

**T.C.  
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ**

**SES SENTEZLEME YÖNTEMLERİ VE SES  
SENTEZLEYİCİ TASARIMI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**RAMAZAN BATALP ÇETİN**

**İSTANBUL, 2016**



**T.C**  
**BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ SES TEKNOLOJİLERİ**

**SES SENTEZLEME YÖNTEMLERİ VE SES  
SENTEZLEYİCİ TASARIMI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**RAMAZAN BATALALP ÇETİN**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Yahya Burak Tamer**

**İSTANBUL, 2016**

**T.C.**  
**BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**SES TEKNOLOJİLERİ**

Tezin Adı: Ses Sentezleme Yöntemleri Ve Synthesizer Tasarımı  
Öğrencinin Adı Soyadı: Ramazan Baturalp ÇETİN  
Tez Savunma Tarihi:24.05.2016

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

Doç.Dr Nafiz Arıca  
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 Yahya Burak Tamer

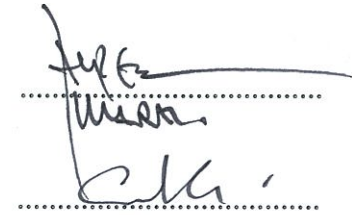
Üye

Doç.Dr. Hakkı Alper Maral

Üye

Yrd.Doç.Dr, Can Karadoğan







## ÖZET

### SES SENTEZLEME YÖNTEMLERİ VE SES SENTEZLEYİCİ TASARIMI

Ramazan Baturalp Çetin

Ses Teknolojileri

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Yahya Burak Tamer

Mayıs 2016, 98 Sayfa

Her sesin farklı bir frekans, faz ve zarf bilgileri vardır. İstenilen sesleri elde etmek amacıyla birbirinden farklı algoritmalar geliştirilmiştir. Çoğu üretici ya da ses mühendisi istediği sesi oluşturmak için çeşitli *synthesizer*'lar yani ses sentezleyiciler kullanırlar. Bu ses sentezleyiciler müzik, reklam, film, oyun ve medya gibi alanlarda ses tasarımı için sıkça kullanılmaktadır. Her ses sentezleyicinin tasarımının temsil ettiği belli bir ses dünyası vardır. Şu an dünyada bir çok ses sentezleyici bulunmaktadır. Ülkemizde de bu konu ile ilgili çok büyük çalışmalar yapan *Synthmaster* isimli bir ses sentezleyici yazılımı bulunmaktadır. Bu tezin amacı ise ses sentezleme yöntemlerini detaylı bir şekilde araştırarak, *Pure Data* yazılımı yardımı ile bu sentez yöntemlerinden bazılarını kullanarak farklı bir sinyal akışı ile ses mühendislerine, üreticilere ve müzisyenlere farklı bir alternatif sunmaktır. Bu ses sentezleyicinin tasarımında klasik ses sentezleme yöntemleriyle *Karplus-Strong* algoritması farklı bir sinyal akışı ile birleştirilmiştir. Tasarlanan ses sentezleyici ile 10 farklı ses rengi tasarlanmış ve bu tezle incelenerek sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Ses Teknolojileri, Ses Mühendisliği, Ses Sentezleme, Synthesizer, Ses Sentezleyici

## ABSTRACT

### SOUND SYNTHESIS TECHNIQUES AND SYNTHESIZER DESIGN

Ramazan Baturalp Çetin

Audio Technologies

Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Yahya Burak TAMER

May 2016, 98 Pages

Every sound has a unique frequency, phase and envelope. There are many algorithms to choose from when it comes to create a specific sound. Many producers and sound engineers use synthesizers to create sound. These synthesizers are being used to design sound for many media such as Music, Advertising, Movies, Games etc. Every synth represents a different sound world. There are a lot of synths being used worldwide. In Turkey, Synthmaster is the most important Synthesizer Software. In my thesis, I'll be evaluating all of the synthesizing methods in detail while trying to show new methods to the producers and engineers using a different signal chain on Pure Data. In this particular synth, Karplus-Strong algorithm is combined with the classic way of synthesizing through the signal chain. This combination provides 10 different sound color and timbres which will be evaluated in this thesis.

**Key Words:** Sound Technology, Sound Engineering, Sound Synthesis, Synthesizer, Sound Synthesizer

# İÇİNDEKİLER

|  |      |
|--|------|
| TABLolar   | viii |
| ŞEKİLLER   | ix   |
| KISALTMALAR  | xiii |
| SEMBOLLER  | xiv  |
| 1. GİRİŞ   | 1    |
| 2. GENEL BİLGİLER  | 2    |
| 2.1 DALGA FORMLARI   | 2    |
| 2.2 SES SENTEZLEME TEKNİKLERİ  | 9    |
| 2.2.1 Eklemeli Sentezleme  | 10   |
| 2.2.2 Eksiltmeli Sentezleme ve Filtreler                               | 14   |
| 2.2.3 Modülasyon ile Sentezleme Yöntemleri                             | 18   |
| 2.2.3.1 Genlik Modülasyonu(AM)   | 19   |
| 2.2.3.2 Ring Modülasyonu   | 22   |
| 2.2.3.3 Frekans Modülasyonu  | 24   |
| 2.2.4 Dalga Şekillendirme(Waveshaping) ile Sentezleme                  | 29   |
| 2.2.8 Faz Distorsiyonu İle Sentezleme (Phase Distortion Synthesis)     | 32   |
| 2.2.5 Dalga Tablosu(Wavetable) Sentezleme                              | 36   |
| 2.2.6 Vektör Sentezleme  | 39   |
| 2.2.8 Karplus-Strong Algoritması                                       | 45   |
| 3. VERİ VE YÖNTEM  | 49   |
| 3.1 SYNTHESIZER TASARIMI   | 49   |
| 3.1.1 Synthesizerin Genel Olarak İncelenmesi Ve Pure Data'da Yazılması | 55   |
| 4. BULGULAR  | 65   |
| 4.1 Ses 1 - Lead Synth   | 65   |
| 4.2 Ses 2 - Marimba  | 65   |
| 4.3 Ses 3 - Hard Guitar  | 66   |
| 4.4 Ses 4 - SFX1   | 67   |
| 4.5 Ses 5 - Dark Synth   | 68   |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 4.6.Ses 6 - Wobble Synth       | 69 |
| 4.7 Ses 7 - Lead Synth .....   | 70 |
| 4.8 Ses 8 - Lead Synth 2 ..... | 71 |
| 4.9 Ses 9 - SFX 2 .....        | 72 |
| 4.10 Ses 10 - Bass Guitar..... | 73 |
| 5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....      | 75 |
| KAYNAKÇA .....                 | 77 |





