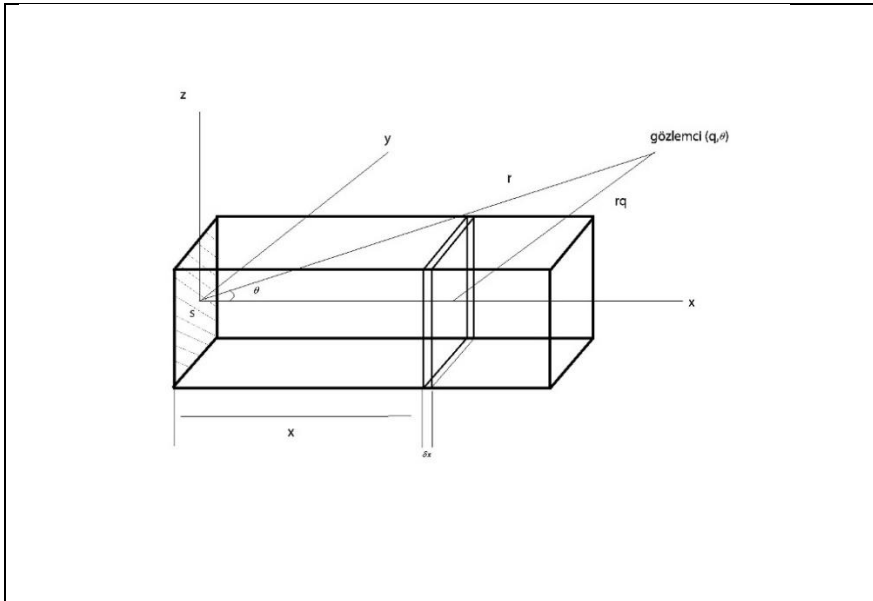
$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} E^2(t) = -2mw_s^2 \sin(w_s(t-r/c_0)) + 2m^2 w_s^2 \cos(w_s(t-r/c_0)) \quad (3.11)$$

Zarf terimi (denklem 3.10) fark frekansının basıncı tanımında (denklem 3.9) yerine yazılarak ifadenin integralden hemen bir önceki haline ulaşması hedeflenir. Kaynak mukavemet yoğunluğunun kesit alanı üzerinde eşit dağıldığı varsayılarak (r, θ) noktası üzerindeki basıncı, kaynak mukavemet yoğunluğunun $x=0$ dan $x=1$ e integrali alınarak ses basıncı ifadesini veren integral metodu denklemi elde edilir. Denklemde r ifadesi PDH'nin bulunduğu konumdan gözlemci noktasına olan konumun uzaklığını ifade ederken, r_q tanımı sanal kaynakların son bulunduğu yerden gözlemci noktasına olan uzaklığı ifade eder ve matematiksel tanımı $r_q = (r^2 + x^2 - 2rx \cos \theta)^{1/2}$ şeklindedir.

$$p_s(r, \theta, t) = \frac{p_0^2 \beta m w_s^2 S}{4\pi \rho_0 c_0^4} \int_0^1 \frac{e^{-\alpha_s r_q} e^{-2\alpha_p x} (\sin \left[w_s \left(t - \frac{r_q}{c_0} \right) - k_s x \right] - m \cos \left[2w_s \left(t - \frac{r_q}{c_0} \right) - k_s x \right])}{r_q} dx \quad (3.12)$$

Tezin teori bölümünde ifade edilen, gözlemci noktası, kaynak noktası, sanal kaynaklar ekseninden alınan kesit alanı gibi matematiksel konumlandırmalar ve sistem geometrisi şekil 3.1 de gösterildiği üzere açıklanmıştır.

Şekil 3.1 Koordinat sisteminde kaynak ve gözlemci noktası gösterimi



Kaynak: Bu şekil Seçkin Çağıl NUHUT tarafından Adobe Photoshop programı yardımıyla hazırlanmıştır.

4. TEORİK TASARIM

Titreşen nesnelere ortamda oluşturduğu dalga hareketinin kulak üzerindeki algılanabilir etkisine ses denir. Sesin oluşması için ortam gereklidir. Günlük hayatta ses, kulak bölgesine her ne kadar hava ortamı ile taşınsa da katı ve sıvı ortamlarda da iletimi mevcuttur. Titreşen bir cisim etrafında bulunan molekülleri sesi yaydığı doğrultuda iter. İtilen doğrultudaki moleküller de yine aynı doğrultuda bir sonraki molekülleri iter ve peş peşe hareketler zinciri açığa çıkar. İtilen bölgelerde moleküller bir araya toplanarak sıkışır, bu sıkışma havanın basıncında artışa sebep olur. Sıkışan moleküller dalganın üretildiği kaynaktan uzaklaştıkça moleküllerin bir önceki konumunda bir düşük basınçlı bölge açığa çıkar ve sesin havada yayılması hareketi oluşur. Bu titreşimlerin bir saniye içindeki tekrar sayısına frekans denir. Birimi *Hertz*dir (Hz). İnsan kulağının duyum aralığı 20 ila 20000 hertz aralığındadır. Sesin hızı 21°C sıcaklıkta saniyede yaklaşık 344 metredir. Ses dalgalarının dalga boyu $\lambda = c/f$ denklemi, yardımıyla, sesin yayılma hızının frekansa bölünmesi ile hesaplanır. λ dalga boyu, c ses hızı, f ise *hertz* ile tabir edilen frekanstır. Sesin yönlülüğü, sesi hava ortamına aktaran ultrasonik vericilerin (UV) çapıyla ve dalga boyuyla alakalıdır. Eğer sesin dalga boyu UV'nin çapından büyük ise ses üç boyutta dağılma eğilimi göstermektedir. Eğer sesin dalga boyu UV'nin çapına eşit ya da daha küçükse ses yönlülüğü daha yüksektir. Örneğin 1kHz lik bir sinüs dalgasının ortamdaki yayılımının her yönde değil de yüksek yönlülükte olması isteniyorsa, UV çapının 1kHz e tekabül eden yaklaşık dalga boyu olan 0.34 m ya da daha büyük olması gerekmektedir. Taşıyıcı frekans ne kadar yüksek ise ışımaya o kadar yönlü olmaktadır. Eğer dalga boyu titreşen UV yüzeyinin çapından küçük ise ışımaya yine yüksek yönsellikte olmaktadır. Bu sebepten PDH' nin tasarımında yüksek frekanslar ve düşük yarıçaplı UV'ler kullanılmaktadır. Teorik tasarım sesin yayılmasının hedeflenen şekilde yüksek yönsellikte olması için teorik durumlar incelenip değerlendirilmiş, önüne geçilmesi gereken ve istenmeyen ışımaya durumları için UV konumlandırılmaları ve tasarımı daha önce bilimsel yazımlarda yapılan çalışmalar araştırılarak en uygun değerlerde konumlandırma saptanmış, dizin işaret işleme yöntemi ile yönlülüğünün değiştirilmesi matematiksel olarak incelenmiştir.

4.1 IŞIMA YÖNLÜLÜK FONKSİYONU

Işıma yönlülük fonksiyonları parametrik diziler için de her yöne bireysel doğrultular ve ortalama değerler olacak şekilde yönlülüğü ifade etmek için kullanılan fonksiyonlardır. Farklı geometrilere özgü tanımlanan ışıma yönlülük fonksiyonlarından üç tanesi belirlenmiş ve ifade edilmiştir. Bu fonksiyonlar; Westervelt'in kendi çalışmasına dayanan analizinden çıkardığı ışıma yönlülük fonksiyonu dikdörtgensel geometriler için denklem (4.1), dairesel parametrik dizi geometrileri için *Bessel* fonksiyonları ile tanımlanan yönlülük fonksiyonu denklem (4.2) ve devamlı üçgensel parametrik dizi geometrileri için tanımlanan denklem (4.3) ışıma yönlülük fonksiyonlarıdır (Ju 2010, Zhang 2012, Tanaka 2010, Shi 2014).

$$D(w) = \frac{1}{1 + i(2k/\alpha)\sin^2(\theta/2)} \quad (4.1)$$

$$D(\theta) = \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (4.2)$$

$$D(\theta) = \left| \frac{\sin \left[\frac{N\pi d(\sin \theta_s - \sin \theta)}{\lambda} \right]}{N \sin \left[\frac{\pi d(\sin \theta_s - \sin \theta)}{\lambda} \right]} \right| \quad (4.3)$$

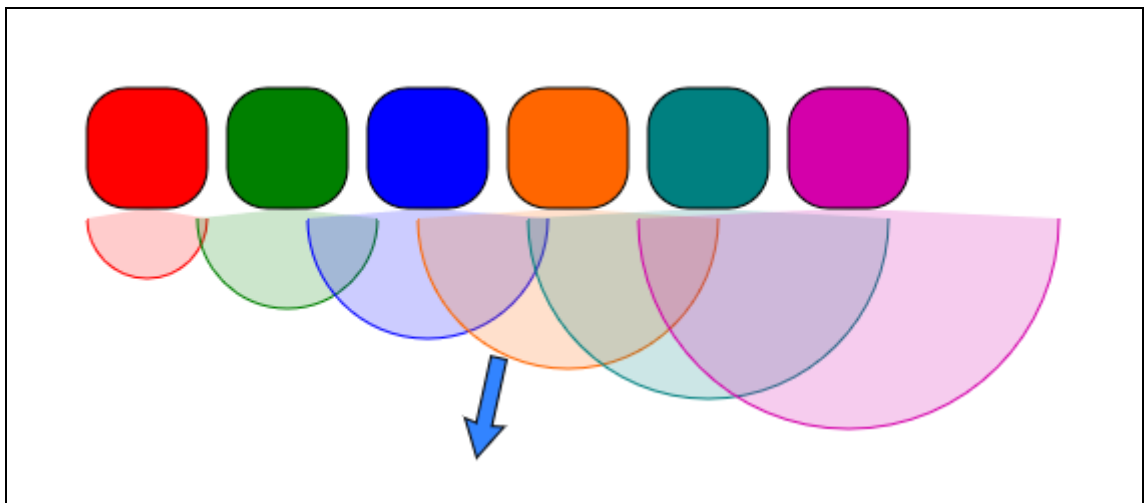
Tez dahilindeki geometriye uygun ışıma yönlülük fonksiyonu olarak devamlı üçgensel geometriler için tanımlı fonksiyon ele alınmış ve devam bölümlerdeki incelemeler denklem (4.3) üzerinden yapılmıştır.

4.2. DİZİN İŞARET İŞLEME

PDH ışıma kontrolü önceden motorlu kontrol üniteleri ya da yansıtıcı yüzeyler yardımı ile yapılmakta idi. Günümüz teknolojisi, PDH nin ışıma kontrolünü mekanik olarak yönlülüğünün değiştirilmesine gerek kalmadan dijital olarak yapılabilmesine olanak sağlar. Dijital olarak yönlülüğü değiştirilebilen PDH literatürde fazlı diziler ismi verilmektedir. Fazlı dizilerde teorik olarak besleme sinyallerine bireysel gecikme yani

zaman farkı eklenerek ışına yönlülüğü değiştirilebilir ve istenmeyen yönelmelere ve ışına yönlülüğü değişimlerine baskı uygulanarak kontrol edilebilir. Genelde radar teknolojisinde kullanımı yaygın olan fazlı dizi tekniğinin çalışma prensibi, UV'lere bireysel faz gecikmesi süresi eklenmesi şeklindedir. İlk UV kaynağına sinyal gönderildikten sonra ikinci UV'ye giden sinyale bir miktar zaman gecikmesi uygulanır. Aynı gecikme, ikinci UV'ye giden sinyal başlangıç süresi kabul edilerek üçüncü UV'ye giden sinyale eklenir ve fazlı dizi bu şekilde bütün UV'lere giden sinyallere bireysel gecikme süreleri eklenerek oluşturulur. Bu teori yardımıyla UV'lere eklenen bireysel zaman gecikmesi, ışına eksenini boyunca yayılan ışının bir eksen etrafında yönlendirilmesine imkan sağlamaktadır. Eğer ultrasonik ses dalgasının yönlülüğü değiştirilirse, bu değişime bağlı olarak duyulabilir sinyalin yönü de aynı şekilde değişecektir. Fazlı dizi sistemleri temelinde UV'lere sürülen sinyallere Şekil 4.1 de görüldüğü gibi bireysel zaman gecikmesi eklenerek işleme tabi tutulması şeklindedir. Yani fazlı dizi aslında parametrik dizideki her bir elemana uygulanan zaman gecikmeli ana sinyalden fazlası değildir. Bunun için her bir UV aynı sinyal çerçevesinde fakat her bir UV için ayrı bir sinyal güçlendirici devre kullanılması ve her bir UV'nin kendine has bir sürücüsü olmalıdır. UV'ler bireysel olarak kontrol edilip ana sinyal bu UV'lere bireysel olarak zaman gecikmesi eklenerek iletildiğinde ana ışına yönlülüğünün değiştirilmesi mümkündür.

Şekil 4.1: Bireysel zaman gecikmesi eklenen UV'ler grafiği



Kaynak : https://en.wikipedia.org/wiki/Phased_array

Teoride ışına yönselliği açısının bireysel zaman gecikmesine bağlı tanımında denklem 4.4 kullanılır (Tan vd. 2004).

$$\sin \theta_s = c\Delta t / d \quad (4.4)$$

Örneğin; fazlı dizi sisteminin UV'ler yardımı ile hava ortamına aktarılan ışına eksenine $\pi / 6$ radyanlık yani 30 derecelik bir açı verilmek istendiğinde, UV kanallarına bireysel olarak eklenmesi gereken Δt zaman gecikmesi denklem 4.4 e göre c ışık hızı 344 alındığında $\Delta t = 7.2 \times 10^{-3}$ milisaniyedir.

4.2.1. Işıma kontrolü

Huygen'in teorisine göre² herhangi bir dalga yayını yapan kaynak, sonsuz sayıda ve bireysel davranabilen yayın kaynağı gibi düşünülerek matematiksel olarak hesaplanabilir. Belirli bir R noktasında ışına eksenini üzerindeki kaynak basıncı ifadesi, Huygen'in teorisine göre

$$p(R) = \frac{dp_0}{R} e^{j(\omega t - kR)} \quad (4.5)$$

şeklindedir denklem (4.5) de görülen dp_0 kaynak genliğini, ω açısal frekansı, k dalga sayısını, j ise sanallık birimini gösterir. Denklem birden fazla kaynak basıncı şeklinde yazılmak istenirse Denklem 4.6 deki gibi toplam formuna bürünür.

$$p(R) = \sum_{i=1}^N p_i \quad (4.6)$$

Eğer hedeflenen R noktası UV'lerin yayın yaptığı ışına eksenini üzerinde değil ve eksenle bir θ açısı yapacak şekilde bir konumda bulunuyor ise, belirlenen R noktası ve

² Pompei, F.J., 2002. Sound From Ultrasound: The parametric array as an audible sound source. *Doktora tezi*. Massachusetts Institute of Technology

belirli θ açısı için bütün denklem formunun açık hali Denklem 4.7 deki gibidir (Hodges 2010).

$$p(R, \theta) = \frac{jw\rho_0 qa}{4\pi R} \operatorname{sinc}\left(\frac{ka \sin \theta}{2}\right) \frac{\sin\left[\frac{N(w\Delta t - kd \sin \theta)}{2}\right]}{\sin\left[\frac{w\Delta t - kd \sin \theta}{2}\right]} X \quad (4.7)$$

$$\exp\left(\frac{jka \sin \theta}{2}\right) \exp\left\{\left[-j\frac{w\Delta t - kd \sin \theta}{2}\right] X(N-1)\right\} e^{j(wt - kR_i)}$$

Denklemde görülen a UV'lerin diyafram çap uzunluğu, d UV'ler arası mesafe, N UV sayısı, R_i ses basıncı hesaplanmak istenen noktanın UV'lere olan bireysel uzaklıkları, Δt UV'lere eklenen zaman farkı, w açısal frekans, k dalga sayısını gösterir. Işıma kontrolü konusu ve devam bölümleri Denklem 4.7 üzerinden incelenecektir.

