

MÜZİK İŞARETLERİNDE ÖZNİTELİK BELİRLENMESİ: DOĞAL, EŞİTLENMİŞ VE YUVARLATILMIŞ SES DÜZENLERİ

FEATURE EXTRACTION FOR MUSIC SIGNALS: JUST TUNED, EQUAL TEMPERAMENT AND INTENSE DIATONIC SYSTEMS

Süleyman Gökhan Tanyer

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Mühendislik Fakültesi, Başkent Üniversitesi, Ankara
{gokhun.tanyer@gmail.com, gokhantanyer@baskent.edu.tr}

ÖZETÇE

Müzik işaretlerinin sayısal ortamda tanınması, sınıflandırması gibi web veya kütüphane inceleme uygulamalarında, öznelik belirleme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Özneliklerin kolay ve hızlı hesaplanabilir olmasının yanı sıra farklı sınıflar için oldukça farklı göstergeler sunabilmesi beklenmekte, ve hem kayıda dayalı veriler üzerinde hem de gerçek zamanlı uygulamalarda başarılı olmalıdır. Müzik işaretlerinin incelenerek öznelik elde edilmesi problemi uzun zamandır çalışmakta olan bir problem olması sebebiyle, farklı yöntemler geliştirilmiş ve geliştirilmektedir. Belirli bir kütüphanenin arkaplan koşulları ile sınıflandırılması veya tek bir parçanın veya bir grubun tespit edilmesi gibi ihtiyaçlarda, her bir müzik parçasının tümüne yakınının işlendiği yöntemlerde gecikmeler yaşanmaktadır. Müzik tarihinde farklı ses düzenlerinin geliştirilmiş olduğu; ülke, coğrafya, kültür gibi etkenler ile farklı ses düzenlerinin tercih edildiği görülmektedir. Belirli bir müzik arşivinin farklı tür müzik parçalarını içerebileceği dikkate alındığında, kuramsal özneliklerden faydalanılabilecektir. Bu çalışmada, en temel kuramsal öznelik olarak görülebilecek, doğuşkanların veya eşitlenmiş aralıkların kullanılmasının frekans oranlarına olan etkileri incelenmektedir. Elde edilen sonuçlar gelecekteki çalışmalara fayda sağlamak amacıyla tablo halinde sunulmaktadır.

ABSTRACT

Feature extraction of music signals are often required in applications including; identification and classification of music files over the web or a database. The feature observations for different classes are expected to be distinct, and also their computationally efficient implementations to be available. This is necessary both for offline and real time data processing. It is currently an active research field to improve available methods. The need for accurate analysis of a complete music tune conflicts with the time and computation efficiency requirements. Music theory offers new opportunities for feature extraction, especially the intervals systems which reflect the music's characteristics; historical background, geography and culture. Assuming that a standard database would consist of various type of music tunes, features related to the interval systems provide vast amount of opportunities in signal processing. In this work, both the interval systems using just tuning and equal temperaments are analyzed. The computed frequency ratios are tabulated, and proposed to be used for developing feature extraction problems.

1. GİRİŞ

Gürültü içinde kaybolmuş tek bir kelimeyi farketmek kadar 'kolay' bir işi aynı şekilde bilgisayar ortamında başarabilmek oldukça güçtür. Yazılımın başarısı ses (konuşma sesi)/gürültü oranına bağlı olarak belirlenmektedir. Ses şiddetinin gürültüye göre oranı azaldıkça, ses/gürültü oranı da azalmakta ve işlem zorlaşmaktadır. Başarılabilen en düşük seviye -5 dB olarak hesaplanmıştır [1]. Oysa, insan kulağı bu duruma göre karşılaştırılamayacak kadar daha zor problemleri farkedilmeden her an yapmaktadır, hem de merkezi işlemci çok daha farklı işlerle yoğun olsa bile. Benzeri problem müzik işaretlerinin tanıma, sınıflandırma gibi ihtiyaçlar ile incelenmesi probleminde yaşanmaktadır. Frekans bant genişlikleri, ritm gibi bir çok değişkeni birbirine benzeyebilecek, jazz, blues, klasik orkestra eşliğinde popüler müzik ve Türk halk müziği 'remix'i gibi parçaları kulağımız daha ilk 3-4 perdeyi dinler dinlemez ayırtılabilmektedir. Bu tür problemlerde, yeni tür özneliklere ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu çalışmada, farklı tür ses düzenleri incelenmiş ve doğal doğuşkanların kullanıldığı düzenlerin ortak öznelikleri ile eşitlenmiş ses düzenlerindeki farklılıklar incelenerek, gelecekteki çalışmalarda kullanılabilecek veriler Tablo I ve II'de verilmektedir.