## TABLULAR

Tablo 2.1: Transfer Fonksiyonuna Bağlı Olarak Üretilen Harmoniklerin Genlikleri

.....32



## ŞEKİLLER

|   |    |
|---|----|
| Şekil 2.1: Dalga formu bileşenleri.....   | 3  |
| Şekil 2.2: Dalga formu harmonikleri.....  | 3  |
| Şekil 2.3: Sinüs dalga.....   | 4  |
| Şekil 2.4: Üçgen dalga.....   | 4  |
| Şekil 2.5: Üçgen dalga harmonikleri.....  | 5  |
| Şekil 2.6: Testere dalga.....   | 5  |
| Şekil 2.7: Testere dalga harmonikleri.....  | 6  |
| Şekil 2.8: Kare dalga.....  | 6  |
| Şekil 2.9: Kare dalga harmonikleri.....   | 7  |
| Şekil 2.10: Pulse genişliği.....  | 7  |
| Şekil 2.11: Beyaz gürültü .....   | 8  |
| Şekil 2.12: Pembe gürültü .....   | 8  |
| Şekil 2.13: Trompet tonunun zaman ile değişen spektrumu.....                                | 12 |
| Şekil 2.14: Dijital eklemeli sentezleme.....  | 12 |
| Şekil 2.15: Analog eklemeli sentezleme.....   | 13 |
| Şekil 2.16: Eklemeli sentezleme yöntemi ile 110 Hz temel doğuşkanlı kare dalga oluşumu..... | 13 |
| Şekil 2.17: Eklemeli analiz/tekrar sentezleme yöntemi.....                                  | 14 |
| Şekil 2.18: Alt geçirgen filtre.....  | 16 |
| Şekil 2.19: Üst geçirgen filtre.....  | 16 |
| Şekil 2.20: Alt geçirgen filtre ve üst geçirgen filtre birleşimi.....                       | 17 |
| Şekil 2.21: Bant geçirgen filtre.....   | 17 |
| Şekil 2.22: Çentik(notch) filtre.....   | 18 |
| Şekil 2.23: Bipolar ve unipolar sinyal.....   | 19 |
| Şekil 2.24: Genlik modülasyonu.....   | 20 |
| Şekil 2.25: Genlik modülasyonu ve yan bant oluşumu.....                                     | 21 |
| Şekil 2.26: Modülasyon indeksi 0.5 olduğu durumdaki genlik modülasyonu.....                 | 21 |
| Şekil 2.27: Modülasyon indeksi 1 olduğu durumdaki genlik modülasyonu.....                   | 23 |
| Şekil 2.28: Ring modülasyonu spektrumu.....   | 23 |
| Şekil 2.29: Ring modülasyonu dalga formu analizi.....                                       | 26 |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 2.30: Yamaha marka dijital ses sentezleyici.....                           | 27 |
| Şekil 2.31: Frekans ve genlik modülasyonu.....                                   | 27 |
| Şekil 2.32: Pure data yazılımı yardımı ile frekans modülasyonu sinyal akışı..... | 28 |
| Şekil 2.33: Frekans modülasyonunda ortaya çıkan yan bantlar.....                 | 28 |
| Şekil 2.34: Modülasyon indeksine bağlı olarak yan bant oluşumu.....              | 29 |
| Şekil 2.35: Bessel fonksiyonunun üç boyutlu grafiği.....                         | 30 |
| Şekil 2.36: Kosinüs dalga şekillendirme.....                                     | 31 |
| Şekil 2.37: $f(x)=x^2$ grafiği.....  | 31 |
| Şekil 2.38: Testere dalga şekillendirme.....                                     | 31 |
| Şekil 2.39: Giren sinyal ve transfer fonksiyonu ilişkisi.....                    | 33 |
| Şekil 2.40: Casio cz serisi.....   | 34 |
| Şekil 2.41: Faz distorsiyonu gösterimi.....                                      | 34 |
| Şekil 2.42: Faz distorsiyonu gösterimi.....                                      | 35 |
| Şekil 2.43: Faz distorsiyonu gösterimi.....                                      | 35 |
| Şekil 2.44: Faz distorsiyonu gösterimi.....                                      | 35 |
| Şekil 2.45: Faz modülasyonu gösterimi.....                                       | 36 |
| Şekil 2.46: Modülasyon ile sentez tekniklerinin dijital gösterimi.....           | 38 |
| Şekil 2.47: Dalga tablosunun grafik ile gösterimi.....                           | 39 |
| Şekil 2.48: Dalga tablosu sentezleme ile testere dalga oluşumu.....              | 39 |
| Şekil 2.49: 1000 hz ile dalga tablosu dinleme.....                               | 40 |
| Şekil 2.50: Prophet vs ses sentezleyici.....                                     | 44 |
| Şekil 2.51: Analog dijital dönüştürücü kullanılarak ses örnekleme.....           | 44 |
| Şekil 2.52: Ses örneğinin tanecik olarak oluşturulması.....                      | 44 |
| Şekil 2.53: Ses taneciği oluşturma metodu.....                                   | 45 |
| Şekil 2.54: Tanecik zarfları.....  | 46 |
| Şekil 2.55: Karplus-strong algoritması sinyal akışı.....                         | 47 |
| Şekil 2.56: Karplus-strong algoritması pure data ile gösterimi.....              | 48 |
| Şekil 2.57: Pure data yardımı ile tasarlanan ses sentezleyici.....               | 52 |
| Şekil 2.58: Tasarlanan ses sentezleyicinin sinyal akışı.....                     | 53 |
| Şekil 2.59: Tasarlanan ses sentezleyicinin block diagramı.....                   | 54 |
| Şekil 2.60: Dalga tiplerinin pure data'da yazılması.....                         | 54 |
| Şekil 2.61: Perde bölümünün pure data'da yazılması.....                          | 55 |

|   |    |
|---|----|
| Şekil 2.62: Osilatör genel görünümü.....  | 55 |
| Şekil 2.63: Zarf bölümünün pure data'da yazılması.....                          | 56 |
| Şekil 2.64: Genlik modülasyonu bölümünün pure data'da yazılması.....            | 56 |
| Şekil 2.65: Ring modülasyonu bölümünün pure data'da yazılması.....              | 57 |
| Şekil 2.66: Karplus-Strong bölümünün pure data'da yazılması.....                | 57 |
| Şekil 2.67: Dalga şekillendirme bölümünün pure data'da yazılması.....           | 57 |
| Şekil 2.68: Vco mixer bölümünün pure data'da yazılması.....                     | 58 |
| Şekil 2.69: Filtreler bölümünün pure data'da yazılması.....                     | 58 |
| Şekil 2.70: Reverb, delay ve chorus bölümlerinin pure data'da yazılması.....    | 59 |
| Şekil 2.71: Vibrato ve portamento bölümünün pure data'da yazılması.....         | 59 |
| Şekil 2.72: Metronome bölümünün pure data'da yazılması.....                     | 60 |
| Şekil 2.73: Sample bölümünün pure data'da yazılması.....                        | 60 |
| Şekil 2.74: TouchOSC programı ile kontrol arayüzünün hazırlanması.....          | 61 |
| Şekil 2.75: TouchOSC programından gelen kodların tasarıma entegre edilmesi..... | 61 |
| Şekil 2.76: TouchOSC uygulamasunda tasarlanan sayfa1.....                       | 62 |
| Şekil 2.77: TouchOSC uygulamasunda tasarlanan sayfa2.....                       | 62 |
| Şekil 2.78: TouchOSC uygulamasunda tasarlanan sayfa3.....                       | 63 |
| Şekil 2.79: TouchOSC uygulamasunda tasarlanan sayfa4.....                       | 63 |
| Şekil 2.80: TouchOSC uygulamasunda tasarlanan sayfa5.....                       | 64 |
| Şekil 2.81: TouchOSC uygulamasunda tasarlanan sayfa6.....                       | 64 |
| Şekil 2.82: TouchOSC uygulamasunda tasarlanan sayfa7.....                       | 65 |
| Şekil 2.83: TouchOSC uygulamasunda tasarlanan sayfa8.....                       | 66 |
| Şekil 2.84: Ses1-lead synth için parametre kullanımı.....                       | 67 |
| Şekil 2.85: Ses2-marimba için parametre kullanımı.....                          | 68 |
| Şekil 2.86: Ses3-hard gitar için parametre kullanımı.....                       | 69 |
| Şekil 2.87: Ses4-sfx1 için parametre kullanımı.....                             | 70 |
| Şekil 2.88: Ses5-dark synth için parametre kullanımı.....                       | 70 |
| Şekil 2.89: Ses6-wobble synth için parametre kullanımı.....                     | 71 |
| Şekil 2.90: Ses7-lead synth için parametre kullanımı.....                       | 71 |
| Şekil 2.91: Ses8-lead synth 2 için parametre kullanımı.....                     | 72 |
| Şekil 2.92: Ses9-sfx2 için parametre kullanımı.....                             | 73 |
| Şekil 2.93: Ses10-bass gitar için parametre kullanımı.....                      | 74 |