Denklem eşitliğinin sağ tarafındaki ilk sinc fonksiyonu tek bir kaynak için geçerlilik gösteren terimdir. Devamında karşılaşılan sinüsler oranı ise birden fazla kaynak için geçerli olan terim yani ışıma yönlülük fonksiyonu tek bir kaynak ve birden fazla kaynak olmak üzere iki bölümden oluşuyor gibi düşünülür (Hodges 2010).

$$D(\theta) = D_1(\theta)D_2(\theta) \quad (4.8)$$

Tek bir kaynak söz konusu olduğunda;

$$D_1(\theta) = \left| \operatorname{sinc}\left(\frac{ka \sin \theta}{2}\right) \right| \quad (4.9)$$

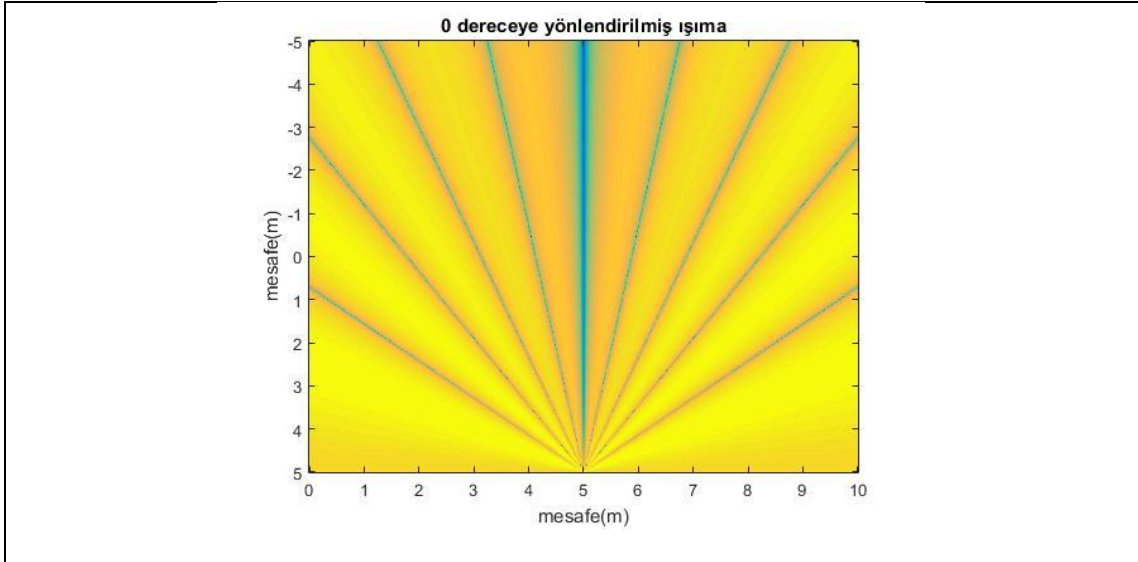
Birden fazla kaynak söz konusu olduğunda;

$$D_2(\theta) = \frac{\left| \sin \left[\frac{N\pi d(\sin \theta_s - \sin \theta)}{\lambda} \right] \right|}{N \sin \left[\frac{\pi d(\sin \theta_s - \sin \theta)}{\lambda} \right]} \quad (4.10)$$

Denklem 4.10 da bulunan $\sin \theta_s$ terimi parametrik dizinin ışına eksen yönlülüğünün ne kadarlık bir açı ile değiştirildiğini gösterir. Eksen yönlülüğünün değiştirilmesi daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi UV'lere giden sinyallere bireysel zaman gecikmeleri eklenerek elde edilir. Bu zaman gecikmelerinin sonucu olan ışına ekseninin değişen yönlülüğünün, yönlenmemiş referans eksen ile yapmış olduğu, açısının hesaplanmasında daha önceki bölümden bilindiği üzere denklem 4.4 kullanılır.

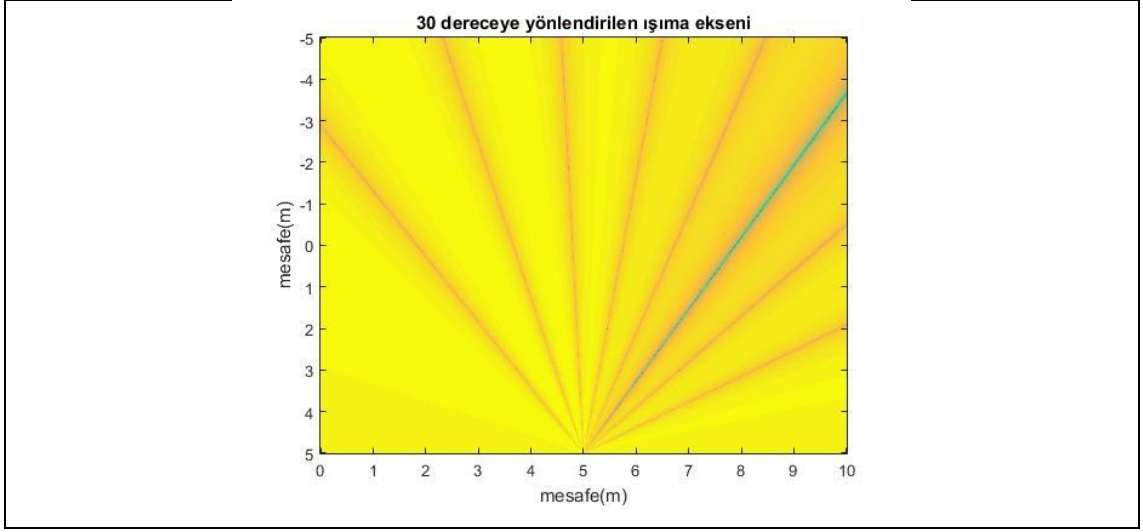
Aşağıdaki şekillerde nümerik sonlu element yazılımında ışına yönlülük fonksiyonu olarak denklem 4.3 kullanılmış ve belirlenen boyutlarda, belirlenen zaman gecikmesi eklenerek yönselliğinin değişimi grafiklerle izah edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 4.2 de yönlülüğü değiştirilmemiş ışına, şekil 4.3 de 30 dereceye yönlendirilmiş ışına şekil (4.4 de 45 dereceye yönlendirilmiş ışınlar görülmektedir.

Şekil 4.2: 0 dereceye yönlendirilmiş ışına yönlülük fonksiyonu görseli



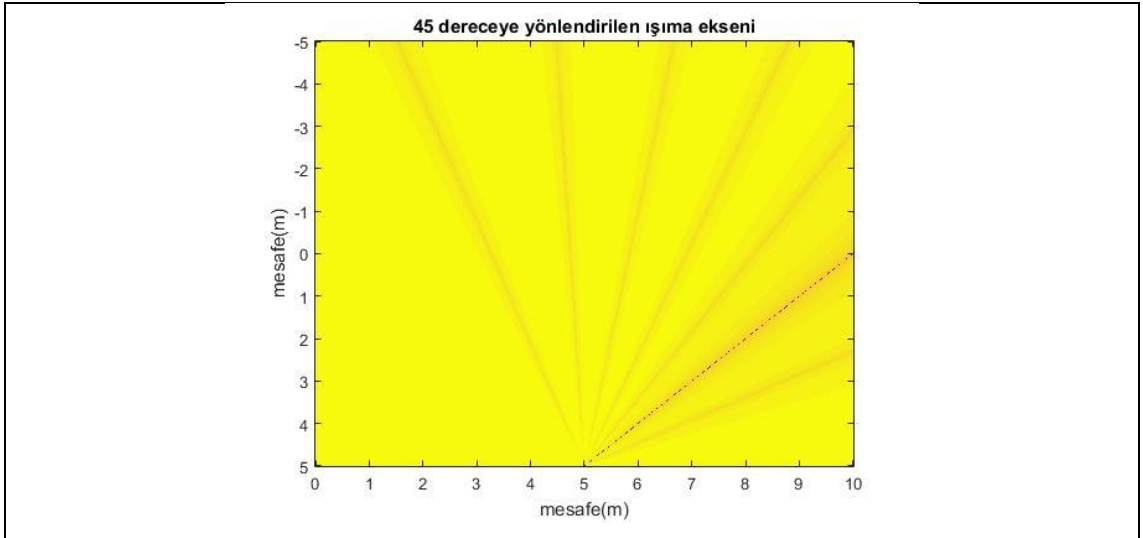
Kaynak: Bu şekil Seçkin Çağıl NUHUT tarafından MATLAB programı yardımıyla hazırlanmıştır.

Şekil 4.3: 30 dereceye yönlendirilmiş ışıma yönlülük fonksiyonu görseli



Kaynak: Bu şekil Seçkin Çağıl NUHUT tarafından MATLAB programı yardımıyla hazırlanmıştır.

Şekil 4.4: 45 dereceye yönlendirilmiş ışıma yönlülük fonksiyonu görseli



Kaynak: Bu şekil Seçkin Çağıl NUHUT tarafından MATLAB programı yardımıyla hazırlanmıştır.

Dizin işaret işleme yöntemi ile ışıma eksenı yönlülüğü değiştirilebilen PDH nin incelenecek bölümleri üç ana başlık altında toplanabilir.

- Ana ışıma alanı genişliği
- Yan ışıma alanları
- İkincil ışımanın elenmesi

PDH'nden yayılan ışımanın sağlıklı bir şekilde hedeflenen noktaya ulaştırılabilmesi için yukarıda bahsi geçen üç başlık altında toplanan önemli konuların analizi söz konusudur.

Ana ışımaya alanı keskinliği hedeflenen konuma sesin geniş ve gittikçe genişleyen veya açılan bir ışımaya şeklinde olmaması gerektiğiyle ilgilenir. Yani ana ışımaya açısı ne kadar dar ise sesin hedef konuma, diğer konumlara dağılmadan, ulaştırılması o kadar sağlıklı ve istenen bir sonuç verecek şekilde olmaktadır.

Yönlünen ses yan ışımaya alanları oluşturur ve yan ışımaya alanlarının bir miktar baskılanması yine hedef konum dışında kalan alanlara sesin taşmaması ve sesin kaba tabirle kirlenmeden hedefe ulaştırılabilmesi için müdahalesi mümkün bir durumdur. İkincil ışımaya konusu bir örnek üzerinden anlatılmak istenirse, teorik olarak bir sinüs dalgası kendisini 2π aralıklar ile tekrar ettiği bilinmektedir. Sinüs dalgasının başlangıç konumu sıfır ise pozitif yöndeki genliğin yani tepe noktasının en yüksek değere ulaşması $\pi/2$ noktasında gözlemlenirken, negatif yöndeki genliğin yani çukur noktasının negatif yöndeki en yüksek değeri $3\pi/2$ noktasında gözlemlenir.

Örneğin; ışımaya eksenini referans alınarak bu eksenle 30 derecelik bir yönlendirme yapılmış bir parametrik dizinin ışımalarının çukur noktası 300 derecede gözlemlenmektedir. Denklem 4.3 den görülebileceği gibi dalga teorik olarak mutlak değer işlemine tabi tutulduğundan 30 dereceye yönlendirilmiş ana ışımaya eksenine sahip ışımaya, eksenin aksi yönünde ve sıfır konumundan -53 derecedeki konumda ana ışımaya alanı dışında kalan bir ikincil ışımaya daha oluşturur. Bu ikincil ışımaya ana ışımaya ile aynı genliktedir. Hedeflenen konumdaki nokta belirli bir mesafede ve ışımaya ekseninin pozitif bölgesinde 30 derecede bulunan bir konuma sahiptir ve bu hedef bölgeye sesin ulaştırılması ve diğer alanlara ya da bölgelere taşmaması hedeflenmektedir. Diğer taraftan, ortaya çıkan, eksenin negatif bölgesinde yer alan ve ana ışımaya ile aynı genlikte bulunan ikincil ışımaya, hedeflenmeyen konumlara aynı ses basıncına sahip ses taşımaktadır ve bu bölgede bulunan ikincil ışımaya ekseninin elenmesi gerekmektedir. Yukarıda 3 alt başlıkta toplanan noktalar takip edilen bölümlerde incelenecektir.

4.2.2. Ana ışımaya alanı keskinliği

PDH nin geometrik yapısında elementlerin iç kısımlarında kalan boş alanın ışımaya genişliğini etkilemesi gibi bir durum söz konusudur. Geleneksel doğrusal olmayan parametrik dizilerde, UV'ler arası mesafe olan d , UV çapı olan a ya sayısal olarak mümkün oldukça yakın değerde ya da daha küçük değerlerde olması gerekmektedir. Bu sayısal yakınlığın sonucu PDH tasarımında ana ışımaya alanı genişliğinin azaltır yönde bir

eğilim göstermektedir. Işıma genişliği bir UV'nin yapısından bağımsız, bütün dizideki UV'lerin yüzey alanı ile ilgilidir ve UV aparat boyutundan bağımsızdır (Tanaka 2010).