2. MÜZİK SİSTEMİNDE OKTAVLAR İLE BEŞİNCİLER (BEŞLİLER)

Müzik tarihi incelenecek olursa, geliştirilen tüm ses düzenlerinin kulağımızın duyarak alışmış olduğu basit doğuşkanlara dayalı olduğu görülmektedir. Sade (küçük) rakamlar olan {1, 2, 3} başta olmak üzere nadiren {4, 5}'in de dahil edildiği bu küme kullanılarak türetilen oranlar, müzik çalgılarının akort edilmesinde ve perdelerin oluşturulmasında kullanılmıştır. Telli ve üfleli çalgılar başta olmak üzere tüm çalgılarda ses dalgalarının yaratmış olduğu duran dalga fiziğinin etkili olduğu, benzer şekilde insan kulağının algılamasında da benzeri duran dalga yapısının önem taşıdığı görülmektedir. Duran dalga oluşumu, normal şartlar altında duyulması mümkün olmayacak seviyedeki titreşimleri güçlendirilerek duyulabilmesini sağlamaktadır. Fiziksel gerekçelere dayalı bu tespit, müzik tarihinde doğuşkan olmayan oranların veya karmaşık doğuşkanların denenmiş olmasına rağmen kalıcı olamamasının sebebi olarak görülebilir [2-4]. Ancak günümüzde, eşitlenmiş aralıklara sahip piyano ile çok sesli ve çok oktavlı müziğin geliştirilmesinin önemli bir etkisiyle, eşitlenmiş oniki aralıklı (Eşit-12A) ses düzeni,

doğuşkanlara dayalı doğal ses düzenlerinin yanında oldukça kalıcı bir yer edinmiştir.

Müzik tarihinde, coğrafya, kültür, duygu (üzüntü, öfke, mutluluk gibi) farklılıklarından doğmakla birlikte, farklı tür çalgıların bir arada kullanılması ve kolay akort edebilme imkanlarının yaratılması gibi gerekçeler ile de farklı ses düzenleri geliştirilmiştir. Kulak zevkine uygun ve yeterli sayıda müzisyen desteğini alabilmiş olanların günümüze kadar yaşayabildikleri görülmektedir. Geçmiş 8,000 yıldan belki de çok daha gerilere gittiği tahmin edilen müzik tarihindeki gelişmeler, bilimsel tahmin yöntemi desteğinde aşağıda özetlenmektedir.

3. DOĞAL ARALIKLI SES DÜZENLERİ

Ses düzenleri, perdeler arasındaki frekans oranlarını veren değerler cinsinden tanımlanmaktadır. Kulağımızın logaritmik çalışması sebebiyle, bu oranlara *aralık* adı da verilmektedir. Doğal ses düzenlerindeki oran değerleri, $(2/1)^k$ ve $(3/2)^k$ şeklinde ifade edilebilecek *oktav* ve *beşlilerden* (*beşinci* olarak düzeltiyorum) oluşan, doğada da sıklıkla duymaya alıştığımız doğuşkanları kullanmaktadır. Diğer küçük {4, 5, 6, ...} yer aldığı ses düzenleri de doğal olup, beşinciler sınıfı dışında yer almaktadır.