## KISALTMALAR

|     |   |                                      |
|-----|---|--------------------------------------|
| AM  | : | <i>Amplitude Modulation</i>          |
| BP  | : | Band Pass Filter                     |
| BPM | : | <i>Beat Per Minute</i>               |
| DCO | : | <i>Digital Controlled Oscillator</i> |
| DAW | : | <i>Digital Audio Workstation</i>     |
| FM  | : | Frequency Modulation                 |
| FOF | : | <i>Fonction D'onde Formantique</i>   |
| FFT | : | <i>Fast Fourier Transform</i>        |
| HPF | : | High Pass Filter                     |
| LPF | : | <i>Low Pass Filter</i>               |
| RM  | : | <i>Ring Modulation</i>               |
| VCF | : | <i>Voltage Controlled Filter</i>     |
| VCO | : | <i>Virtual Controlled Oscillator</i> |
| WAV | : | <i>Waveform Audio File Format</i>    |

## SEMBOLLER

|                 |   |     |
|-----------------|---|-----|
| Beat Per Minute | : | bpm |
| Desibel         | : | dB  |
| Frekans         | : | f   |
| Hertz           | : | Hz  |
| Kilo Hertz      | : | kHz |
| Milisaniye      | : | ms  |
| Saniye          | : | s   |



## 1. GİRİŞ

Bilgisayar yolu ile ya da akustik yollarla üretilen her sesin sahip olduğu frekans, zarf ve faz bilgisi bulunmaktadır. Bu bilgiler her bir sesin karakterini ortaya koymaktadır. Her var olan ses, ses sentezleme yöntemleri ile elde edilebilir. Bu tezde başlıca ses sentezleme yöntemleri ve ses sentezleyici tasarımı konusu ele alınmaktadır. Bu sayede ses sentezleme yöntemlerini detaylı araştırılmış ve bu bilgiler ışığında bir ses sentezleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan ses sentezleyici de, birden fazla ses sentezleme tekniği kullanılmıştır. Ancak tasarımı farklı kılan sentez tekniği ise *Karplus-Strong* algoritması olmuştur. Bu algoritmanın kullanılma amacı ise bu zamana kadar bu konu ile önemli bir çalışmanın olmamasıdır. Bu algoritmanın sağladığı avantaj ise genellikle telli çalgılar ile üretilen seslerin elde edilebilmesinin çok kolay olmasıdır. Bu tasarım *Pure Data* yazılımı yardımı ile oluşturulmuştur. Oluşturulan tasarımın ses mühendislerine ve prodüktörlere farklı bir alternatif sunması amaçlanmıştır. Tasarım bölümüne kadar ses sentezleme yöntemlerinde sırasıyla, eklemeli sentezleme, eksiltmeli sentezleme, modülasyon ile sentezleme, dalga şekillendirme ile sentezleme, faz distorsiyonu ile sentezleme, dalga tablosu ile sentezleme, vektör sentezleme, granüler sentezleme ve *Karplus-Strong* algoritması şeklinde incelenmiştir.



## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1 DALGA FORMLARI

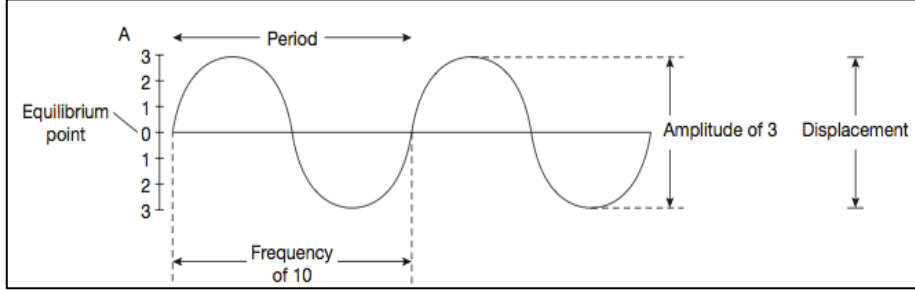
Dalga formları periyodik salınımlar üreten osilatör adı verilen devre elemanları ile oluşturulur. Osilatörler, insan duyum aralığındaki (20Hz-20Khz) tüm frekansları üretebilirler. Aynı zamanda duyamadığımız *subsonic* (ses altı) dalgalar (20 Hz'in altı) ve *ultrasonic* (ses üstü, 20Khz'in üstü) dalgalar üretebilirler. Ancak bu dalgalar, diğer dalgalarla birleştiğinde duyulabilir bir sonuç ortaya çıkabilir. Osilatörler ses sentezleyicilerin temel yapıtaşlarından birisidir (Holmes 2008, s. 180).

Çoğu ses sentezleyicilerde osilatörler, osilatör ya da kısaltması *osc* olarak belirtilir. Aynı zamanda *VCO* ya da *DCO* olarak görülebilir. Bazı ses sentezleyicilerde ise *Source* ya da *Sound Source* olarak da adlandırılmış olabilir. Osilatörlerin ürettiği dalga formlarının tümü, merkez doğrudan eşit uzaklıkta pozitif-negatif kutuplarda yer değişim oluştururlar. Dalga formları arasındaki en önemli fark pozitif ve negatif kutuplarda voltaj değişim oranları ve tutarsız yön değişimleridir. Çeşitli osilatörler aynı temel frekans üretse bile birbirinden farklı şekilleri ile son derece farklı özellikte ton üretebilirler (Shepard 2013, s.37). Şekil 2.1'de dalga formunun karakteristik özellikleri gösterilmiştir. Dalganın yayıldığı orta noktaya denge noktası adı verilmiş aynı zamanda da sıfır noktası olarak kabul edilmiştir. Her dalganın frekans, genlik ve faz olarak temel karakteristik özellikleri vardır.

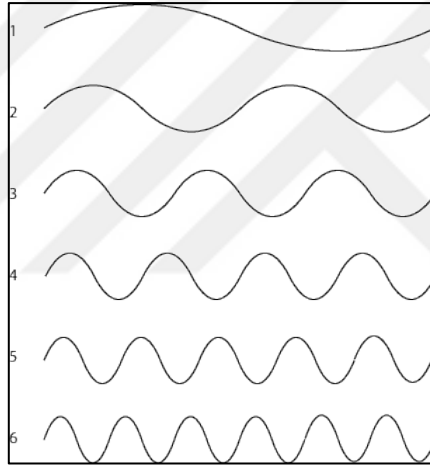
Periyod bir dalganın bir devrini tamamlaması için gereken zamandır ve frekans ile ters orantılıdır. Frekans ise dalganın bir saniyedeki salınım sayısıdır. Dalga formunun en tepe noktasından en alt noktasına olan uzaklığa yer değiştirme adı verilir. Bu aynı zamanda dalga genliğinin başka bir gösterilme yöntemidir. Fransız matematikçi *Jean Baptiste Fourier* her periyodik dalganın bir veya daha fazla sinüs dalgasının toplamı şeklinde ifade edilebileceğini ispatlamıştır. Harmonik yapısı bilinen her kompleks dalga frekans ve genlikleri bilinen sinüs dalgalarının toplamları ile oluşturabilir. Bir dalga birden çok harmonik barındırabilir. Dalganın harmoniklerine temel frekansın tam katları ile ulaşılabilir. Örneğin temel frekansı 55 hz olan bir dalganın harmonikleri

2.1'deki denklemde gösterilmiştir (Dodge ve Jerse s.47 1997, Shepard 2013). Doğa'da saf sinüs dalgası bulunmaz, bu dalgaların kompleks hallerini duyarız.