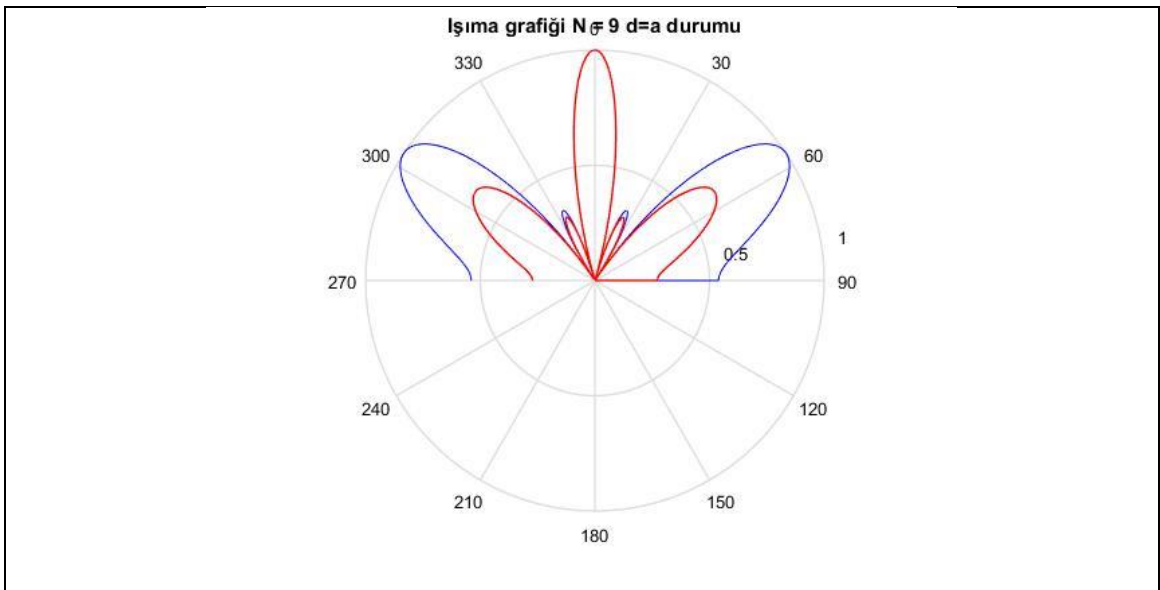
$$\Delta\theta = \sin^{-1}\left(\sin\theta_s + \frac{\lambda}{Nd}\right) - \sin^{-1}\left(\sin\theta_s - \frac{\lambda}{Nd}\right) \quad (4.11)$$

Denklem 4.12 de gösterildiği gibi ana ışımaya alanı genişliği olan $\Delta\theta$ ifadesinin parantez içinde bulunan dalga boyunun, UV sayısı ve UV'ler arası mesafeye bağlı oranından şu çıkarımları yapmak mümkündür.

Eğer ışımadan yayılan dalga boyu azalır ana ışımaya alanı genişliği artar, UV'ler arası mesafe artarsa ana ışımaya alanı genişliği azalacağı gibi yan ışımaya alanlarının ortaya çıkması söz konusudur ve UV sayısı azalır ana ışımaya alanı genişliği artar.

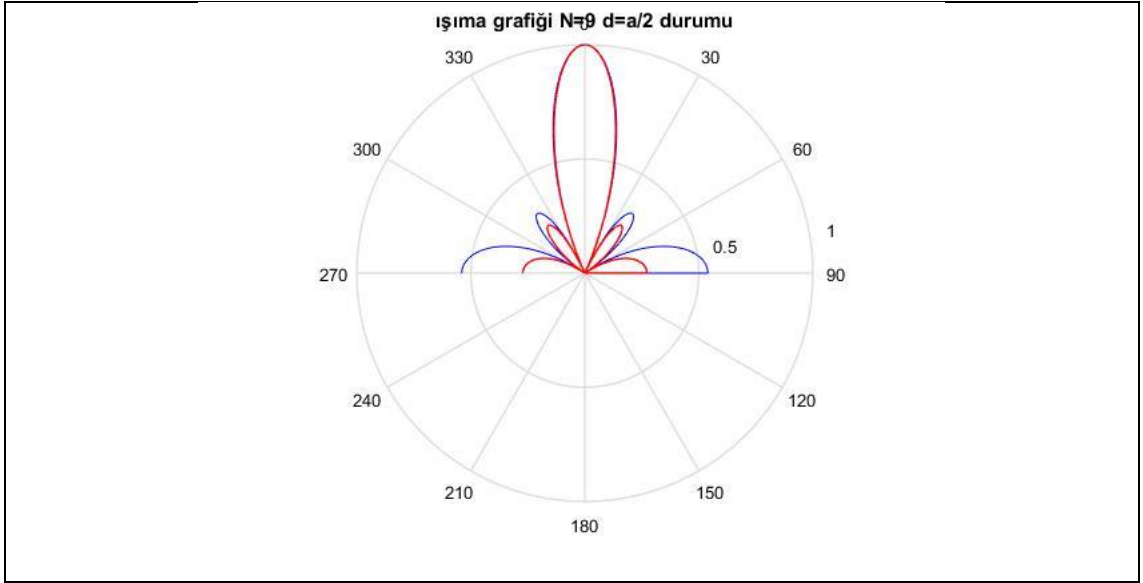
Şekil 4.5 te UV'ler arası mesafe d UV çapı a ya eşit olduğu durumdaki ana ışımaya alanı genişliğini, şekil 4.6 UV'ler arası mesafe d UV yarıçapı a/2 ya eşit olduğu durumdaki ana ışımaya alanı genişliğini, şekil 4.7 UV sayısı belirlenen ölçekte maximum değerini ve d'nin a'ya eşit olma durumunu ve şekil 4.8 UV sayısı belirlenen ölçekte minimum değerini ve d'nin a/2 ye eşit olma durumunda değişen ana ışımaya alanı genişliklerini göstermektedir.

Şekil 4.5: UV'ler arası iç boşluğun UV çapına eşit olma durumu



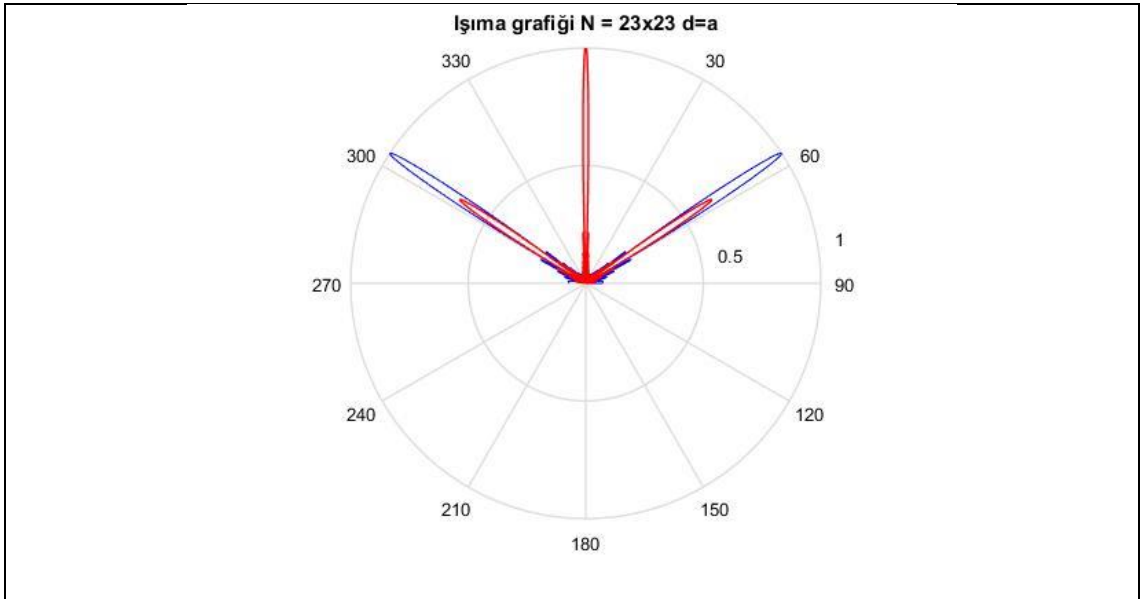
Kaynak: Bu şekil Seçkin Çağıl NUHUT tarafından MATLAB programı yardımıyla hazırlanmıştır.

Şekil 4.6: UV'ler arası iç boşluğun UV yarıçapına eşit olma durumu



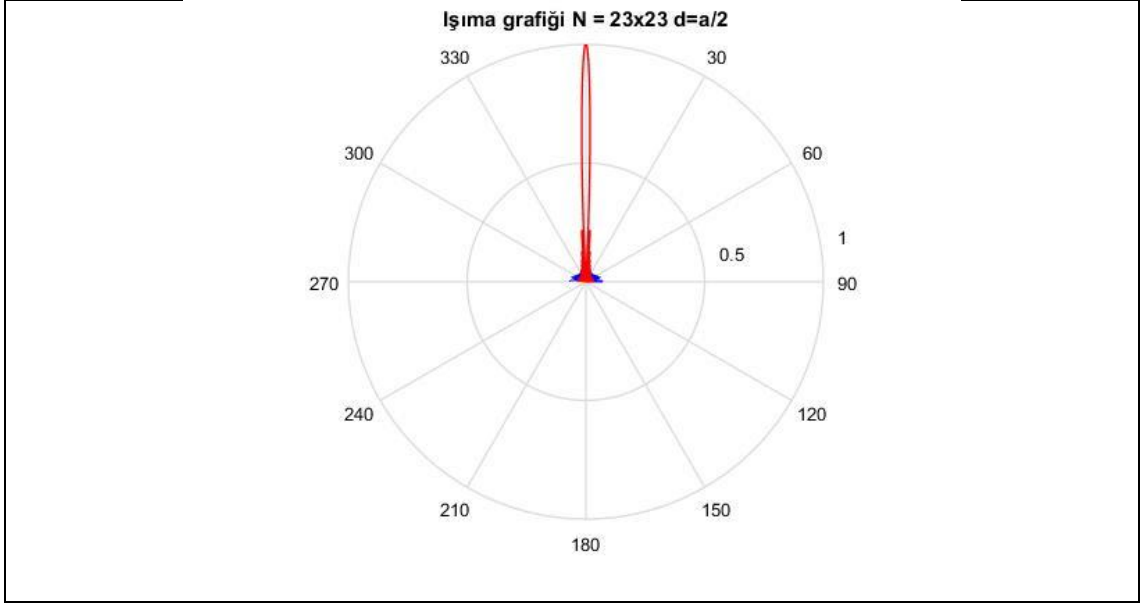
Kaynak: Bu şekil Seçkin Çağıl NUHUT tarafından MATLAB programı yardımıyla hazırlanmıştır.

Şekil 4.7: Maximum değerde UV sayısı ve d=a durumu



Kaynak: Bu şekil Seçkin Çağıl NUHUT tarafından MATLAB programı yardımıyla hazırlanmıştır.

Şekil 4.8: Maximum değerde UV sayısı ve $d=a/2$ durumu

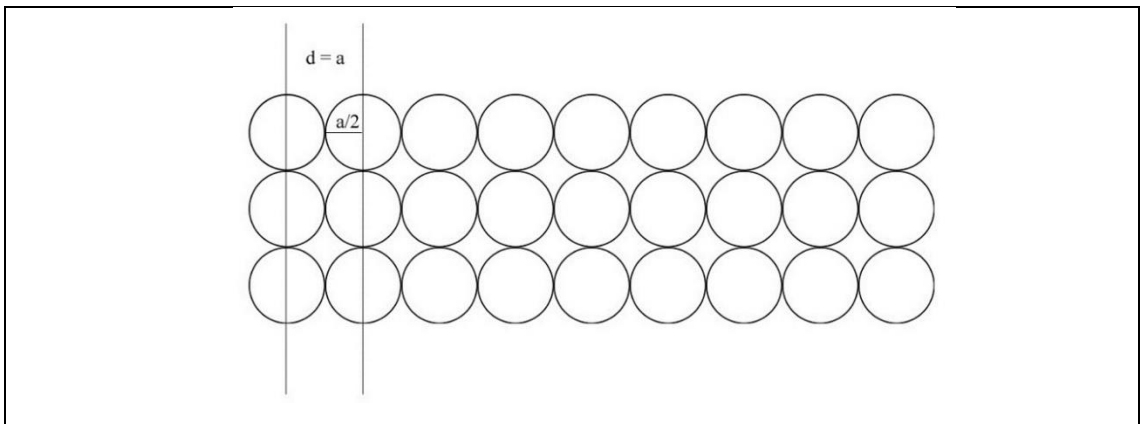


Kaynak: Bu şekil Seçkin Çağıl NUHUT tarafından MATLAB programı yardımıyla hazırlanmıştır.

Bu sebeplerden eğer minimum $\Delta\theta$ darlığında bir ışıma elde edilmek isteniyor ise UV'ler arası iç kısımlarındaki boşluk olan d yi sayısal olarak küçük tutmak yani UV'leri mümkün oldukça yakın konumlandırmak ve/veya UV sayısını artırmak gerektiği görülmektedir. (Gan, Yangi, Tan, Er, 2006)

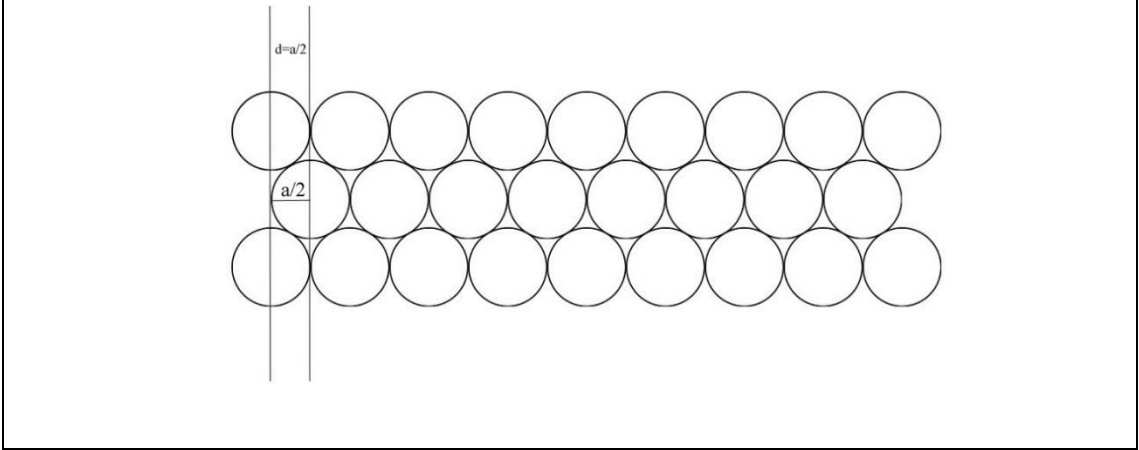
Şekil 4.9 da sürekli dikdörtgenel parametrik dizi geometrisi ve UV'lerin konumlandırılması, şekil 4.10 da sürekli üçgenel parametrik dizi geometrisi ve UV'lerin konumlandırılması verilmiştir.

Şekil 4.9: UV'lerin $d=a$ ya göre konumlandırılması



Kaynak: Bu şekil Seçkin Çağıl NUHUT tarafından Adobe Photoshop programı yardımıyla hazırlanmıştır.

Şekil 4.10: UV'lerin $d=a/2$ yer göre konumlandırılması



Kaynak: Bu şekil Seçkin Çağlı NUHUT tarafından Adobe Photoshop programı yardımıyla hazırlanmıştır.

Eğer UV'ler Şekil 4.9 de görüldüğü gibi konumlandırılırsa ana ışına alanı genişliği, Şekil 4.10 da görülen konumlandırma şekline kıyasla daha geniş olacaktır (Je, Lee 2015).