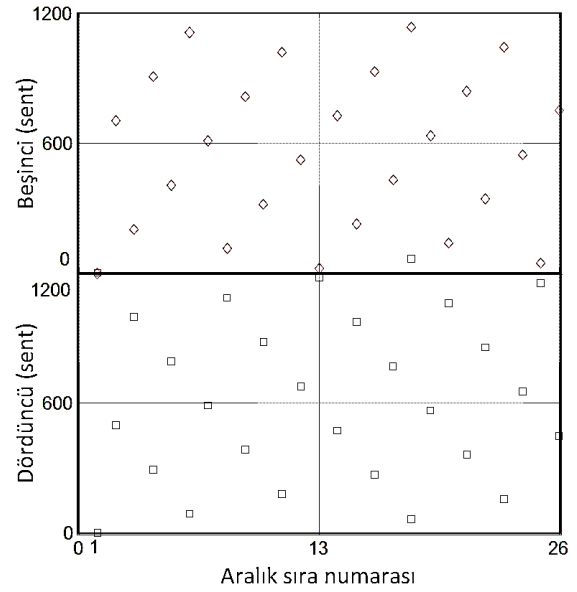
3.1. Doğal Beşincilerden Oluşan Ses Düzenleri

Herhangi bir cisme vurulduğunda ortaya çıkan doğuşkan frekanslarının en güçlü ilk bileşeni, *eş-ses* olarak da adlandırılan en düşük frekanslı (f_0) doğuşkanı, ikinci en güçlüsü frekansı iki katı olan (bir *oktav* üzerindeki ($2f_0$)) doğuşkandır. Daha sonra sırasıyla, $(3/2)f_0$ ve $(4/3)f_0$ doğuşkanları gelmektedir. Bu aralıkların, doğal yedi aralıklı (Doğal-7A) ses düzeninde dördüncü ve beşinci sırada yer almaları sebebiyle, *eş-ses* perdesinin frekansına olan oranları veren bu aralıklar, *dördüncü* ($4/3$) ve *beşinci* ($3/2$) olarak adlandırılmaktadır. Diğer beşincilerin üssel kuvvetlerine göre elde edilişi ve oktav çemberi üzerindeki yerleri Şekil 1 ve 2’de gösterilmektedir. Doğal-53A ses düzenindeki aralıkların oktav çemberi üzerindeki konumları [4, 5]’te incelenmektedir.

Bilimsel tahmin yöntemiyle sıralanmak istenirse, perdelerin basit (küçük) rakamlardan büyüğe doğru keşfedilmiş olduğu kabul edilebilir. İlk olarak, işitilme olasılığı en yüksek olan, belirli bir perdenin tekrar edilmesi ile *eş-ses* ($1/1$) elde edilmiş, sonrasında aynı ‘*ton*’ algılamasının *oktav* aralığı ($2/1$) ile elde edildiği ve sonrasında sırasıyla; üst birinci *beşinci* ($3/2$), alt birinci *beşinci* (*dördüncü*) ($4/2$) keşfedilmiş olmalıdır [4, 6]. Sonrasındaki deneyler sayesinde, özellikle çok telli çalgılarda basılı bir telin perdesinin aynen bir alttaki bam (serbest) teline taşınması yoluyla tiz (üst) beşincilerin, kalın tellerdeki pes (alt) beşincilerin de benzer şekilde keşfinin önü açılacaktır. Yaygın olarak kullanılan beşincilerin ilk 52’si ve ilgili doğal aralıklı ses düzenleri Tablo I’de verilmiştir.

3.2. Diğer Doğal Aralıklı Ses Düzenleri

İnsan kulağına en yakın, alışıktığımız sesler; *eş-ses* ($1/1$), *oktav* ($2/1$), *beşinci* ($3/2$) ve bu oranların kuvvetlerinden oluşmaktadır. {1, 2, 3} kümesini diğer küçük rakamlar; {4, 5, 6, ...} izlemektedir. Oktavlar ve beşinciler dışındaki diğer doğal oranlar tarih boyunca incelenmiş ve farklı doğal ses düzenleri önerilmiştir [3, 4, 7, 8]. Günümüzde, sinema müzikleri başta olmak üzere farklı ortamlarda karşılaşılabilen bu ses düzenlerinden temel iki sınıfa ait örnekler (*Doğal-k/NA*



Şekil 1. Aralık sıra numarasına (üssel kuvvetine) göre beşinci ve dördüncülerden elde edilen aralık değerleri (sent).

ile *Lambda* matrisi) Şekil 3 ve 4’te verilmiştir.