**Şekil 2.1: Dalga formu bileşenleri**



**Şekil 2.2: Dalga formu harmonikleri**



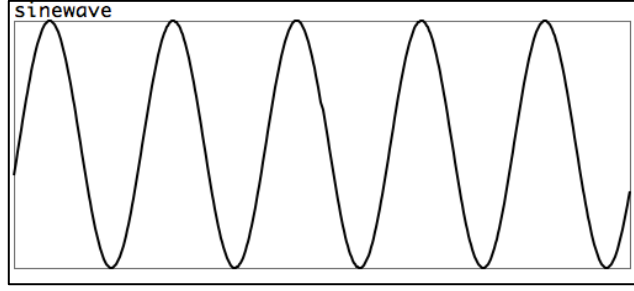
$$55 \times 1 = 55 \text{ Hz (2.1)}$$

$$55 \times 2 = 110 \text{ Hz (2.2)}$$

$$55 \times 3 = 165 \text{ Hz (2.3)}$$

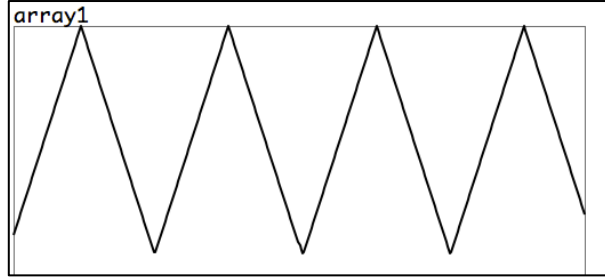
**2.1.1 Sinüs Dalga:** Sinüs dalgası, pozitif ve negatif kutuplarda, osilatörler tarafından düzgün bir şekilde ve devamlı olarak oluşturulan en basit dalga formudur. Teknik olarak ismi sinüsoidal dalga olarak bilinmektedir. Sinüs dalgaları oldukça soluk ve karanlık bir ses üretir. Sinüs dalgaları tek harmonik içerirler. Sinüs dalgaları kompleks tonlar üretmek için çok sık kullanılır. Ayrıca sinüs dalgaları test sinyalleri için çok sık kullanılmaktadır (Rapen 2012, s.16, Shepard 2013, s.37, Holmes 2008 s. 181).

**Şekil 2.3: Sinüs dalgası**

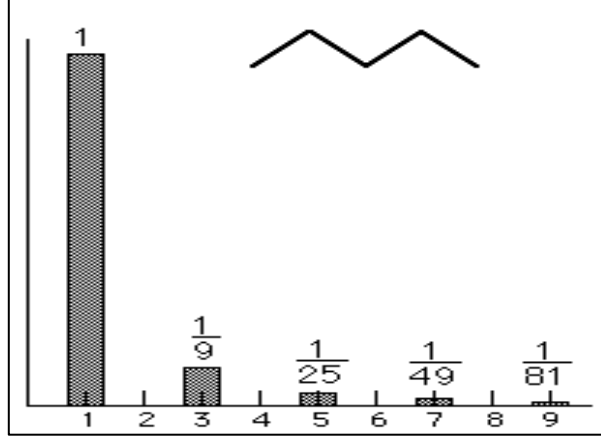


**2.1.2 Üçgen Dalga:** Üçgen dalgalar taban çizgisi olmayan bir piramit şeklindedir. Voltaj düzenli bir şekilde sabit bir hızla yükselerek bir kutbun tepe noktasına ulaşır, ulaştığı andan itibaren ani bir şekilde yönünü değiştirerek yine sabit bir hızlı diğer kutba doğru ilerler. Üçgen dalgalar temel frekans değerini ve tek sayılı harmonikleri barındırır. Bu harmoniklerin genlikleri, frekansla harmonik numarasının karesi ile doğru orantılı olarak azalır. Üçgen dalganın yukarıya ve aşağıya hızlı değişimi sonucu, sinüs dalgasından daha parlak, hacimli ve derin duyulur (Shepard s.38 2013, Holmes s.181 2008, Hurtig s.21 1988).

**Şekil 2.4: Üçgen dalga**

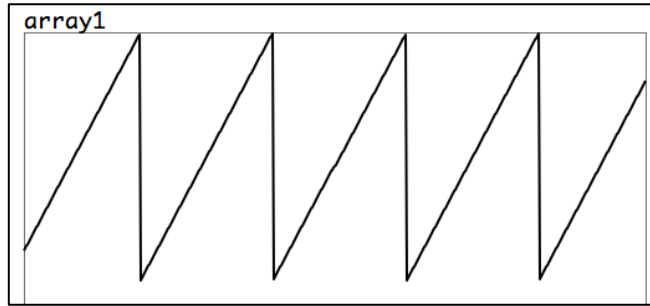


**Şekil 2.5: Üçgen dalga harmonikleri ve genlikleri**

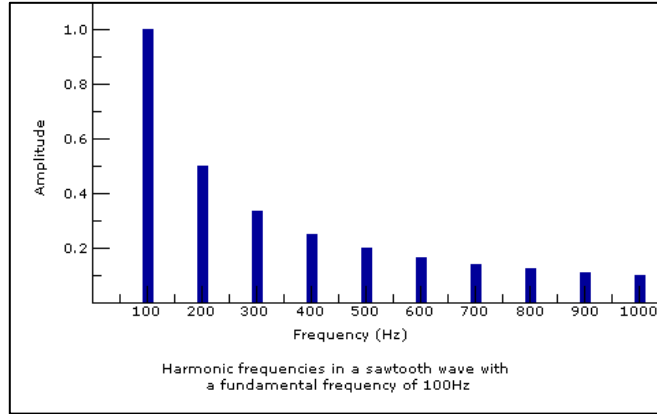


**2.1.3 Testere Dalga:** Testere dalganın dalga hareketi bir kutuptan diğer kutba doğru düzgün bir geçiş şeklinde gerçekleşir. Diğer kutba ulaştıktan sonra bir anda başladığı kutbuna geri zıplar. Bu sayede bir rampa oluşturur bu yüzden rampa dalga ismi verilir. Testere dalga temel frekansla ilişkili olarak tüm tek ve çift harmonikleri içerir. Bu yüzden üçgen dalgaya göre daha parlak bir ses meydana gelir. Harmoniklerin genlikleri harmonik sayısı ile doğru orantılı olarak azalır (Shepard s.38 2013, Holmes s.181 2008, Hurtig s.21 1988).