4.2.3. İkincil ışınımın elenmesi

Fazlı PDH dizi geometrisine bağlı olarak performans göstermektedir. Fazlı dizilerde eksen yönlülüğü değiştirilen ışına performansında en önemli etkenler, ana ışına, ikincil ışına ve ana ışına ile ikincil ışınımın birbirlerine oranıdır. Işına alanının bireysel UV'lerin şeklinden bağımsız, bütün dizinin alanı ile orantılı olduğu teorik bilgisine dayanarak (Yang 2014), UV'ler arası iç boşluk olan d , UV yarıçapı olan a 'ya eşit olduğu durumda, ışına eksen yönlülüğü değiştirilmemiş bir parametrik dizide ana ışına alanı ve yan ışına alanları gözlemlendiği bilinmektedir (Şekil 4.5).

Işına eksen yönlülüğü, dizin işaret işleme tekniği ile UV'lere iletilen sinyallere bireysel zaman gecikmesi eklenerek değiştirilmeye yani yönlendirilmeye başlandığında ikincil ışına ortaya çıkmaktadır. Parametrik dizinin eksen yönlülüğü değişikçe ana ışına büyüklüğü azalırken buna ters orantılı olarak ikincil ışınımın büyüklüğü artmaktadır. İkincil ışına, UV'ler arası iç boşluk olan d , UV yarıçapı olan a 'dan küçük olduğu durumda ortadan kaldırılabilir. Fazlı diziler sistemlerinde ikincil ışına tamamen yok edilmek isteniyor ise d 'nin, kullanılan taşıyıcı ultrasonik frekansa sahip ses dalgasının dalga boyunun yarısından daha az olması gerekmektedir ki şekil 4.9 da görüldüğü gibi daire şeklinde olan UV'ler için bu durum söz konusu değildir. Örneğin; 40 kHz lik taşıyıcı ultrasonik ses dalgasının dalga boyu, ışık hızı olan $c=344$ alınarak

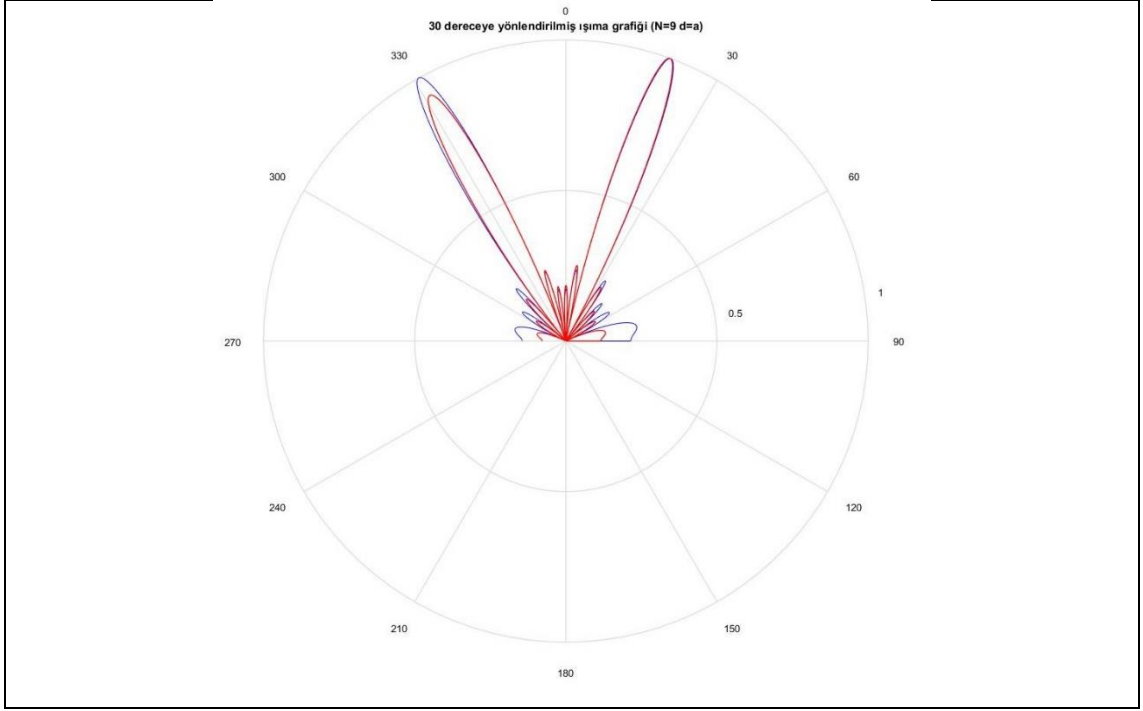
$\lambda = c / f$ formülü yardımıyla hesaplanırsa 0.86 cm çıkacaktır. İkincil ışımının tamamen ortadan kaldırılabilmesi, UV'lerin birbirlerine olan uzaklığı, bu sayısal değerin yarısı olan 0.43 cm den yani yarım santimetreden daha küçük olması ve UV'lerin bu şekilde konumlandırılmasını gerektirmektedir.

Işıma yönü ile eksen arasında kalan açı olan $\beta = \sin \theta$, $\beta = 1/2$ olduğu durumda yani $\beta = d/2a$ olduğu durumda başka bir deyişle eksen yönlülüğünün 30 derece olması durumunda, ana ışıma büyüklüğü ile ikincil ışımının genlik olarak büyüklüğü eşit olmaktadır. İkincil ışımayı ortadan kaldırmak adına yapılacak tasarım harici müdahaleler aynı şekilde ana ışımaya da etki edecek ve hedeflenen konuma sağlıklı yada güçsüz sinyal ulaştırılabilmesinin önüne geçecektir. Bu yüzden Fazlı dizilere sahip PDH nin iyi bir performans gösterebilmesi için ikincil ışımayı tamamen yok etmek yerine uygun değerde bir müdahale uygulayacak şekilde tasarlanması, PDH nin sağlıklı bir performans göstermesi adına mantıklı bir çözüm sunmaktadır (Tanaka 2010).

$$d_{\max} = \frac{\lambda}{1 + \beta_{\max}} \frac{N - 1}{N} \quad (4.12)$$

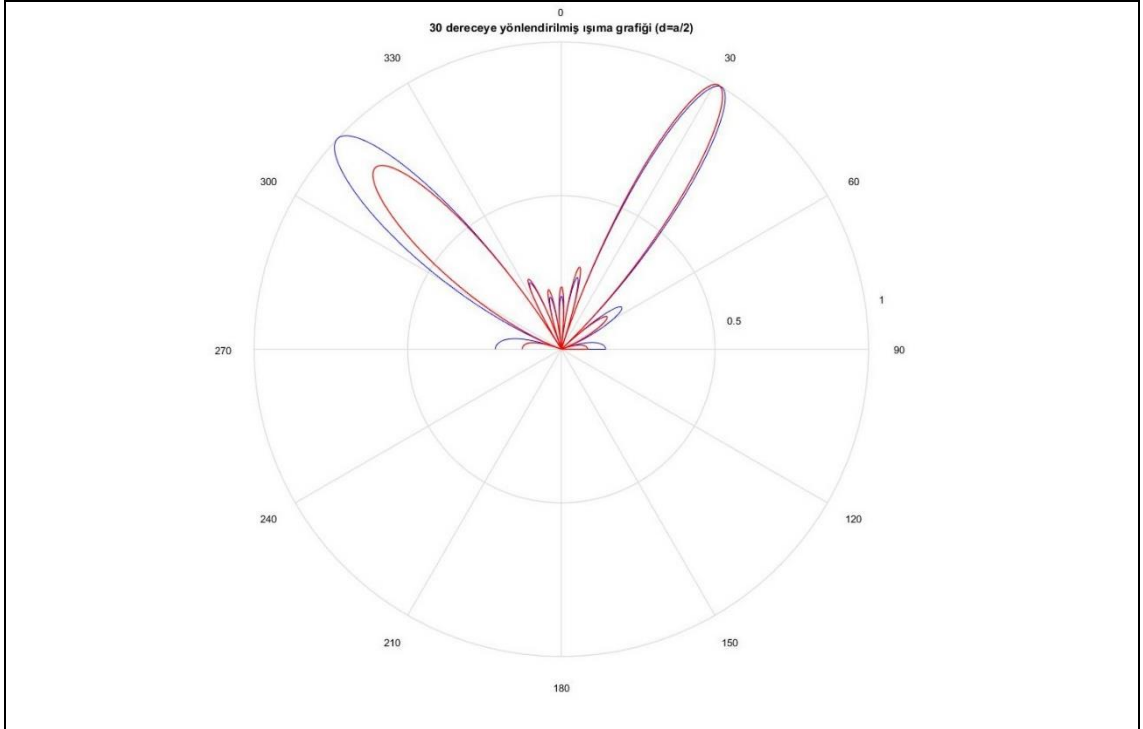
UV'ler arası iç boşluk olan d d_{\max} değerinden küçük yada eşit olacak şekilde minimum değerde tutmak ve UV sayısı için optimum bir değer bulmak ikincil ışımayı eleyebilmek için tasarım sırasında karar verilmesi gereken iki önemli noktadır. Şekil 4.11 minimum UV sayısı ve $d=a$, şekil 4.12 de minimum UV sayısı $d=a/2$, şekil 4.13 de maximum UV sayısı ve $d=a$ şekil 4.14 de maximum UV sayısı ve $d=a/2$ durumlarında 30 dereceye yönlendirilen ana ışıma ve ortaya çıkan ikincil ışımının davranışı verilmiştir.

Şekil 4.11: 30 dereceye yönlendirilmiş ışıma



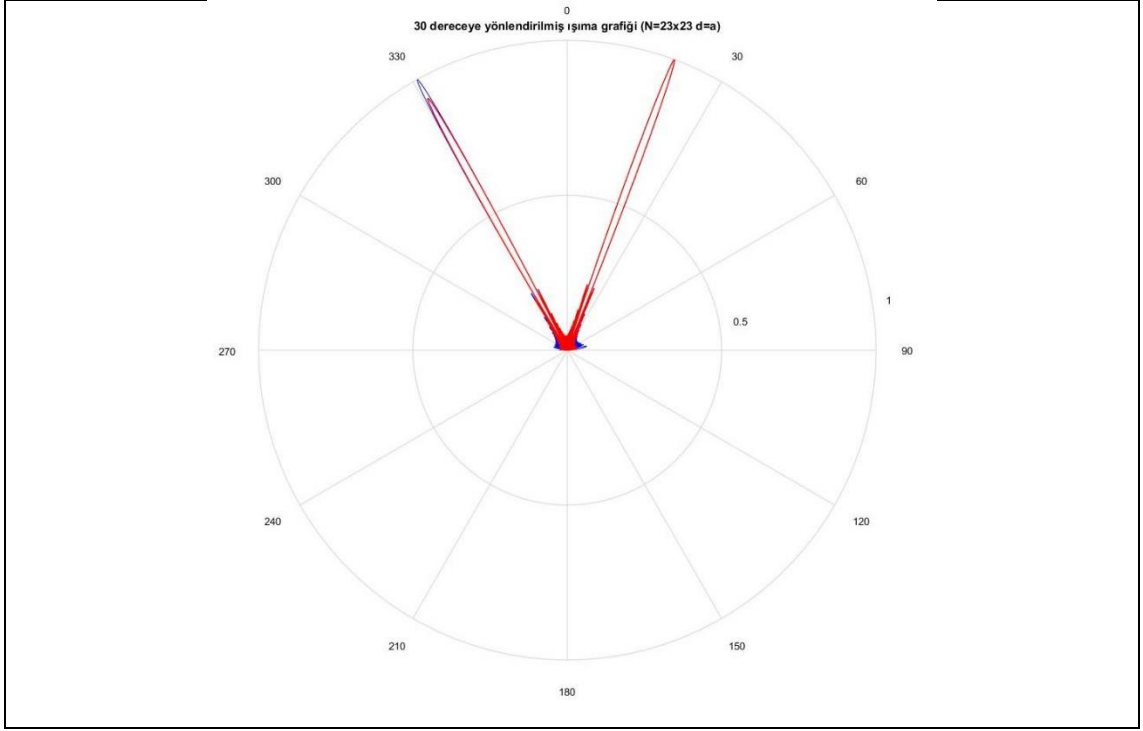
Kaynak: Bu şekil Seçkin Çağıl NUHUT tarafından MATLAB programı yardımıyla hazırlanmıştır.

Şekil 4.12: 30 dereceye yönlendirilmiş ışıma



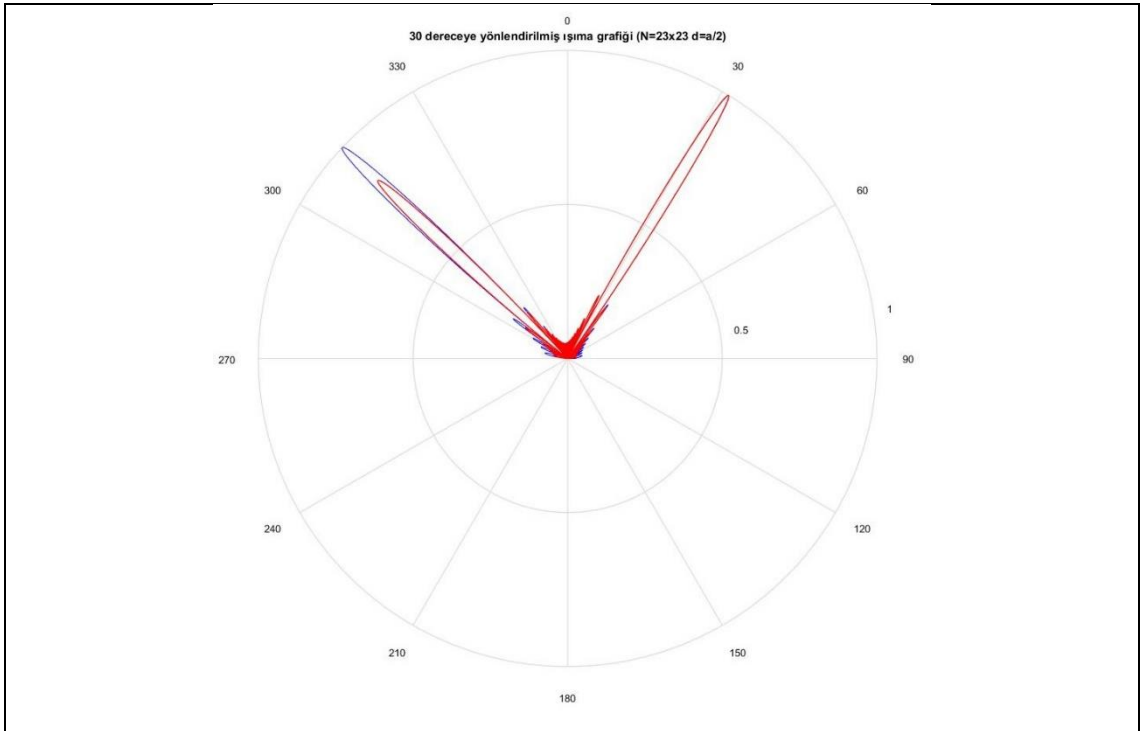
Kaynak: Bu şekil Seçkin Çağıl NUHUT tarafından MATLAB programı yardımıyla hazırlanmıştır.