4. EŞİTLENMİŞ VEYA YUVARLATILMIŞ ARALIKLI SES DÜZENLERİ

Eşitlenmiş farklı ses düzenlerinde olduğu gibi, Eşit-12A ses düzeni de $(2/1)^{k/12}$ gibi doğuşkan olmayan rasyonel sayılara dayanmaktadır. Günümüzde, farklı tür eşitlenmiş aralıklı ses düzenleri bulunmaktadır. Müzik tarihindeki belki de en geleneksel doğuşkan beşinciler ses düzeni olarak kabul edilebilecek Türk makamları için bile günümüzde eşitlenmiş ses düzenleri önerilmektedir (*Oransay-Eşit-29A*, *Karadeniz-Eşit-(41/53)A*, *Karaduman-Eşit-72A* ve *Yarman-Eşit-79A* gibi). Beşinci içermeyen *Eşitlenmiş N aralıklı* (*Eşit-NA*) ses düzeni’ndeki aralıklar, bir oktav aralığı *N* sayıda eşit yarım adıma bölünerek hesaplanabilmektedir.

$$y = 2^{1/N} \quad (1)$$

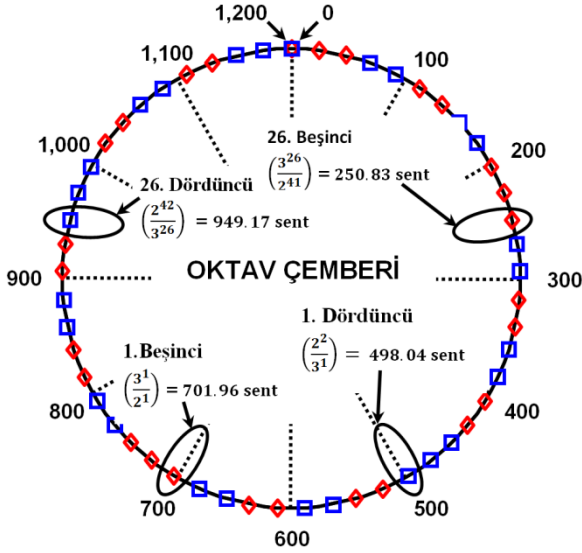
Bohlen-Pierce örneğinde olduğu gibi, oktav dışındaki aralıkların eşit yarım adımlara bölündüğü durumlarda

$$y = A^{1/N} \quad (2)$$

ifadesi elde edilebilmektedir.

5. SONUÇLAR

Müzik işaretlerinde tanıma, sınıflandırma ve benzeri uygulamalarda faydalanılabilecek öznel belirlenmesi amacıyla, farklı ses düzenleri kuramsal açıdan incelenmiştir. Doğal beşinci doğuşkanlarından faydalanan ses düzenleri; Doğal-5A, 7A, 12A, 24A, 37A ve 53A ilk defa eksiksiz bir küme olarak birlikte Tablo I’de incelenmiştir. Beşinciler dışındaki doğuşkanların türetildiği; *Doğal-k/N* ile *Lambda* matrisi Şekil 3-4’te incelenmiştir. Daha sonra diğer grup olarak ayrılan; doğal olmayan eşitlenmiş veya yuvarlatılmış düzenler Tablo II’de, *Eşit-12A* düzeni ile *Eşit-NA* çözümü (1-2)’de sunulmuştur. Öznel belirlenme çalışmalarında perdelerle ilişkin frekansların hesaplanmasına imkan verecek oranlar örnek frekanslar ile birlikte verilmiştir.



Şekil 2. Oktav çemberi üstünde beşinciler, (elmas) üst (tiz) beşinciler, (kare) alt (pest) beşinciler (dördüncüler). 26 adet beşinci ve 26 adet dördüncü gösterilmiştir. Daha üst veya alt beşinciler yaklaşık olarak tekrarlamakta olduğu kabul edilerek gösterilmemiştir.