**Şekil 2.6: Testere dalga**

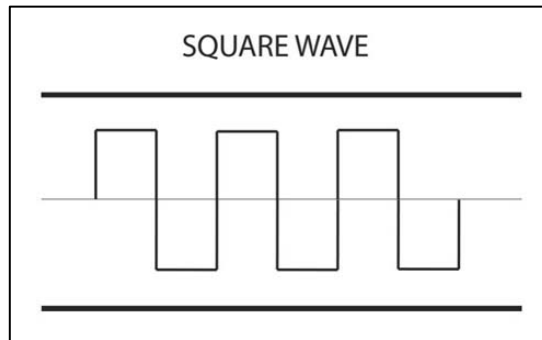


**Şekil 2.7: Testere Dalga Harmonikleri**

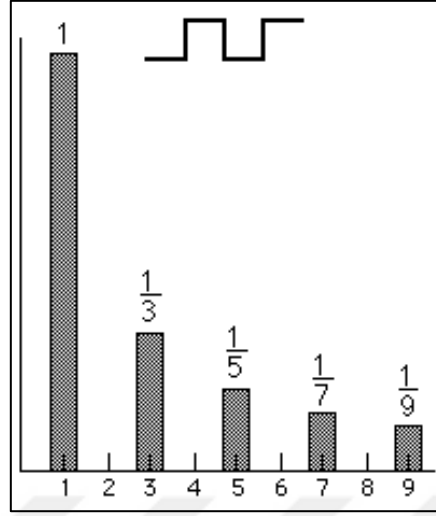


**2.1.4 Darbe(Pulse) ya da Kare Dalga:** Kare dalga iki durumlu bir dalgadır. Bir kutuptan diğer kutba aniden zıplayarak bulunduğu seviyede bir süre kalır ve bu durum tekrar eder. Bu şekilde kare ya da darbe dalgayı oluşturur. Kare dalga tek sayılı harmoniklerinden meydana gelmektedir. Her bir harmoniğin genliği ise temel frekansın genliğinin, harmonik numaralarına olan oranı ile belirlenir. Çoğu darbe dalganın pozitif kutupta veya negatif kutupta ne kadar zaman geçireceği yüzde ile belirlenebilir. Darbe genişliği değiştikçe sesin rengi de değişir. Genişlik daraldıkça ses daha zayıf, genişlik arttıkça daha zengin ses duyulur. Kare dalgalar, negatif ve pozitif kutupta yüzde elli genişliğe sahiptir. (Shepard s.40 2013, Holmes s.183 2008, Hurtig s.23 1988).

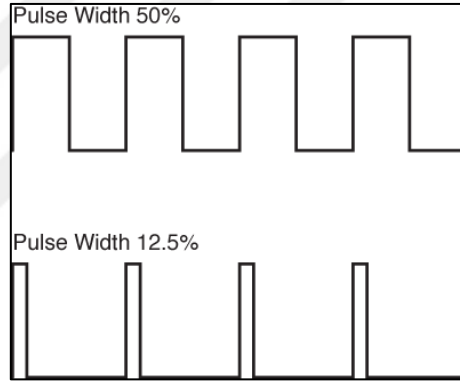
**Şekil 2.8: Kare dalga**



**Şekil 2.9: Kare dalga harmonikleri**



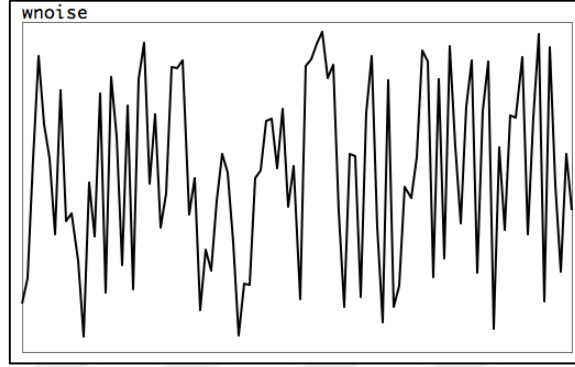
**Şekil 2.10: Pulse genişliği**



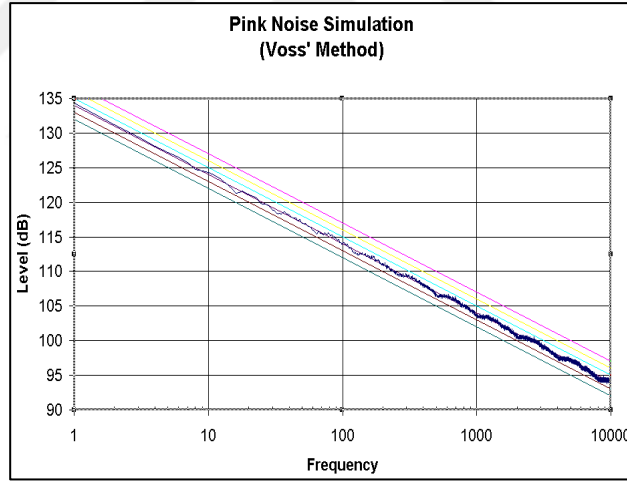
**2.1.5 Beyaz Gürültü:** Beyaz gürültü, insan kulağının duyabileceği tüm frekansları (20 Hz- 20 Khz) içerir. Çoğu insanlar beyaz gürültünün üst frekanslarda daha yoğun olarak algılar ancak bu doğru bir algı değildir. Bu algı oktav aralıklarından meydana gelmektedir. Örneğin, 100 Hz ve 200 Hz arası bir oktavidir. Arasında 100 farklı frekans barındırmaktadır. 400 Hz ve 800 Hz arasında 400 farklı frekans barındırmaktadır. Bu oran üst frekanslara gittikçe artmaktadır. Beyaz gürültü filtre ve modüle edilerek çok kullanışlı hale gelebilir. Beyaz gürültü grafiği şekil 2.11'de gösterilmiştir. Beyaz gürültü "shhhhhh" şeklinde bir ses üretir. Genelde rüzgar, yağmur, fırtına tarzında sesleri üretmek amacıyla kullanılır. Beyaz gürültünün başka bir biçiminde pembe gürültüdür. Pembe gürültü beyaz gürültünün üst frekans bölgelerinde kısıtlanmış halidir(18 Hz- 10Khz). Her oktavda 6 dB ses azalır.

Diğer bir gürültü türü ise mavi gürültüdür. Mavi gürültü ise yine beyaz gürültünün kısıtlanmış (10Khz- 22Khz) halidir. Bu gürültülerin grafikleri şekil 2.11, şekil 2.12 ve şekil 2.13'te gösterilmiştir<sup>1</sup> (Wilson s.51 2013, Holmes s.183 2008).

**Şekil 2.11: Beyaz Gürültü Grafiği**



**Şekil 2.12: Pembe Gürültü Grafiği**



## 2.2 SES SENTEZLEME TEKNİKLERİ

Ses sentezleme, istenilen akustik algıya ve kullanıcının hayal gücüne bağlı olarak bir sesin üretilmesine denir. Ses sentezleme yöntemleri ile olağanüstü tınlara sahip seslere erişilebilir. Ses sentezlemenin çok uzun bir tarihi vardır. Tarihte ilk ses sentezleyici ilk insan topluluğunun ısığın öğrenmesi ya da boş bir kütüğe vurulduktan sonra duyulan ses ile bulunmuş olabilir. Aynı zamanda tüm enstrümanlar birer ses sentezleyici örneği olarak verilebilir. Her enstrüman kendi sesini farklı ses sentezleme teknikleri ile üretir (Dodge ve Jerse s.47 1997, Russ 2009).

Bilgisayar ile ilk ses sentezleme deney çalışmaları 1957 yılında *New Jersey*'de *Bell* telefon laboratuvarındaki araştırmacılar tarafından başlamıştır. İlk deney ise *Max V. Mathews* ve meslektaşları tarafından zaman ile değişen frekans ve genlik zarfı içeren herhangi bir ton ya da dalga formuna uygun olarak bir sesi bilgisayar ile sentezlemeyi ispatlamışlardır.

İlk programlarını dev bir *IBM 704* bilgisayarı ile yazılmıştır. *Mathews* tarafından tek üçgen dalga formu oluşturarak müzik 1 programı geliştirilmiştir. *Newman Guttman* ise Müzik 1 programı ile 1957 yılında monofonik teknikle bir kompozisyon yapmıştır. Bu oluşturduğu kompozisyon dijitalden analoga dönüşüm işlemi ile sentezlenen ilk kompozisyon olarak tarihe geçmiştir. *Max Mathews* 1958 yılında Müzik 2 programını tamamladı ve *Bell* telefon laboratuvarındaki *Max Mathews*, *John Pierce* ve *Newman Guttman* gibi birkaç araştırmacı tarafından kullanıldı. Bu müzik 1 ve müzik 2 programları, günümüzde ses sentezleme ve ses tasarımı alanında çok kullanılan *Max MSP* ve *Pure Data* programlarının temelini oluşturmaktadır. 1958 yılında yeni bilgisayar müziği ile ilgili etkinlik New York şehrinde düzenlendi. Tartışma panellerinde olduğu etkinlikte *John Cage* modaretorlük yaptı. Bir sonraki yıl ise *Guttman* kendisinin bilgisayar ile sentezlenen bestesini (Perde Varyasyonları) İsviçre'de *Gravesano*'daki *Hermann Scherchen*'in villasında çaldı (Road s.87 1996). Ses sentezleme tekniklerini kısaca eklemeli sentezleme, eksiltmeli sentezleme, modülasyon teknikleri ile sentezleme, dalga şekillendirme ile sentezleme, dalga tablosu sentezleme, *Karplus-Strong* algoritması ile sentezleme, Vektör sentezleme,



Granüler sentezleme, faz distorsiyonu ile sentezleme yöntemleri olarak bir başlık altında toplayabiliriz.