Şekil 4.13: 30 dereceye yönlendirilmiş ışıma



Kaynak: Bu Şekil Seĥkin ağıl NUHUT tarafından MATLAB programı yardımıyla hazırlanmıştır.

Şekil 4.14: 30 dereceye yönlendirilmiş ışıma



Kaynak: Bu Şekil Seĥkin ağıl NUHUT tarafından MATLAB programı yardımıyla hazırlanmıştır.

Işıma eksenini yönlülük açısı artan fazlı parametrik dizi beraberinde ikincil ışımayı getirir. Bu noktada ikincil ışımayı devreden çıkarmak daha çok UV'ler arası iç boşluğun hesaplanarak tasarlanması ve/veya konumlandırılması ile çözümü makul ve mümkündür.

4.2.4. Yan ışıma alanlarının baskılanması

Fazlı dizi sistemlerinde ortaya çıkan problemler daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi ikincil ışımanın elenmesi ve yan ışıma alanlarının baskılanması idi.

Ana ışıma alanı dışında kalan bu alanların önemli negatif etkilerinin, kaliteli bir fazlı PDH tasarımında henüz tasarım aşamasında iken önüne geçilmesi gereken oldukça titiz bir konu olmakla birlikte sesin hedeflenen konuma temiz bir şekilde aktarımı için de oldukça önemlidir.

$$\theta_{yan} = \sin^{-1} \left(\sin \theta_s - \frac{\lambda}{Nd} \right) \quad (4.13)$$

Denklem 4.13 de görüldüğü üzere UV sayısına oranlı yan ışıma alanlarının tamamen ortadan kaldırılması söz konusu bile değildir. Denklem eşitliğinin sağ tarafında parantez içinde bulunan $\frac{\lambda}{Nd}$ oranı ve denklem 4.10 un çözümünden çıkan sonuçlar gösteriyor ki, fazlı PDH yaydığı ışımanın sahip olduğu yan ışıma alanlarının en yüksek genlikte olduğu konumlar, UV'ler sayısı en yüksek olduğu değerde iken $2/3 \pi$ olmaktadır. Yine $\frac{\lambda}{Nd}$ oranından, UV'ler arası iç boşluk olan d'nin sayısal olarak azaldıkça yani UV'ler konum olarak birbirilerine yaklaştıkça, yan ışıma alanlarının ana ışıma ekseninden uzaklaşacak şekilde yani ana ışımayı kirletmeyecek şekilde uzaklaştığı gözlemlenmektedir. Denklem 4.13 den anlaşılacağı üzere ışımanın sahip olduğu yan ışıma alanları, UV sayısı olan N artırılrsa bile ortadan kaldırılması mümkün değildir. UV'ler arası iç uzaklık olan d'nin azaltılması yan ışıma alanlarını, ışıma eksenine aksi yönlerde yani şekil 4.5 ve şekil 4.6 da görüldüğü gibi eksenden uzaklaşacak şekilde sonuç verecektir. Bu durum ışıma eksenini üzerinde ilgili alandan istenmeyen ses sinyallerini ayırıştırarak hedeflenen noktaya sadece ana ışıma alanının sağlıklı iletimini sağlayacaktır. PDH nin pratik olarak tasarlanmasından önce uygun sayıda UV kullanımı

ve UV'lerin bireysel olarak kendi aralarındaki iç boşluk olan d'nin uygun şekilde hesaplanarak konumlandırılması teorik olarak önceden dikkatli bir şekilde çalışması gereken bir durumdur. Bu çalışmaların yapılması, PDH hedeflenen noktaya istenilen açıyla gönderilen ana ışığa ses sinyalinin, yan ışığa alanları tarafından kirlenmeden iletilmesinde oldukça önemli bir konudur.

4.3. MODÜLASYON BİLGİSİ

PDH'nin en büyük problemlerinden biri olan harmonik bozulma etkeni henüz tam cevabı bulunamayan bir problem olmakla birlikte, yalnızca bugüne kadar yapılan çalışmaların da, gösterdiği gibi konuya optimum bir yanıt getirilmiştir (Pompei 2002).

Berktaş'ın yaklaşımı sonucundan çıkan duyulabilir sinyalin belirli bir noktadaki ses basıncı teorik bölümden bilindiği üzere Denklem 4.14 gibidir (Berktaş 1965).

$$p_2 = \frac{\beta p_0^2 a^2}{16 \rho_0 \alpha c_0^4 x} \frac{d^2}{dt^2} E^2(t) \quad (4.14)$$

Duyulabilir ses sinyali olan $g(t)$ ifadesi modüle olmadan önce zaman göre çift katlı integrali alınıp, modülasyon bilgisi ile çarpılıp, 1 ile toplandıktan sonra tüm ifadenin karekökünün alınmasıyla modüle olmuş ses sinyali ifadesi olan $E(t)$ ye ulaşılır.

$$E(t) = \left[1 + m \iint g(t) dt^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.15)$$

Modüle olmuş sinyalin harmonik bozunma bileşenleri etkileri minimuma indirmek isteniyorsa, modülasyon bilgisinin kesin ve kusursuz olması gerekmektedir. Denklem 4.15 de duyulabilir sinyalin zamana göre iki kere integralinin alınması sinyali zayıflatırken, integralden sonra gelen modülasyonla çarpma işlemi sinyale harmonik bozunma bileşenlerini katar. Ses basıncı ve harmonik bileşenler basıncı analitik olarak ayrı ayrı hesaplanmak istenirse, Westervelt'in Lighthill'in denkleminde türettiği ikincil dalganın ses basıncını ifade eden denklem kullanılır ve homojen olmayan dalga denklemi daha önce teorik bölümden bilindiği üzere denklem 4.16 deki gibidir.

İki ultrasonik ses dalgasının bir UV aracılığıyla hava ortamına aktarımı ile ışına eksenini üzerinde bulunan bir x noktasındaki ses basınç şiddeti denklem 4.17 gibidir (Westervelt 1957).

$$\nabla^2 p_s - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p_s}{\partial t^2} = -\rho_0 \frac{\partial q}{\partial t} \quad (4.16)$$

$$p_s = p_0 \left[1 + mg \left(t - \frac{x}{c_0} \right) e^{-\alpha x} \sin w_0 \left(t - \frac{x}{c_0} \right) \right] \quad (4.17)$$

Burada m modülasyon bilgisini temsil eder. *Westervelt* denklemi ve denklem 4.17 yardımı ile kaynak güç yoğunluğu ifadesi denklem 4.18 da ki gibi yazılır.

$$q = \frac{\beta p_0^2}{\rho_0^2 c_0^4} e^{-2\alpha x} \frac{\partial}{\partial t} \left[mg \left(t - \frac{x}{c_0} \right) + \frac{1}{2} m^2 g^2 \left(t - \frac{x}{c_0} \right) \right] \quad (4.18)$$

Denklemin sağ tarafında köşeli parantez içindeki 2.terim ışına eksenini üzerindeki bir x noktasında oluşan ses basıncının harmonik bozunma bileşenlerini, denklemin köşeli parantez içindeki 1.terimi ışına eksenini üzerindeki bir x noktasında oluşan ses basıncının kendisini temsil eder. Kaynak güç yoğunluğu denkleminde görüldüğü üzere ışına eksenini üzerinde bulunan bir x noktasındaki ses basıncı m modülasyon bilgisi ile doğru orantılı, yine ışına eksenini üzerinde belirli bir x noktasında oluşan ses basıncının harmonik bileşenleri basıncı ise m modülasyon bilgisinin karesi ile orantılı olduğu görülmektedir. Analitik olarak bu iki basınç şiddetleri ayrı ayrı hesaplanmak istendiğinde, x noktasındaki ses basıncı şiddeti denklem 4.19 ve aynı noktada oluşan ses basıncı şiddetinin harmonik bozunma bileşenleri içeren ses basıncı şiddeti denklem 4.20 yardımıyla hesaplanabilir (Yoneyama 1983).

$$p_s = -\frac{\beta p_0^2 a^2 m w^2}{8 \rho_0 c_0^4 \alpha x} \sin \left(w \left(t - \frac{r}{c_0} \right) \right) \quad (4.19)$$

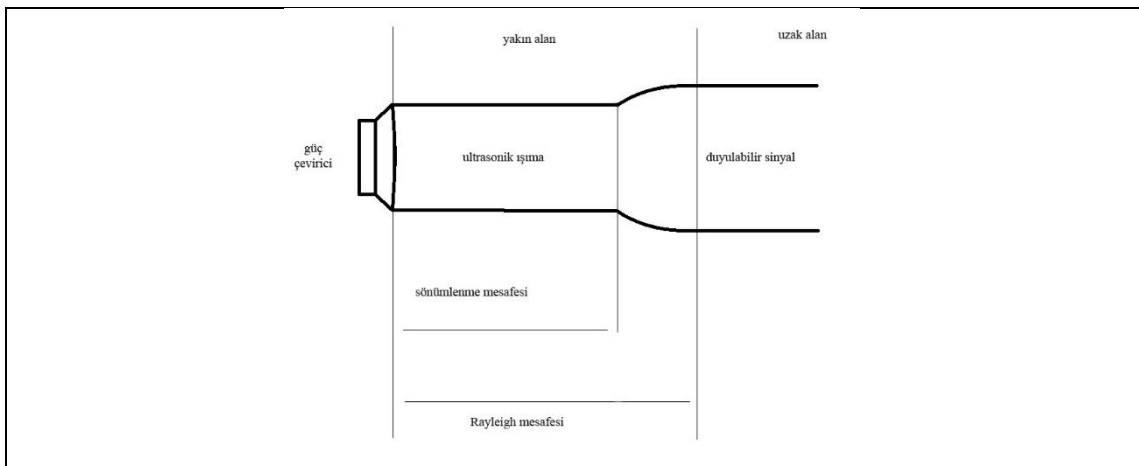
$$p_d = \frac{\beta p_0^2 a^2 m^2}{8 \rho_0 c_0^4 \alpha x} \cos 2w \left(t - \frac{r}{c_0} \right) \quad (4.20)$$

Hedeflenen noktadaki ses basıncı şiddeti artırılmak istendiğinde, modülasyon bilgisiyle orantılı olarak o noktada oluşacak olan harmonik bozunma bileşenleri de artacaktır. Bu tezde modülasyon bilgisi 0.8 alınmıştır.

4.4. RAYLEİGH MESAFESİ VE SÖNÜMLENME MESAFESİ

İnsan duyum aralığının üst sınırı olan 20kHz den daha yüksek frekanslı sinyallerin olduğu alan ultrasonik alanın başlangıcı olarak kabul edilir. Ultrasonik alan, güçlü girişim ve saçılımların bulunduğu yakın alan ve istikrarlı ışımalara sahip ve güçlü girişimlerin bulunmadığı uzak alan olmak üzere iki ana bölümden oluşur bu iki ana bölüm, *Rayleigh* mesafesi ve sönümlenme mesafesi şekil 4.15 de görüldüğü gibidir.

Şekil 4.15: Ultrasonik alanın bölümleri



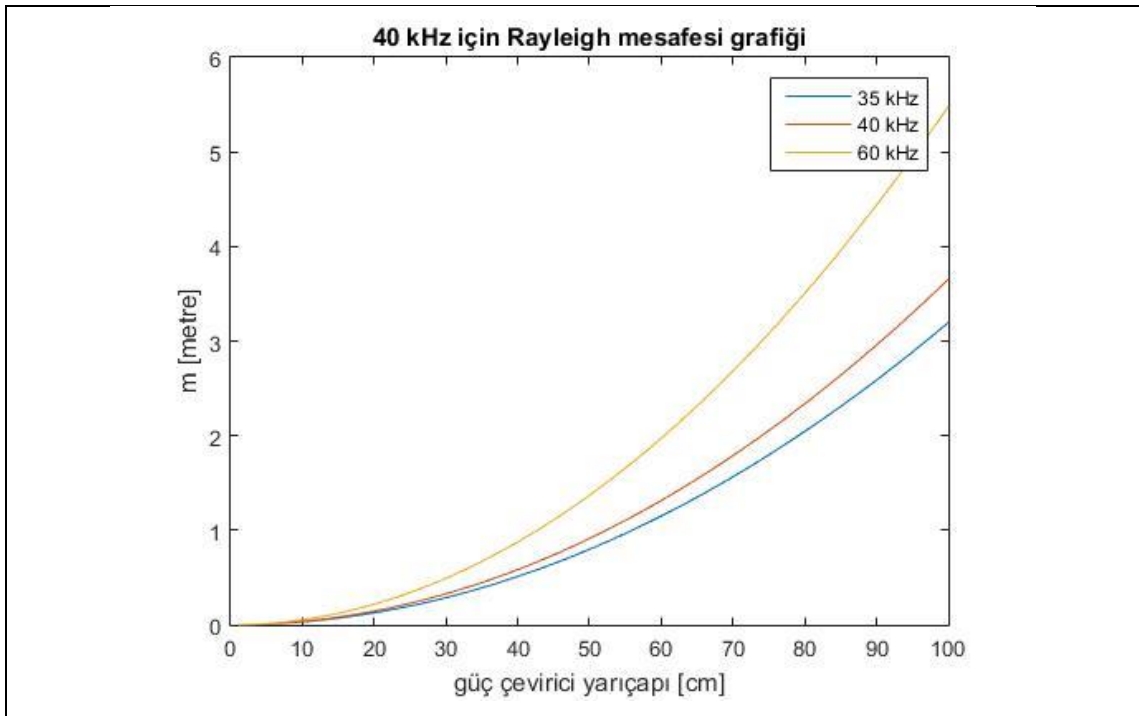
Kaynak: Bu şekil Seçkin Çağıl NUHUT tarafından Adobe Photoshop programı yardımıyla hazırlanmıştır.

Uzak alan ve yakın alan arasındaki geçiş bölgesi *Rayleigh* mesafesi olarak adlandırılır ve tanım karşılığı denklem 4.21 deki gibidir (Zheng 1999, Farias 2015).

$$R = \pi f_c^2 a^2 / \lambda \quad (4.21)$$

Rayleigh mesafesi denkleminde bahsi geçen a , ultrasonik ışımaya yapan kaynağın etkin yarıçap mesafesi, f_c taşıyıcı dalgaya ait frekans, λ taşıyıcı frekansa ait dalga boyunu temsil eder. Bu 3 bileşenin aralarındaki ilişki şekil 4.16 da verilmiştir. *Rayleigh* bölgesi içinde ses dalgaları doğrusal gibi davranır ve bu bölgeden sonra ses basıncı her iki misli mesafe artışı için -6 dB ye eşdeğerlik bir düşüş yaşar (Gan, Shi 2010).

Şekil 4.16: Farklı taşıyıcı frekanslar ve farklı yarıçaplar için Rayleigh mesafeleri



Kaynak: Bu şekil Seçkin Çağıl NUHUT tarafından MATLAB programı yardımıyla hazırlanmıştır.