(14/14)	(14/13)	(14/12)	(14/11)	(14/10)	(14/9)	(14/8)
(26/14)	(13/13)	(13/12)	(13/11)	(13/10)	(13/9)	(13/8)
(24/14)	(24/13)	(12/12)	(12/11)	(12/10)	(12/9)	(12/8)
(22/14)	(22/13)	(22/12)	(11/11)	(11/10)	(11/9)	(11/8)
(20/14)	(20/13)	(20/12)	(20/11)	(10/10)	(10/9)	(10/8)
(18/14)	(18/13)	(18/12)	(18/11)	(18/10)	(9/9)	(9/8)
(16/14)	(16/13)	(16/12)	(16/11)	(16/10)	(16/9)	(8/8)

(a)

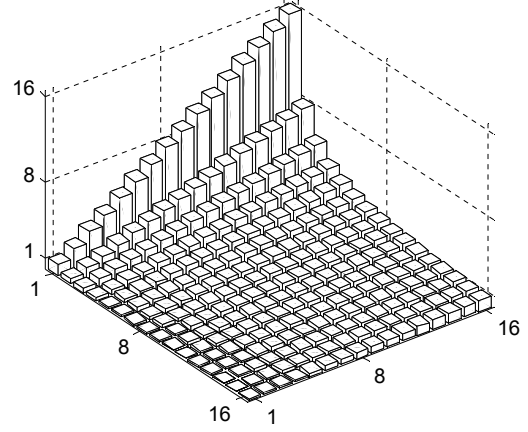
18/18	18/17	18/16	18/15	18/14	18/13	18/12	18/11	18/10
34/18	17/17	17/16	17/15	17/14	17/13	17/12	17/11	17/10
32/18	32/17	16/16	16/15	16/14	16/13	16/12	16/11	16/10
30/18	30/17	30/16	15/15	15/14	15/13	15/12	15/11	15/10
28/18	28/17	28/16	28/15	14/14	14/13	14/12	14/11	14/10
26/18	26/17	26/16	26/15	26/14	13/13	13/12	13/11	13/10
24/18	24/17	24/16	24/15	24/14	24/13	12/12	12/11	12/10
22/18	22/17	22/16	22/15	22/14	22/13	22/12	11/11	11/10
20/18	20/17	20/16	20/15	20/14	20/13	20/12	20/11	10/10

(b)

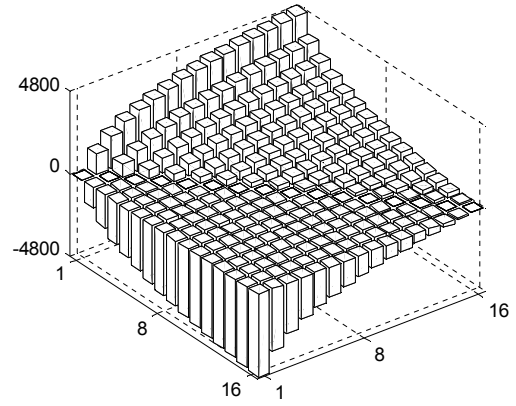
Şekil 3. İlk defa El-Jurjani tarafından $N = 3, 5$ için önerilmiş olduğu kabul edilen ve daha sonra; Meyer tarafından $N = 5, 7$, Forster tarafından $N = 11, 13$ ve son olarak Tanyer tarafından [5] $N = 15, 17, \dots$ için çözüme kavuşturulan Doğal- k/N aralıklı ses düzeni, (a) $N = 13$, (b) $N = 17$.

1/1	2/1	3/1	4/1	5/1	6/1	7/1
1/2	2/2	3/2	4/2	5/2	6/2	7/2
1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3	7/3
1/4	2/4	3/4	4/4	5/4	6/4	7/4
1/5	2/5	3/5	4/5	5/5	6/5	7/5
1/6	2/6	3/6	4/6	5/6	6/6	7/6
1/7	2/7	3/7	4/7	5/7	6/7	7/7

(a)



(b)



(c)

Şekil 4. Lambdoma matrisine göre belirlenen aralık değerleri, (a) yedili, (b, c) onaltılı Lambdoma matrisi, (b) oran, (c) sent değerleri.