### 2.2.1 Eklemeli Sentezleme

Eklemeli sentezleme, basit dalga formlarının toplamı ile daha karmaşık dalgaları üretmek için en eski ve en çok araştırma yapılmış ses sentezleme tekniklerinden birisidir. Eklemeli sentezleme yöntemi ilk başta pipe organların (borulu organ) birden fazla register stop denilen butonlarıyla uygulanmaya başlandı. *Register stop*'u çekilerek hava, boru içinde yayılır ve klavye üzerinde bir tuşa basarak ses üretilirdi. Bir kaç register-stop, çeşitli oranlarda çekilerek birden fazla borunun sesi, klavye üzerinde her bir tuşa basıldığında birbiri ile eklenerek bir sesi oluştururdu. Bu frekans karışımları eklemeli sentezlemenin kökenini oluşturuyordu. Eklemeli sentezleme elektronik müzikte ilk günlerden beri kullanılmaktadır.

1906 yılında *Telharmonium* ses sentezleyici ortaya çıktı. Büyük ve bir hayli ağır yapıya sahip olan *Telharmonium*, ses oluşturmak için ton tekerleği kullanmıştır. Her bir ton tekerleği saf sinüs tonu üretmekte olan *Telharmonium* karma sesler üretmek için bireysel tonlar kullanmıştır. Ton tekerlekleri perde şaftı üzerine monte edilerek şaftın hareketi ile döndüğünde ton tekerlekleri hızlıca açık ve kapalı olan metal fırçalara temas etmektedir. Bu bölüm elektronik devrenin bir bölümüdür. Ton tekerleğindeki bu oluklar istenilen frekansta elektriksel salınım yaratmaktadır. *Telharmonium* her biri kromatik skaladaki bir notayı üretmek için 12 perde şaftı içermektedir. Bu dönemde canlı elektronik müzik yayını ise telefon kabloları üzerinden abone olan evlere telharmonium ile aktarılırdı.<sup>ii</sup> *Telharmonium*'un kullandığı ton tekerleklerinin minyatürü ünlü *Hammond* orgların da yer aldı. Bu yüzden *Hammond* orgları da eklemeli sentezleme yapan enstrümanlardır (Road s.88 1996).

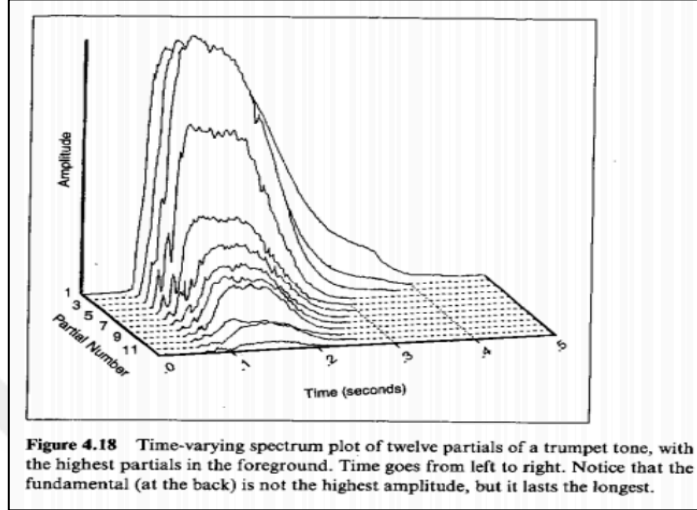
Eklemeli sentezlemenin çalışma temeli 19. Yüzyılda Fransız matematikçi *Fourier* tarafından oluşturulmuştur. *Fourier*, kendini tekrar eden her biçimdeki dalga formunu, basit dalga formlarını birlikte ekleyerek yeniden üretmenin mümkün olabileceğini göstermiştir. Bu sayede periyodik her bir dalganın, frekans ve genlik değerleri bilinen basit sinüs dalgalarının birleştirilmesi ile oluşturulabilmesi gösterilmiştir.

Daha karmaşık dalga şekilleri ise yine sinüs dalgalarının eklenmesi ile oluşturulabilir. Bunun en basit yöntemi temel frekans değerinin, örneğin  $f$  ise tam katlarının yani harmoniklerinin ( $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$ ) değerindeki frekansların eklenmesi ile oluşturulur. İlk harmoniğe temel doğuşkan, ikinci harmoniğe ilk doğuşkan denmektedir. Dolayısıyla bu yöntemle kare dalga, testere dalga gibi bazı temel dalga formları üretilebilir (Russ s.146 2009). Şekil 2.16'da pure data yardımı ile eklemeli sentezleme yöntemi kullanılarak kare dalga oluşumunu göstermektedir. Eklemeli sentezlemede, zaman içinde farklı oranlarda sinüs dalgalarının değişimi ile daha ilginç ve daha gerçekçi enstrüman tonları yaratılabilir. Bu yöntem akustik enstrümanların örneklenmesinde çok kullanılmıştır. Örneğin, bir trompet tonu için ilk önce on iki sinüs dalgası sesin ilk atağa geçme(attack) bölümünü oluşturmak için gereklidir. Ardından ortalama 300 ms sonra üç ya da dört sinüs dalgasına daha ihtiyaç duyulur. Trompet tonunun zaman ile değişen ilk on iki bileşenin grafiği şekil 2.13'te verilmiştir.

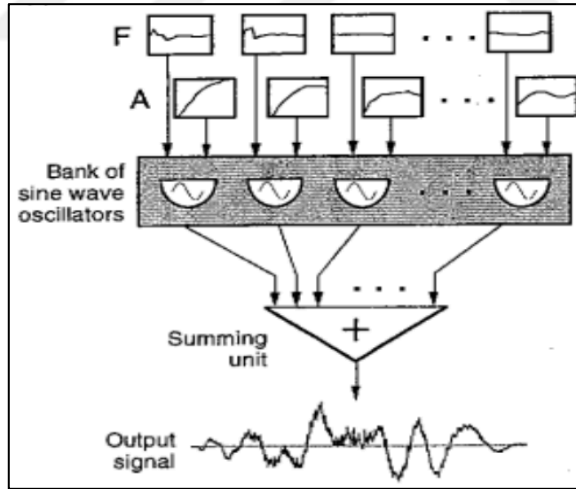
Eklemeli sentezlemenin hem dijital hem analog şekilde incelenmesi şekil 2.13'te ve 2.14'te gösterilmiştir. Eklemeli sentezlemenin en güçlü yanlarından biri doğal seslerin simülasyonunu yapmaktır. Bu işlemi yapmak için öncelikle sesin tam anlamıyla eksiksiz bir biçimde analiz edilmesi gerekmektedir. İlk başlarda, analiz ederek tekrar sentezleme *H. Fletcher* (meşhur *Fletcher-Munson Gürlük Eğrileri*) ve arkadaşları tarafından tamamen analog ekipmanlar ile gerçekleştirilmiştir. Dijital yöntem ile bir sesin analiz ya da tekrar sentezleme için kullanılan sistemin çalışma yöntemi şekil 2.17'de gösterilmiştir. Burada giriş sinyalinin tanımlanma işlemine pencereleme(windowing) denir. Pencerelemiş bölüm, dar bant geçiren filtrelerden geçirilerek her bölümün merkez frekansı belirlenir. Uygulamada ise *Fast Fourier Transform*(FFT) genelde filtre kümesi ile yer değiştirir ve yine aynı temel görevi (her frekans bandındaki enerjiyi hesaplama) yerine getirir. Analizin ardından orjinal sinyalin çeşitli varyasyonlarını oluşturmak için kontrol fonksiyonları düzenlenebilir. Bu sayede bir çok farklı efekt elde edilebilir. *Jonathan Harvey* tarafından 1980 yılında *Mortuos Plango Vivos VOCO* isimli beste yapılmıştır ve bu beste analiz edilen bilginin değiştirilerek yeni bir beste yapılmasına çok iyi bir örnektir. Bestede geniş çanın(large bell) sesi analiz edilerek, tekrar sentezleme sırasında her sinüsoidal