Yakın alan içinde bulunan ultrasonik taşıyıcı yüksek frekansların en çok sönümlendiği mesafe ise sönümlenme mesafesi olarak adlandırılır. Sönümlenme uzunluğu doğrusal olmayan girişimlerin söz konusu olmadığı bölgedir ve tanım karşılığı denklem 4.22 deki gibidir. Denkleminde bulunan α , Neper / m cinsinden bir katsayıdır.

$$l = 1 / 2\alpha \quad (4.22)$$

PDH teorik olarak tasarlanırken, *Rayleigh* mesafesini ve sönümlenme mesafesini eşitleyecek ya da çok yaklaşıcak şekilde seçilen belirli değişkenler uzak alanda bile sesin daha yüksek basınç seviyesine çıkmasını sağlar.

4.5 ULTRASONİK SÖNÜMLENME KATSAYISI

Ses, bir ortamda ilerlerken, yoğunluğu mesafeye bağlı bir şekilde azalarak ilerler. Bir eksen boyunca mesafe kat eden ses yönünü değiştirecek bir engel ile karşılaşmıyorsa yönlülüğü değişmez ve giderek sönümlenmeye mahkumdur. Ultrasonik ses dalgaları için H. E. Bass (1996) yayınladığı makalesinde yer alan ultrasonik frekanslar için sönümlenme katsayısı denklemi katsayının hesaplanması için en geniş ifadedir.

$$\alpha = \frac{f^2}{ps} \left[1.84 \times 10^{-11} \left(\frac{t}{t_0} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{t}{t_0} \right)^{\frac{-5}{2}} \left[0.01275 \frac{e^{-2239.1/t}}{f_{ro} + f^2 / p_s^2 f_{ro}} + 0.1068 \frac{e^{-3352/t}}{f_m + f^2 / p_s^2 f_m} \right] \right] \quad (4.23)$$

Denklem 4.23'de ps standart atmosfer basıncı olan $1 \text{ atm} = 101.325 \text{ kPa}$, t_0 kelvin cinsinden normal şartlar altında oda sıcaklığı olan 293 K , f_{ro} oksijen için rahatlama frekansı, f_m nitrojen için rahatlama frekansını gösterir. Bu rahatlama frekansları oksijen için neme denklem 4.24, nitrojen için neme ve sıcaklığa denklem 4.25 bağlı olarak yazılır ve denklem 4.26 de görüldüğü üzere nemin hesaplanmasında kullanılır.

$$f_{ro} = \left(24 + 4.04 \times 10^4 h \frac{0.02 + h}{0.391 + h} \right) \quad (4.24)$$

$$f_m = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{1/2} (9 + 280 h e^{4.17[(t_0/t)^{1/3} - 1]}) \quad (4.25)$$

$$h = h_r (p_{sat} / p_s) \quad (4.26)$$

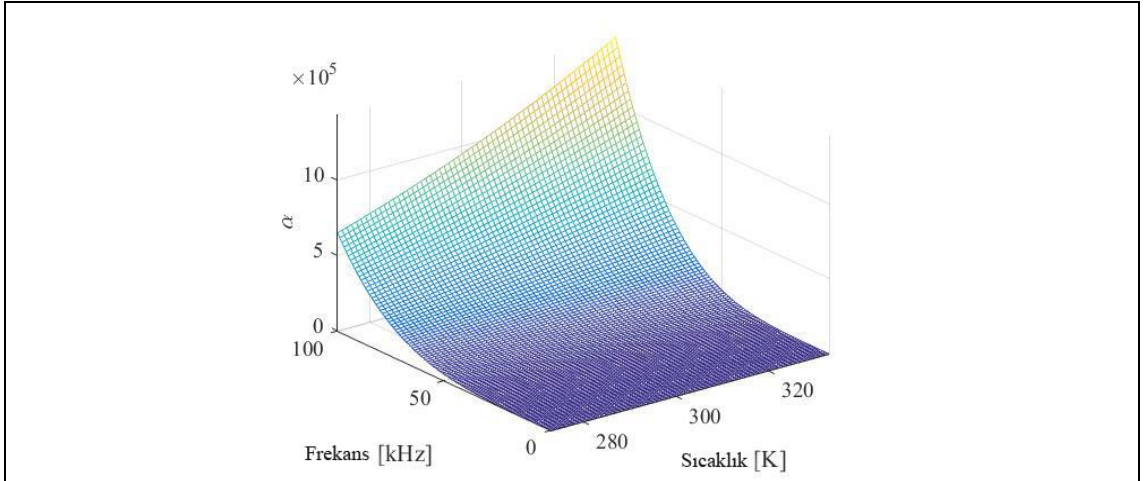
Denklem 4.26 de görülen p_{sat} su buharı basıncını, h_r ise görelî nemi ifade eder.

Denklem 4.23 den ultrasonik sönümlenme katsayısı olan için şu çıkarımları yapmak mümkündür.

- Sönümlenme katsayısı taşıyıcı frekansla doğru orantılıdır yani taşıyıcı frekans olarak kullanılan ultrasonik frekans değeri arttıkça sönümlenme katsayısı artar.
- Sönümlenme katsayısı havadaki yüzde nem oranı ile doğru orantılıdır yani nem arttıkça sönümlenme katsayısı artar.
- Sönümlenme katsayısı hava sıcaklığı ile doğru orantılıdır. Sıcaklık arttıkça sönümlenme katsayısı artar.

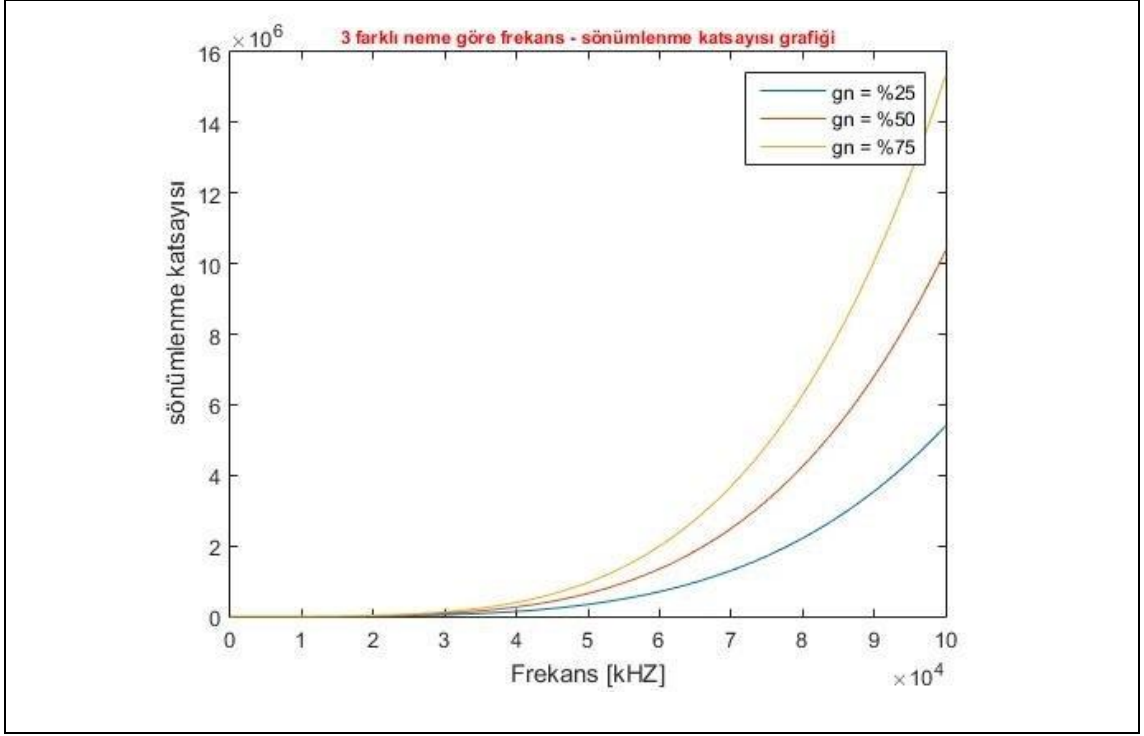
Yukarıda maddeler halinde sıralanan değişkenler sesin sönümlenmesinde önemli rol oynarlar ve sesin mesafe kat etmesinde yıkıcı rolleri bulunmaktadır. Bu değişkenler şekil 4.17 ve şekil 4.18 de grafiklenerek gösterilmiştir.

Şekil 4.17: Ultrasonik sönümlenme katsayısının frekans ve sıcaklığa bağlı değişimi



Kaynak: Bu şekil Seçkin Çağıl NUHUT tarafından Matlab programı yardımıyla hazırlanmıştır.

Şekil 4.18: Ultrasonik sönümlenme katsayısının farklı nem değerlerine göre değişimi



Kaynak: Bu şekil Seçkin Çağıl NUHUT tarafından Matlab programı yardımıyla hazırlanmıştır.

5. SAYISAL BENZETİMLER

Parametrik diziler için kullanılan teorik metotlar, akustik alanın basıncının analitik tanımı olarak adlandırılır. Bahsi geçen analitik tanım için kullanılan bu metotlar, parametrik dizinin ışınma ekseninin metre cinsinden mesafesine göre farklı cevaplar vermektedir. Parametrik dizinin ışınması daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi yakın alan ve uzak alan olmak üzere ilk başta iki ana başlık olarak, daha sonra özellikli olarak *Rayleigh* mesafesi ve sönümlenme uzunluğu olarak incelenir. Çok sayıda harmonik bileşen barındıran birincil ve ikincil frekanslara göre ışınma yapan PDH' de yoğun ışımaların ve saçılımların bulunduğu yakın alanın nümerik çözümü için integral yaklaşımı, temel ses frekansı ve ikincil harmonik frekans için, zayıf doğrusal olmama durumunda, bu analitik tanımının sonucu en sağlıklı şekilde verdiği bilinmektedir (Yang 2005, Lam 2014, Tseng 2014, Aoki 1991, Yang 2014, Pompei 2002, Gan 2010, Cervenka 2011, Zhang 2012, Shi 2016, Ju 2010).

Berktaş, *Westervelt* denkleminde türettiği fark frekansı temelli teoremine zarf terimini ekleyerek, bir r uzaklığı ve herhangi bir açıya sahip gözlemci noktasındaki basınç değerinin, fark frekansına bağlı olduğunu, fark frekansının ise zarf terimine bağlı olduğunu belirtir (Berktaş 1965). Berktaş'ın uzak alan çözümü doğrusal benzeri yaklaşımı ile çözülür ve geçerli olduğu uzak alan - ultrasonik taşıyıcı dalga boyuna bağlı bir şekilde ayrılan saçılımın yapıldığı etkin alan- *Rayleigh* mesafesinden daha uzaktır. İki birincil ultrasonik ışımının havadaki girişiminden ortaya çıkan fark frekansının en çok etkilendiği alan $x \leq 1/2\alpha$ sönümlenme mesafesi olarak adlandırılan alandır. Çünkü taşıyıcı frekanslar en çok bu bölgede sönümlenmeye maruz kalmaktadırlar. Berktaş teoremi *Rayleigh* mesafesinin aldığı en yüksek değerin de ötesinde en iyi şekilde sonuç vermektedir. Çünkü önceki bölümlerden bilindiği üzere Berktaş teoremi doğrusal olmayan iki ultrasonik frekansın havadaki girişimini tanımlar ve sesin doğrusal olarak davranmadığı bölge *Rayleigh* mesafesinden sonra başlar ve duyulabilir sinyal bir çok parametrik dizi sistemlerinde bu mesafeden daha öte bir mesafede üretilir. *Rayleigh* mesafesi içinde dalgalar düzlemsel, *Rayleigh* mesafesinin ötesinde ultrasonik dalgalar ters kare yasasına göre dağılırarak ilerlemeye devam ederler.

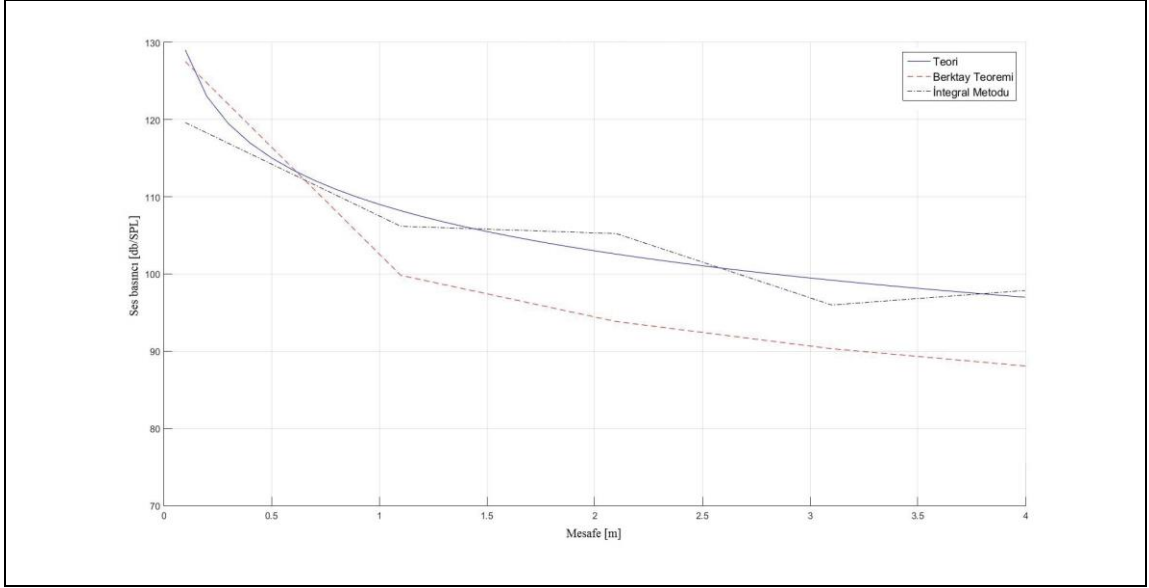
Bu da geçerli çözümün sadece uzak bölgede yani güçlü sönümlenme $x > L$ ve küresel yayılma $z > z_0$ bölgesinde geçerli olduğunu gösterir (Ju, Kim 2010).

KZK denkleminden çıkarılan ve integral metodu ile Berktaý'ın teoremi benzetim yazılımında belirli değişkenlere bağlı bir şekilde hesaplatılarak çalışılmıştır. Benzetim bölümü için *multicomp* isimli firmanın *mcust10p40b07ro* modeli³ gerçek bir UV'sinin özellikleri referans alınmıştır. Bu UV'nin en iyi çalıştığı ultrasonik (US) frekans olan 40 kHz taşıyıcı frekans olarak seçilmiş olup, 5 adet UV'den oluşan parametrik dizinin, UV'leri çapı 1 cm olup, bu UV'nin ana ışımaya alanı genişliği 50 derecedir. UV'ler arası iç boşluk, bütün dizinin oluşturacağı ana ışımaya alanı keskinliğini en düşük değere indirebilmek adına, UV'ler arasında minimum boşluk kalacak şekilde 0.5 cm ye göre üçgensel olarak konumlandırıldığı varsayılarak benzetim gerçekleştirilmiştir.