TABLO I. Doğal aralıklı ses düzenleri, ilk 52 beşinci aralıkları için üssel değerler $\{m, n\}$, oran ve Do dizeyi örneği için Hertz cinsinden frekans değerleri

m	n		Doğal Aralıklı Ses Düzenleri*						Oran	f (Hertz)	
			5A	7A	12A	24A	37A	53A			
0	0	(1/1)	0	0	0	0	0	0	Do ^A C3	1,000	130,81
12	19	↑12					1	1		1,014	132,59
24	38	↑24						2		1,027	134,40
17	27	↓17						2	3	1,039	135,95

5	8	↓5			1	1	3	4	C#	1,053	137,81		
7	11	↑7				2	4	5		1,068	139,69		
19	30	↑19						6		1,082	141,59		
22	35	↓22						7		1,095	143,23		
10	16	↓10				4	5	8		1,110	145,18		
2	3	↑2		2	3	5	6	9	Re D3	1,125	147,16		
14	22	↑14						7	10		1,140	149,17	
26	41	↑26							11		1,156	151,20	
15	24	↓15						8	12		1,169	152,95	
3	5	↓3	2	3	4	6	9	13	D#	1,185	155,03		
9	14	↑9				7	10	14		1,201	157,15		
21	33	↑21						15		1,218	159,29		
20	32	↓20						16		1,232	161,13		
8	13	↓8				8	11	17		1,249	163,33		
4	6	↑4			5	9	12	18	Mi E3	1,266	165,56		
16	25	↑16						13	19		1,283	167,82	
25	40	↓25							20		1,298	169,75	
13	21	↓13						14	21		1,315	172,07	
1	2	↓1	3	4	6	10	15	22	Fa F3	1,333	174,41		
11	17	↑11						11	16	23		1,352	176,79
23	36	↑23								24		1,370	179,20
18	29	↓18						17 [∇]	25			1,386	181,27
6	10	↓6			7	12	18	26				1,405	183,74
6	9	↑6			7	13	19	27	F#	bG		1,424	186,25
18	28	↑18						20 [∇]	28			1,443	188,79
23	37	↓23							29			1,460	190,97
11	18	↓11					14	21	30			1,480	193,57
1	1	↑1	4	5	8	15	22	31	Sol G3	1,500	196,22		
13	20	↑13				23	32					1,520	198,89
25	39	↑25								33		1,541	201,61
16	26	↓16						24	34			1,559	203,93
4	7	↓4			9	16	25	35		G#		1,580	206,71
8	12	↑8				17	26	36				1,602	209,53
20	31	↑20						37				1,624	212,39
21	34	↓21						38				1,642	214,84
9	15	↓9					18	27	39			1,665	217,77
3	4	↑3		6	10	19	28	40	La A3	1,688	220,74		
15	23	↑15					29	41				1,711	223,75
26	42	↓26						42				1,730	226,33
14	23	↓14				30	43					1,754	229,42
2	4	↓2	5	7	11	20	31	44	A#	1,778	232,55		
10	15	↑10				21	32	45				1,802	235,72
22	34	↑22						46				1,827	238,94
19	31	↓19						47				1,848	241,69
7	12	↓7				22	33	48				1,873	244,99
5	7	↑5			12	23	34	49	Si B3	1,898	248,33		
17	26	↑17					35	50				1,924	251,72
24	39	↓24						51				1,947	254,62
12	20	↓12				24	36	52				1,973	258,10
	(2/1)		6	8	13	25	37	53	Do C4	2,000	261,62		

(*) Doğal-24A düzeninde eksik olan makamlar; DG: *Dik Gerdaniye*, DP: *Dik Puselik*, Tanyer-Doğal-37A: Eksik makamlar dahil olmak üzere unutulmuş olabilecek makamları da içermek üzere Türk Makamları için önerilen yeni ses düzeni [5], Doğal-53A: Ses düzeni olmaması rağmen, beşincilerin kullanıldığı tüm diğer ses düzenleri için eksiksiz beşinci kümesini oluşturmaktadır [2, 4], ↑: Üst (tiz) beşinci ($3^m/2^n$), ↓: Alt (pes) beşinci (dördüncü) ($2^n/3^m$), (∇) Doğal-37A ses düzeninde önerilen en büyük dereceli iki beşincinin (üst: ↑18, alt: ↓18) sıkıntı yaratma ihtimaline rağmen korunmuştur. Bu konuda son söz hakkı müzik icracılarına bırakılmıştır. Bu iki yüksek beşincinin ses

düzeninden çıkarılması halinde, ses düzeni Doğal-35A olarak adlandırılmalıdır, (Δ) Örnek olarak Do (C3) dizeyi alınmıştır. Farklı bir perde eş-ses olarak seçildiği takdirde, oranlar korunarak yeni frekanslar benzer şekilde hesaplanabilecektir, boş kutuların bulunduğu aralık değerleri ilgili ses düzeninde kullanılmamaktadır.