bileşeninin yerine uygun frekanstaki erkek sesi koyulmuştur. Bu ses, işlemleri takip ederek korkutucu bir efektte sahip olmuştur. (Road s.145-146 1996).

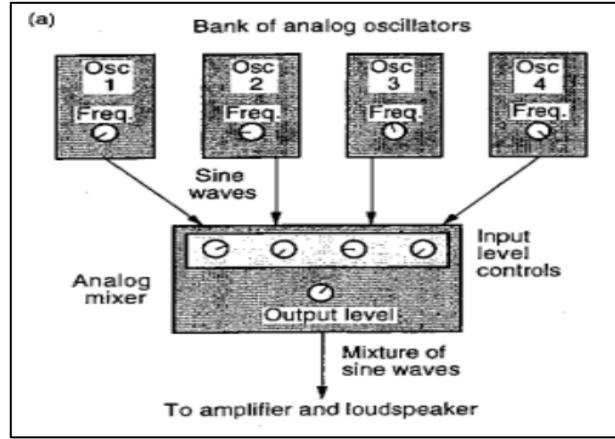
**Şekil 2.13: Trompet Tonunun Zaman İle Değişen Spektrumu**



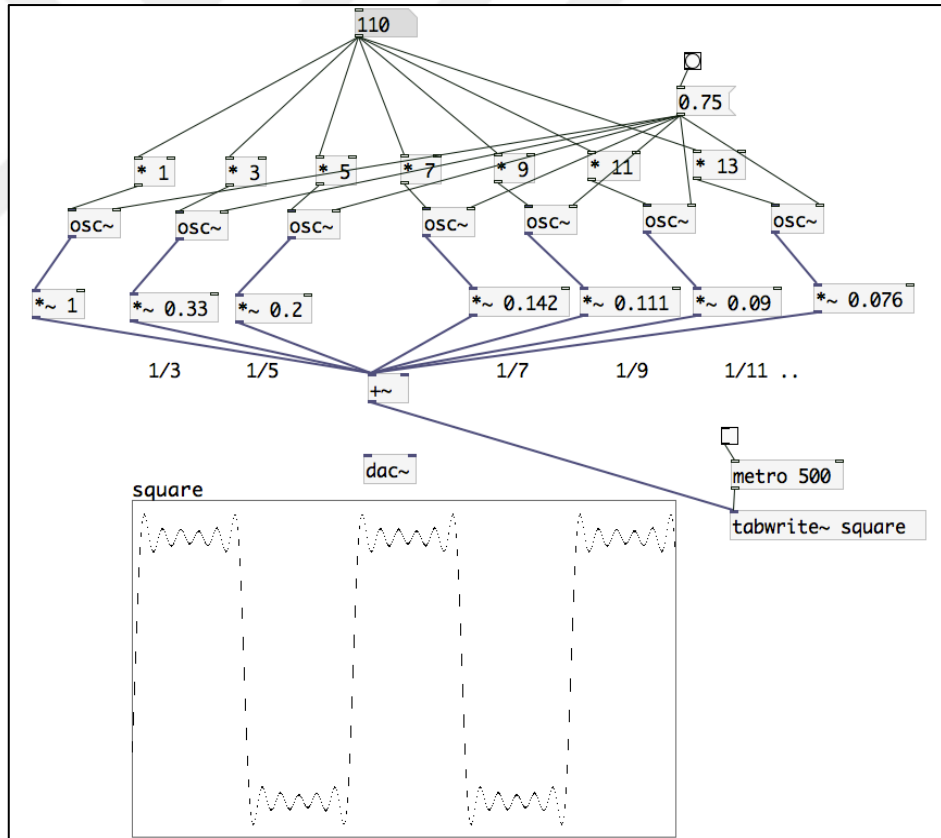
**Şekil 2.14: Digital Additive Synthesis**



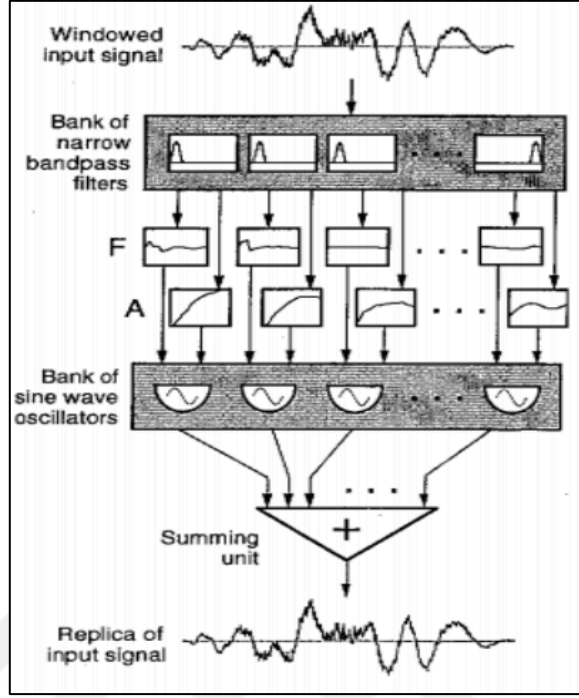
Şekil 2.15: Analogue Additive Synthesis



Şekil 2.16: Eklemeli Sentezleme Yöntemi ile 110 Hz Temel Doğuşkanlı Kare Dalga Oluşumu



Şekil 2.17: Eklemeli Analiz/Tekrar Sentez Yöntemi



### 2.2.2 Eksiltmeli Sentezleme ve Filtreler

Eksiltmeli sentezlemede, eklemeli sentezlemenin tam tersi yol izlenir ve karmaşık dalga formlarından basit dalga formlarına doğru gidilir. Bu teknikte dalga formlarının bazı frekansları filtrelenerek daha az bileşene sahip dalga formuna dönüştürülür. Filtre kullanılarak sesin harmonik yapısı ya da tınısı değiştirilir. Eksiltmeli sentezleme yapan ses sentezleyiciler, klasik sentetik ses üretmek için tasarlanan ilk enstrümanlardı. *Moog* ses sentezleyiciler, eksiltmeli ses sentezleme tekniğini kullanarak, osilatörlerinden üretilen karmaşık ses dalgalarını, filtreler ile dinamik olarak modüle ederlerdi. Şu anda ses sentezleyiciler dijital enstrümanlar haline gelse bile, çoğunlukla tasarımları eksiltmeli tasarıma uygun olarak dizayn edilirler. Özellikle yazılım olarak kullanılan ses sentezleyiciler ses üretim imkanı olarak çok daha fazla alternatif sunsa da, eksiltme işlemi yazılım ses sentezleyicilerin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Hemen hemen tüm ses sentezleyiciler eksiltmeli ses sentezleme tekniğini belli bir seviyede uygular. Ana öncelikleri o olmasada kullanıcının kullandığı seslere filtreler ve osilatörlerle yön vermesine olanak verir.