İntegral metodu, Berktaý teoremi ve ses basıncının teoride mesafeye bağlı değişimine ait grafikler *matlab* yazılımı kullanılarak hesaplatılmıştır. Bu 3 teoride kullanılan katsayılar ve başlangıç basınçları tüm teoremler için aynı değerler kullanılarak hesaplatılmıştır. Şekil 5.1 deki grafikte 3 farklı teori için ses basıncının (db SPL) mesafeye (m) göre değişimi gösterilmiştir.

³ <http://tr.farnell.com/multicomp/mcust10p40b07ro/transmitter-40khz-10mm-plastic/dp/2362667>

Şekil 5.1: Teorik ve metod sonuçları mesafe-ses basıncı grafiği



Kaynak: Bu şekil Seçkin Çağıl NUHUT tarafından MATLAB programı yardımıyla hazırlanmıştır.

Şekil 5.1 de 3 farklı teoriye göre 1 kHz'deki bir akustik ses dalgasının ses basıncı değerlerinin mesafeye göre değişimi incelenmiştir. Kırmızı kesikli çizgi Berklay teoremini, siyah noktalı kesikli çizgi integral teoremini ve mavi ile gösterilen sürekli çizgi ise teoride ses basıncının mesafeye nasıl değiştiğini gösterir. Şekil 5.1 deki grafikte 3 farklı metotta ses basıncının mesafeye göre azaldığı görülmektedir. Grafiklerin ayrıntılı yorumu bulgular bölümünde incelenecektir.

6. BULGULAR

PDH'nin teorik tasarımında, taşıyıcı frekans seçimi, ana ışımaya alanı keskinliği, ana ışımaya yüzey alanı, dizi geometrisi teorik olarak çalışıldıktan sonra evde kişiye özel ses dinleme kullanım alanı için en uygun veriler bir araya getirilerek, sayısal benzetim oluşturulmuştur.

İntegral metodunda; $x = 0, x=1, x=2, x=3$ ve $x=4$ konumlarında sırasıyla 119.62, 107.53, 105.34, 96.61, 97.82 db SPL ses basıncı ölçümleri gözlemlenmiştir. PHD konumu ve ulaştırılmak istenen nokta arasındaki ses basınç seviyeleri arasında 21,8 db SPL değerinde bir düşüş gözlemlenmiştir.

Berktaş metodunda; $x = 0, x=1, x=2, x=3$ ve $x=4$ konumlarında sırasıyla 127.5, 102.85, 94.42, 90.66, 88.07 db SPL ses basıncı ölçümleri gözlemlenmiştir. PHD konumu ve ulaştırılmak istenen nokta arasındaki ses basınç seviyeleri arasında 39.43 db SPL değerinde bir düşüş gözlemlenmiştir. Berktaş modelini göz önüne alındığında 0.1 metre ile 1 metre arasında hızlı bir düşüş varken 1.1 den 4 metreye kadar düşüş hızının yavaşlayan bir şekilde devam ettiği gözlemlenmiştir. PDH konumu ve gözlemci noktası arasındaki ses basıncı değer değişiminin integral metoduna göre daha fazla olması, Berktaş modeli formülasyonunda taşıyıcı sinyallerine ek olarak fark frekansı sönümlenme katsayısının da eklenerek tanımlanmasından dolayı gerçek ses basıncı değerlerinden uzaklaştığı görülmektedir.

Ses basıncının teoride mesafeye bağlı değişimi, metotlarda olduğu gibi, yansımanın olmadığı ortamda, sesin sönümlenme katsayısı ve başlangıç basınçları değerleri eşit olacak şekilde hesaplatılmıştır. Benzetimde $x = 0, x=1, x=2, x=3$ ve $x=4$ konumlarında sırasıyla 129, 109, 103, 99,48, 96,98 db SPL ses basıncı ölçümleri gözlemlenmiştir. PHD konumu ile ulaştırılmak istenen nokta arasındaki ses basınç seviyeleri arasında 32,02 db SPL değerinde bir düşüş gözlemlenmiştir. Şekil 5.1 deki grafiğe bakıldığında teori için ses basıncının mesafeye göre değişimi 0 dan 1.5 metreye kadar hızlı bir düşüş gözlenirken, 1.5 metreden sonra düşüş hızının yavaşlayan bir şekilde devam ettiği gözlemlenmiştir.

Literatürde incelendiği üzere yakın alan hesaplamaları için integral metodunun Berktaş modeline nazaran daha iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir (Tanaka vd. 2010). Gerçek ortamlarda PDH konumu ve gözlemci konumunun, bu tezdeki önemli bölümünün uzak

alan olduğu gerçeği göz önünde bulundurulduğunda, yakın alan için hesaplanan değerlerin kullanım koşullarını doğrudan ilgilendirmediği bilinmektedir. Doğrusal olmayan akustik teorisi sonuçlarına göre Berkday ve integral metodu karşılaştırıldığında Berkday metodunun mesafeye bağlı ses basıncının sönümlenmesi daha hızlıdır. İntegral metodunda ise teoriye daha yakın ve Berkday modeline göre daha yavaş bir sönümlenme gerçekleşmektedir. Tezin odak kullanım alanı kapsamında yapılan çalışmada sesin teorideki mesafe basınç değişimi için integral metodunun daha uyumlu olduğu görülmektedir. Bireysel evde ses dinleme çerçevesinde integral metodu temel alınarak yapılacak benzetim çalışmaları gerçeğe daha yakın sonuç verecektir.

7. TARTIŞMA VE SONUÇ

Parametrik diziler, düşük frekanslarda oldukça yönlü ses yayınları üretmek için kullanılabilen ses kaynaklarıdır. Bu diziler için modellemeler, birbirlerine çok yakın frekanslarda iki adet yüksek şiddette ultrasonik sinyalleri yayarak duyulabilen sinyaller üretilmesi temel alınmaktadır. Bu sinyaller, UV'lerin bireysel ışımaya genişliğine bağlı olarak oldukça yönlüdür. Ultrasonik dalgaların yayılma ortamı ile doğrusal olmayan etkileşimi, mesafelere yayılabilen ve duyulabilen sinyaller oluşturur.

İki yüksek frekanslı ultrasonik dalganın havadaki girişimi teorik model olarak iki şekilde sonuçlanır. İlki bu iki frekansın havadaki girişiminden doğan ve bu iki frekansın toplam frekansı ve bu toplam frekansın üst harmonik bileşenleri şeklinde sonuçlanan durum, bir diğeri ise bu iki frekansın frekans farklarından ortaya çıkan durum. İki frekansın toplamı durumu insan kulağının duyum aralığının üst sınırından çok çok yüksek olduğu için PDH kullanıcılarını etkilememektedir. PDH'nden yayılan ışımaya maruz kalındığında sesin duyulabilir hale dönmesi durumu yani iki frekansın farkı durumu, evde kişiye özel ses dinleme alanında literatürde kendine yer bulmasına olanak sağlamıştır. PDH'nin bireysel evde ses dinleme sistemlerindeki kullanımı için teorik çalışmalar yapılmış bu minvalde yönlülüğü sayısal olarak değiştirilebilen PDH için, belirli metotlar incelenerek, teorik olarak tasarlanmış ve evde ses dinleme alanında en iyi çalışan metot belirlenip, teorik sonuçlar sayısal benzetim yazılımında karşılaştırılarak incelenmiştir.

Belirli teoriler sayısal benzetim yazılımı olan *matlab* aracılığıyla incelenirken, nümerik problemlerle karşılaşmış ve bu problem verilerin analizinde yanıltıcı olabileceği gibi, ancak ve ancak gerçek ortamda çalışacak olan PDH'nin deneysel ölçümlerinin yapılması, verilerin toplanması, analiz edilmesi ve deney – benzetim farklılıklarının saptanması gibi daha doğru sonuçlarla doğrulanabilecek bir durumdur. Tezin teorik tasarım bölümünde incelenen konular, tezin araştırma konusu olan yönlülüğü değiştirilebilir yüksek frekanslı PDH hakkında, deneysel geliştirilecek olan prototip için, yeterli ön bilgileri sunmaktadır. Bu tezde teorik altyapısı ve teorik tasarımı hazırlanan PDH'nin, kişiye özel evde ses dinleme alanında kullanımında, dizin işaret işleme tekniği ile mekanik olmadan ışımaya yönlülüğünün değiştirilmesi konusunda ön

Çalışma yapılmıştır. Yapılacak olan çalışmalar kapsamında, bu teoriler ışığında, bir PDH prototipi geliştirilmesi hedeflenmiştir. Evde ses dinleme alanında da kullanılan PDH'nin henüz literatürde ev tipi kullanım için yönselliğinin sayısal olarak değiştirilebildiğine rastlanılmamış olup, yönselliği sayısal olarak değiştirilebilen bir PDH prototip tasarımı yapılacak çalışmalar dahilindedir. Devamında PDH'ne kullanıcının bulunduğu konumu belirlemesi ve ışımanın yönlülüğünü bu kullanıcı konumuna göre açılacak şekilde yönlendirilmesi adına, hedeflenen prototipe ses alıcı UV'lerin eklenmesi ve PDH'ne gönderilen sesin konumunun *time reversal* tekniği ile hesaplanması hedeflenmiştir. Ek olarak kişiye özel kullanım için, sesin ışıma yaptığı odada oluşabilecek olan yansımalar, sağılmaları en düşük seviyeye indirebilmek ve oda içindeki eşik gürültü seviyesini minimum değerine ulaştırabilmek için, PDH'nden yayılan ışımanın kullanıcıya odaklanması yapılacak olan çalışmalar dahilindedir.

KAYNAKÇA

Kitaplar

Bai, R.M., Ih, G.J., and Benesty, J., 2013. *Acoustic array systems theory implementation and application*. First edition. Singapore: Wiley Publications.

Chellappa, R., Theodoridis S., Viberg, M., Zoubir, A.M., 2014. *Academic Press Library in Signal Processing: Array and Statistical Signal Processing*. United Kingdom: Elsevier Publications.

Hamilton, M.F. Blackstock, D.T., 1998. *Nonlinear acoustics*. Boston: Academic Press

Hodges, R.P., 2010. *Underwater acoustics analysis design and performance of sonar*. First Edition. United Kingdom: Wiley Publications.

Süreli Yayınlar

- Aoki, S., Toba, M., Tsujita, N., 2012. Sound localization of stereo reproduction with parametric loudspeakers. *Applied Acoustics*. **73**(12), pp. 1289-1295.
- Aoki K., 1994. A parametric loudspeaker applied examples. *Electronics and communications in Japan*. **77**(1), pp. 64-73.
- Aoki, K., Kamakura, T., Kumamoto, Y., 1991. Parametric loudspeaker characteristics of acoustic field and suitable modulation of carrier ultrasound. *Electronics and Communications in Japan*. **74**(9), pp. 332-337
- Bass, H. E., 1996. Atmospheric absorption of sound further developments. *Journal of the Acoustical Society of America*. **99**(2), pp. 1259-1259.
- Bennett; M.B., Blackstock D.T., 1975. Parametric array in air. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **57**, pp. 562-568.
- Berktag, H.O., 1965. Possible exploitation of non-linear acoustics in underwater transmitting applications. *The Journal of Sound and Vibration*. **2**(4), pp. 435-461.
- Berktag, H.O., 1965. Parametric amplification by the use of acoustic non-linearities and some possible applications. *The Journal of sound and vibration*. **2**(4), pp. 462-470.
- Boullosa, R.R., Lopez, A.P., Escamilla, R.D., Rendon, R.L., 2016. An airborne parametric array. *Japanese Journal Applied Acoustics*. **112**, pp. 116-122.
- Coates, R. F. W., Zheng, M., Wang, L., 1996. A model underwater parametric communication system. *Journal of Oceanic Engineering*. **21**(2), pp. 225-232.
- Ding, D., Zhang, Y., 2004. Notes on the Gaussian beam expansion. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **116**(3), pp. 1401-1405.
- Ding, D., Zhang, Y., Liu, J., 2003. Some extensions of the Gaussian beam expansion Radiation fields of the rectangular and the elliptical transducer. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **113**(6), pp. 3043-3048.
- Gan, W.S., Yang, J., Kamakura, T., 2012. A review of parametric acoustic array in air. *Japanese Journal of Applied Acoustics*. **73**(12), pp. 1211-1219.
- Gan, W.S., Yang, J., Kamakura, T., 2012. Parametric acoustic array theory advancement and applications. *Japanese Journal Applied Acoustics*. **73**(12), pp. 1209-1210.

- Gan, W. S., Tan, E.L., Kuo, M., 2011. Audio projection. *IEEE Signal Processing Magazine*. **28**(1), pp. 43-57.
- Gan, W.S., Yangi J., Tan, K.S., Er, M.H., 2006. A digital beamsteerer for difference frequency in a parametric array. *IEEE Transactions on Audio Speech and Language Processing*. **14**(3), pp. 1018-1025.
- Hamilton, M.F., 1984. Effects of nonlinear interaction on parametric acoustic arrays in dispersive fluids. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **76**(5), pp. 1493-1504.
- Haupt, R. W., Rolt, K. D., 2005. Standoff acoustic laser technique to locate buried land mines. *Lincoln laboratory journal*. **15**(1), pp. 3-22.
- Je, Y., Lee, H., Been, K., Moon, W., 2015. A micromachined efficient parametric array loudspeaker with a wide radiation frequency band. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **137**(4), pp. 1732-1743.
- Ju, H.S., Kim, Y.H., 2010. Near field characteristics of the parametric loudspeaker using ultrasonic transducers. *Japanese Journal Applied Acoustics*. **71**(9), pp. 793-800.
- Kamakura, T., Sakai, S., 2008. Practical development of directive sound system examinations from various research fields. *Fundamental Review*. **1**(3); pp. 37-43.
- Komatsuzaki, T., Iwata, Y., 2011. Active noise control using high directional parametric loudspeaker. *Journal of Environment and Engineering*. **6**(1), pp. 140-149.
- Kopp, L., Cano, D., Dubois, E., Wang, L., Smith, B., Coates, R. F. W., 2000. Potential performance of parametric communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. **25**(3), pp. 282-295.
- Kritz, J., 1977. Parametric array doppler sonar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. **2**(2), pp. 190-200.
- Lee, S., Katsuura, T., Shimomura, Y., 2011. Effects of parametric speaker sound on physiological functions during mental task. *Journal of Physiological Anthropogy*. **30**(1), pp. 9-14.
- Lee, S., Katsuura, T., Shimomura, Y., 2011. Verification of endocrinological functions at a short distance between parametric speakers and the human body. *Activitas Nervosa Superior Rediviva*. **53**(4), pp. 187-193.