TABLO II. Eşitlenmiş veya yuvarlatılmış aralıklı ses düzenleri, Do dizeyi örneği için Hertz cinsinden frekans değerleri

Perde	Düzenli-7A		Çeyrek-12A*		Eşit-12A	
	Oran	Hz.	Oran	Hz.	k Oran	Hz.
Do ^Δ C3	(1/1)	130.81	$x^0 2^0$	1.000 130.81	0	1.000 130.81
C#			$x^{-5} 2^3$	1.070 139.96	1	1.060 138.59
Re D3	(9/8)	147.16	$x^2 2^{-1}$	1.118 146.25	2	1.123 146.83
D#			$x^{-3} 2^2$	1.96 156.49	3	1.189 155.56
Mi E3	(5/4)	163.52	$x^4 2^{-2}$	1.250 163.52	4	1.260 164.81
Fa F3	(4/3)	174.41	$x^{-1} 2^1$	1.338 174.96	5	1.335 174.61
F#			$x^{-6} 2^4$	1.431 187.20	6	1.414 184.99
Sol G3	(3/2)	196.22	$x^1 2^0$	1.4953 195.61	7	1.498 195.99
G#			$x^{-4} 2^3$	1.600 209.30	8	1.587 207.65
La A3	(5/3)	218.02	$x^3 2^{-1}$	1.672 218.69	9	1.681 220.00
A#			$x^{-2} 2^2$	1.789 234.00	10	1.781 233.08
Si B3	(15/8)	245.27	$x^5 2^{-2}$	1.869 244.51	11	1.888 246.94
Do C4	(2/1)	261.62	(2/1)	2.000 261.62	12	2.000 261.62

(*) $x = 5^{-1/4}$, dikkat edilecek olursa, *Çeyrek-12A* için tüm beşinciler, birinci üçüncünün (5/4) değerine ulaşabilmesi amacıyla pes yönüne kaydırılmıştır. Eşit-12A dışındaki düzenler zaman içerisinde unutulmuş olduğundan, günümüz için nadir, kuramsal düzenler olarak kabul edilebilmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] S. G. Tanyer, H. Özer, 'Voice activity detection in nonstationary noise', IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, Vol. 8, No. 4, syf.478-482, Haziran 2000.
- [2] A. Zeren (2003), Müzik Fiziği, İkinci Baskı, Pan Yayıncılık, İstanbul.
- [3] S. G. Tanyer, 'Müzik yeni doğuşkan arayışı konusundaki El-Jurjani'nin 1,000 yıllık işaret işleme probleminin nihayı çözümü', IEEE 22. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, SİU-2014, Trabzon, 23-25 Nisan, 2014, başvurusu yapılmıştır.
- [4] S. G. Tanyer, 'Müziğin Doğası – Matematiğin Sesi', yayınlanma çalışmaları devam etmektedir.
- [5] S. G. Tanyer, 'Müzikte doğal 37 aralıklı ses düzeni: Türk Makamları kuramında ihtiyaç duyulan doğuşkanların eksiksiz havuzu', IEEE 22. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, SİU-2014, Trabzon, 23-25 Nisan, 2014, başvurusu yapılmıştır.
- [6] A. Zeren (2008), Müzikte Ses Sistemleri, İkinci Baskı, Pan Yayıncılık, İstanbul.
- [7] B. Hero, R. M. Foulkrod, 'The lambdoma matrix and harmonic intervals', IEEE Engineering in Medicine and Biology, Mart-Nisan 1999.
- [8] C. Forster, 'Musical Mathematics – On the art and science of acoustic instruments', Chrysalis Foundation, 2010.