- Lee, S., Katsuura, T., Towatari, T., Shimomura, Y., 2010. The effects of parametric speaker sound on salivary hormones. *Activas Nervosa Superior Rediviva*. **52**(2); pp. 119-124.
- Loubet, G., Vial, F., Essebbar, A., Kopp, L., Cano, D., 1996. Parametric transmission of wide band signals. *Proceedings of ocean 's*. **2**, pp. 839-844.
- Nakamura, K., Ogura, H., Sugimoto, T., 2009. Direct visualization of high intensity focused ultrasonic field using light emitting diodes and piezo electric elements. *Acoustical Imaging*. **29**(5), pp. 309-316.
- Nichols, R. H., 1971. Finite amplitude effects used to improve echo sounde. *Journal of the acoustical society of America*. **50**(4), pp. 1086-1087.
- Okamoto, M., Miyoshi, M., Watanabe, Y., 2003. Acoustic nonlinear effect on auricular cartilage vibrated with amplitude modulated ultrasound. *Japanese Journal of Applied Physics*. **42**(5), pp.2918-2922.
- Rudd, K. E., Hinders, M. K., 2008. Simulation of incident nonlinear sound beam and 3d scattering from complex targets. *Journal of Computational Acoustics*. **16**(3), pp. 427-445.
- Shi, C., Kajikawa, Y., 2016. Effect of the ultrasonic emitter on the distortion performance of the parametric array loudspeaker. *Japanese Journal Applied Acoustics*. **112**, pp. 108-115.
- Shi, C., Nomura, H., Kamakura, T., Gan, W.S., 2014. An envelope method for improving the product directivity models of the parametric loudspeaker. *The Institute of electronics information and communication engineers*. **113**(412), pp. 53-56.
- Shi, C., Kajiwaka, Y., Gan, W.S., 2014. An overview of directivity control methods of the parametric array loudspeaker. *APSIPA Transactions on signal and Information Processing*. **3**(1), pp. 1-12
- Shi, C., Gan, W.S., 2010. Development of a parametric loudspeaker a novel directional sound generation technology. *IEEE Potentials*. **29**(6), pp. 20-24.
- Smith, B.V., 1970. An experimental study of a parametric end fire array. *The Journal of sound and vibration*. **14**(1), pp. 7-21.

- Sugibayashi, Y., Kurimoto, S., Ikefuji, D., Morise, M., Nishiura, T., 2012. Three dimensional acoustic sound field reproduction based on hybrid combination of multiple parametric loudspeakers and electrodynamic subwoofer. *Applied Acoustics*. **73**(12), pp. 1282-1288.
- Tan, E. L., Gan, W. S., 2012. Reproduction signal processing for parametric array. *Journal of the Acoustical Society of America*. **131**(4), pp. 3215.
- Tanaka, N., Tanaka, M., 2010. Active noise control using a steerable parametric array loudspeaker. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **127**(6), pp. 3526-3537.
- Tanaka, N., Tanaka, M., 2010. Mathematically trivial control of sound using a parametric beam focusing source. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **129**(1), pp. 165-172.
- Tseng, K.W., 2012. Beam width control for a directional audible sound system. *International Journal of Innovative Computing Information and Control*. **9**(7), pp. 3061-3078.
- Yang, J., Gan, W.S., Tan, K.S., Er, M.H., 2005. Acoustic beamforming of a parametric speaker comprising ultrasonic transducers. *Japanese Journal Applied Acoustics*. **125**(1), pp. 91-99.
- Westervelt, P.J., 1957. Scattering of sound by sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **29**(2), pp. 199-203.
- Wijk, K. V., Scales, J. A., Mikesell, T. D., Peacock, J. R., 2005. Toward noncontacting seismology. *Geophysical research letters*. **32**(1), pp. 1308-1308.
- Yoneyama, M. 1983. The Audio Spotlight: An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **73**(5), pp.1532-1536.
- Zheng, M., Wang, L.S., 1999. The angular response of parametric arrays general numerical solution. *Journal of Sound and Vibration*. **228**(1), pp.177-197.

Diğer Yayınlar

- Brooks, A.L., Zander, A.C., Hansen, C.H., 2005. Investigations into the feasibility of using a parametric array control source in an active noise control system. *Australian acoustical society*. 9-11 November 2005 Australia: pp. 39-45.
- Cervenka, M., Bendarik, M., 2011. Numerical study of low frequency sound beams. *IEEE International Ulstrasonics Symposium*. 18-21 October 2011 Orlando : pp.2169-2172.
- Costianes, P. J., 2005. An overview of concealed weapons detection for homeland security. *Proceedings of the 34th Applied Imagery and Pattern Recognition Workshop*. December 2005, United States: pp. 1-5.
- Farias, F., Abdulla, W., 2015. On rayleigh distance and absorption length of parametric loudspeakers. *Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference*. 16-19 December 2015 Hong Kong: pp. 1262-1265.
- Greff, R. 2010. The use of parametric arrays for transaural applications. *Proceedings of the 20th International Congress on Acoustics*. August 2010 Sydney, Australia: pp. 717-722.
- Heyman, J., Achanta, A., Hinders, M., Rudd, K., cotianes, P., 2005. Nonlinear acoustic concealed weapons detection. *Aoutomatic Target Recognition XV*. May 2005 Orlando, United States: pp.162-169.
- Hinders, M. K., Rudd, K. E., 2009. Acoustic parametric array for identifying standoff targets. *AIP Conference Proceedings*. July 2009 Kingston, USA: pp. 1757-1764.
- Ishii, K., Yamamoto, Y., Imai, M., Nakadai, K., 2007. A navigation system using ultrasonic directional speaker with rotating base. *Symposium on Human Interface*. 2007 Beijing, China: pp. 526-535.
- Ji, P., Ye, C., Tian, J., 2007. Development of a directional loudspeaker system for sound reproduction. *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*. 2-5 July 2007 Beijing: pp.591-594.
- Johannes, R., Beh, J.W., Gan, W.S., Tan, E. L., 2010. Investigation of 3d audio rendering with parametric array loudspeakers. *Proceedings of the 128th Convention of the Audio Engineering Society*. May 2010 London, UK: pp.7975-7990.

- Johannes, R., Gan, W.S., 2009. 3d sound effects with transaural audio beam projection. *Proceedings of the 10th Western Pacific Acoustics Conference*. September 2009 Beijing, China: pp.244-521.
- Kamakura, T., Aoki, K., 2006. A highly directional audio system using a parametric array in air. *The 9th Western Pacific Acoustics Conference*. 26-28 June 2006 Korea: pp. 1-7.
- Kamakura, T., Yoneyama, M., Ikegaya, K., 1984. Developments of parametric loudspeaker for practical use. *10th International Symposium on Nonlinear Acoustics*. Kobe: pp.147-150.
- Kidner, M.R.F., Petersen, C., Zander, A.C., Hansen, C.H., 2006. Feasibility study of localized active noise control using an audio spotlight and virtual sensors. *Australian acoustical society*. 20-22 November 2006 Christchurch, New Zealand: pp. 55-61.
- Kimura, K., Hoshuyama, O., Hirose, M., 2011. Visualization system for interaction with transmitted audio signals. *ACM SIGGRAPH*. August 2011 Vancouver, Canada: pp.54-54.
- Kozaczka, E., Grelowska, G., Kozaczka, S., 2010. Sounding of the seabed of the gulf of gdansk by the means of the parametric sonar. *Proceedings of the 17th International Congress on Sound and vibration*. July 2010 Cairo, Egypt: pp.1052-1060.
- Masayoshi, T., Shigeaki, A., 2010. Stereo reproduction using parametric loudspeakers. *Proceedings of the 20th International Congress on Acoustics*. August 2010 Sydney, Australia: pp. 262-266.
- Miyachi, T., Balvig, J.J., Kisade, W., Hayakawa, K., Suzuki, T., 2010. A navigation system with ultrasonic beams for reliable connection of sustainable transports. *Proceedings of the 12th International Conference on Mobility and Transport for Elderly and Disabled Persons*. June 2010 Hong Kong, China: pp. 1-10.
- Miyachi, T., Balvig, J. J., Kisade, W., Hayakawa, K., Suzuki, T., 2007. A quiet navigation for safe crosswalk by ultrasonic beams. *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, pp. 1049-1057.

- Miyachi , T., Balvig, J. J., Moriyama, J., 2006. An expansion of space affordance by sound beams and tactile indicator. *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, pp.603-610.
- Nakadai, K., Tsujinho, H., 2005. Towards new human humanoid communication listening during speaking by using ultrasonic directional speaker. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. April 2005 Barcelona, Spain: pp. 1483-1488.
- Nakashima, Y., Yoshimura, T., Ohya, T., 2005. Prototype of parametric array loudspeaker on mobile phone and its acoustical characteristics. *118th Convention of the Audio Engineering Society*. 2005 Barcelona.
- Nakatani, Y., Watanabe, D., Nakatani, M., 2008. Disaster evacuation support system for visitors. *Proceedings International Conference Intelligent Systems and Agents*. July 2008 Amsterdam, Netherlands: pp. 127-134.
- Lam, B., Gan, W.S., Shi, C., 2014. Feasibility of a length limited parametric source for active noise control applications. *21th International congress on sound and vibration*. 13-17 July 2014 China: pp.1-8.
- Li, X., Xu, L., 2010. Audio near distance directional loudspeaker technology for portable multimedia devices. *International Conference on Mechatronics and Automation*. 4-7 August 2010 China: pp. 727-731.
- Pompei, F.J., 2002. Sound From Ultrasound: The parametric array as an audible sound source. *Thesis for the doctor of philosophy degree*. Amerika Birleşik Devletleri: Massachusetts Institute of Technology
- Shi, C. Gan, W.S., 2013. Using length limited parametric source in active noise control applications. *20th International congress on sound and vibration*. 7-11 July 2013 Thailand: pp. 1-7.
- Svanfeldt, G., Olszewski, D., 2005. Perception experiment combining a parametric loudspeaker and a synthetic talking head. *Proceedings of Interspeech*. September 2005 Lisbon, Portugal: pp.1721-1724.
- Tan, K.S., Gan, W.S., Yang, J., Er, M.H., 2004. An efficient digital beamsteering system for difference frequency in parametric array. *International conference acoustics speech and signal processing ICASSP*. 17-21 May 2004 Canada : pp. 193-198.

- Takeoka, S., Yamasaki, Y., 2010. Acoustic projector using directivity controllable parametric loudspeaker array. *20th International Congress on Acoustics*. 23-27 August 2010 Australia: pp. 1-13.
- Tanaka, K., Shi, C., Kajikawa, Y., 2014. Multi channel active noise control using parametric array loudspeakers. *Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference APSIPA*. 9-12 December 2014 Cambodia: pp. 1-5.
- Tanaka, K., Shi, C., Kajikawa, Y., 2014. Study on active noise control system using parametric array loudspeaker. *European Acoustics Association*. 7-12 September 2014 Krakow: pp. 1-6.
- Wright, A., Evans, A., Linney, A., Lincoln, M., The listening room a speech based interactive art installation. *Proceedings of the 15th international conference on multimedia*. September 2007 Augsburg, Germany: pp.681-690.
- Yang, J., Tian, J., 2014. Parametric loudspeaker from theory to applications. *21th International congress on sound and vibration*. 13-17 July 2014 China: pp.1-18.
- Zhang, F.D., Xu, L.M., Chen, M., 2012. The design of beam forming for broadband beam steerable parametric array. *International conference on mechatronics and automation*. 5-8 August 2012 China: pp. 1580-1585.

EKLER

EK 1. Ultrasonik ışıma maruz kalma durumları

Ultrasonik ışıma (UI) maruz kalma, ses basınç şiddeti ve ultrasonik ışımayı tüketim süresi gibi parametrelere bağlı olan ve üzerinde ciddi çalışmalar yapılmış bir konudur. Bu konuda çalışan bilim insanlarından C. Wiernicki ve W.J. Karoly (1985, ss.488-496), “İnsan cildi ultrasonik durumlarda çok zayıf bir sönümleyicidir ve vücut yüzeyi genellikle ultrasonik ışımanın yüzde 99.9 unu yansıtır.” gibi bir tespitte bulunmuşlardır. İnsan vücudunun UI'nın yüzde 99.9 unu yansıtacak şekilde tepki vermesi, insanın cilt yüzeyi ile havanın arasında yanlış eşleşen empedans şeklinde tanımlanmasından kaynaklıdır (Wiernicki ve Karoly 1985).

Ultrasonik ışımaya yayılan bir enerji şeklidir. Yayılan herhangi bir enerjinin sönümlenmesi ısı açığa çıkarır. UI ya maruz kalınma limiti insan bedeninin doğasına bağlıdır. Bunlardan birincisi insan bedeninin UI'yı sönümleyebilmesi –ki bu etken frekansa ve diğer parametrelere bağlıdır- bir diğeri ise UI'nın yoğun ışımaya yapması sebebiyle sönümlenen ışımanın ortaya çıkardığı ısı etkisidir. İnsan cildi çok zayıf bir sönümleyici olduğundan çok çok yüksek frekanslı ultrasonik ışımlar insan cildinde ısınmaya sebep olur. Pratikte UI'ya maruz bırakılan bir bireyin üzerindeki ışımaya etkisinin en büyük payını titreşerek uyarılan kulağın aldığı bilinmektedir. Uzun süre ya da yüksek ses basınç şiddetiyle belirli bir süre yoğun UI maruz kalan insanlarda, bireylere bağlı olarak değişebilen belirtiler mevcuttur. Eğer ultrasonik ses basınç şiddeti çok fazla ise bu durum yorgunluk, bulantı, baş ağrısı ve baş dönmesi gibi belirtiler gösterir. Kulak çınlaması ve baş dönmesi gibi etkiler 40 kHz ve aşağısı gibi düşük taşıyıcı frekanslı ve yüksek ses basınç şiddetli ışımalarda daha çok görülmektedir. UI ortadan kaldırıldığında bu geçici belirtiler ortadan kalkmaktadır. UI'ya maruz kalınma insan bedeninin doğasına bağlıdır cümlesi üzerinden biraz daha derinleşerek konu teknik açıdan ele alınırsa. Bireyin UI maruz bırakılması ve bunun sağlık sorunlarına yol açabilmesi teknik açıdan ultrasonik taşıyıcı frekansa, desibel cinsinden ses basınç seviyesine, UI maruz kalınma süresine, taşıyıcı frekansın bant genişliğine, bireysel olarak yaşa hatta coğrafyalara göre değişiklik göstermektedir. Ultrasonik sesin kullanıldığı endüstri işlerinde çalışanların 100 ila 115 dB ses basınç seviyesi aralığında 20 kHz olan insan duyum üst sınırının daha da üstünde frekansa sahip ışımalara maruz kalındığında insan sağlığına bir tehdit oluşturmadığı ve bir duyum kaybına yol açmadığı bilinmektedir.(Lawton B.W. 2001) Ultrasonik ışımaya yapan cihazlarda ışımanın eksenine

ve başlangıç ses basınç seviyesine bağı olarak ultrasonik kaynaktan 1 metre uzaklık için hedeflenen ses basınç şiddeti 120 dB SPL e kadar çıkabilir. Fakat yoğun ışımaya maruz kalındığı tüketici tarafından bilinmelidir ve makul miktarda ses basınç şiddeti ile makul mesafeden UI maruz kalınmasının sağık açısından bir problem teşkil etmeyeceğı bilinçli bir tüketicinin aklından çıkmaması gereken önemli bir konudur.