Beyaz gürültü, tüm frekansları eşit seviyede barındırdığı için en karmaşık dalga biçimlerinden biri olmasından dolayı eksiltmeli sentezleme için çok kullanılırlar. (Shepard s.114 2013).

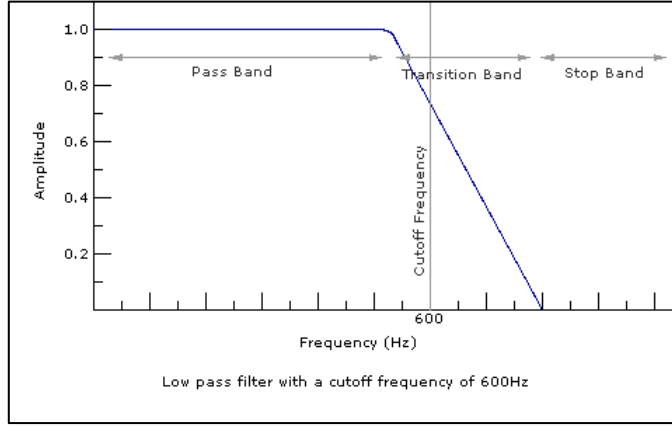
### **2.2.2.1. Filtreler**

Filtreler, frekans spektrumunda belirli bir bölgedeki frekansın genliğini artırmak veya azalmak için kullanılır. Filtreler ile istenilen frekans bandının genliği artırabilir ya da azaltılabilir. Filtreler, sesin tınısını çok güçlü etkileyen faktörlerdendir. Çünkü bir sesin harmoniklerini kolayca değiştirebilir. Başlıca filtreler; alt geçiren(LPF), bant geçiren(BP), yüksek geçiren(HPF) ve çentik(notch) filtreler olmak üzere dört ana başlıkta toplanırlar (S. Howe s.90 1975).

### **2.2.2.2 Alt Geçirgen Filtre**

Alt geçirgen filtre tipi, üst frekansları kesen filtre tipidir. Üst frekansları kestiği için ismi bu yüzden alt geçirgen filtredir. Üst geçirgen filtre tipi, alt geçirgen filtre tipinin tam tersi olarak çalışır çünkü üst geçirgen filtre alt frekansları filtreler. Filtrelerde kesme frekansı çok önemlidir. Filtrenin kullanımıyla sinyalin 3 dB azaldığı noktaya kesme frekansı (cut-off frequency) denir. Kesme frekansları aynı zamanda gücünde yarıya indiği noktadır. Bu yüzden yarı güç noktasında denmektedir. Bir sinyalin, kesme noktasından itibaren oktavda kaç desibel azaldığını ise eğim (slope) gösterir. Basit analog devreler filtreler de bir direnç ve bir kapasitör barındırır. Burada eğim oktavda 6 desibeldir. Yani, frekans her iki katına çıktığında azalma eğimi 6 dB artar. Analog devrelerde bulunan kapasitör çiftlerine kutup adı verilir ve kutup sayısı arttıkça eğim(slope)'de artar. Örneğin, iki kutuplu filtrenin azalma oranı oktavda 12 dB olur. Dört kutuplu filtrede ise 24 dB/oktav'dır. Şekil 2.18'de kesme frekansı 600 hz olan alt geçirgen filtrenin şekli verilmiştir (Russ s.115 2009, S. Howe s.91 1975).

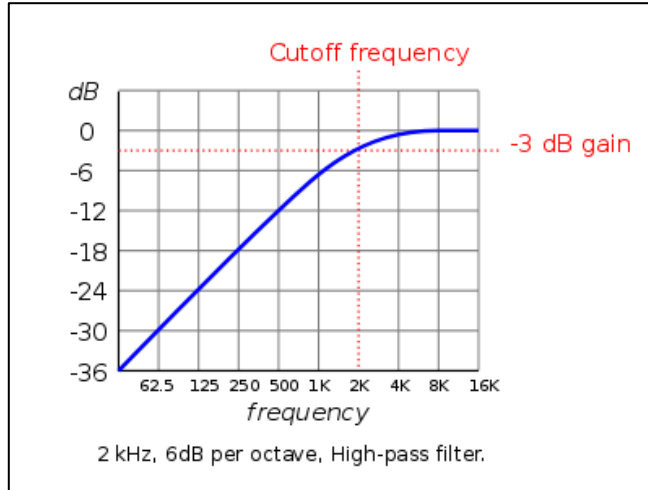
**Şekil 2.18: Alt geçiren filtre**



### 2.2.2.3 Üst Geçiren Filtre

Üst geçiren filtre tipi alt geçiren filtre tipinin tam tersi filtre tipidir. Kesme frekansının altında kalan frekans bantlarını filtre eder. Sesin tınısı temel frekans değeri kaybolduğundan doğal olarak daha parlak hale gelir. Şekil 2.19’te kesme frekansı 2 khz olan bir filtre gösterilmiştir (Russ s.116 2009).

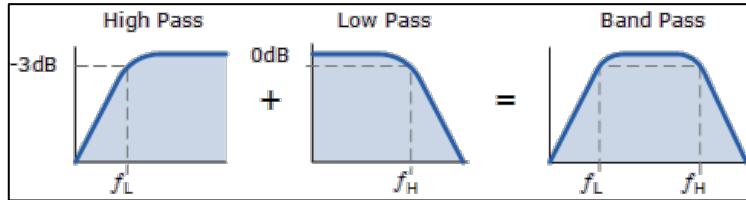
**Şekil 2.19: Üst Geçiren Filtre**



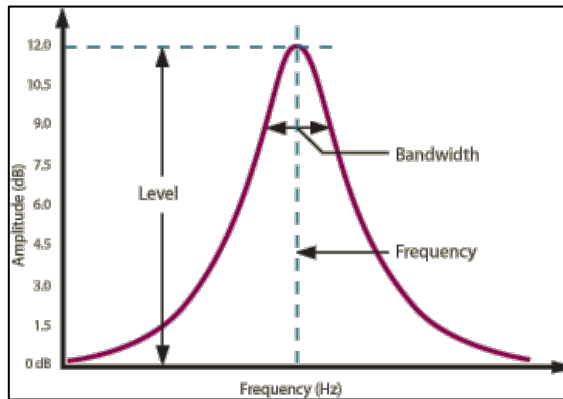
#### 2.2.2.4 Bant Geçirgen Filtre

Bant geçirgen filtreler belirlenen frekans aralığını geçirerek bu frekans bandının dışında kalan alanı belirli bir eğim ile keserler. Geçen frekans aralığına ise bant genişliği(bandwidht) ya da geçen bant (pass band) denir. Bu alan (pass-band) filtrenin 3dB azalttığı iki nokta arasındır. Bant geçirgen filtrelerin orta frekansına merkez frekansı denir. Bant geçirgen filtre seri bağlanmış alt geçirgen ve üst geçirgen filtrenin bir birleşimi olarakta düşünülebilir. Bu durum şekil 2.20’da gösterilmiştir. Dar kullanılan bant geçirgen filtreler ses içeriğinde ciddi bir frekans değişimine yol açar. Geniş bant geçirgen filtreler ise dar kullanılan bant geçirgen filtreye göre sesin tınısında daha az değişiklik yaratır. Bant geçirgen filtreler, frekans bandında yukarıya ve aşağıya doğru hareket ettirildikçe gitar soundlarında çok sık kullanılan ‘wah-wah’ efektini ortaya çıkarırlar. Bant geçirgen filtre Şekil 2.21’de bant geçirgen filtrenin bir örneği gösterilmiştir (Russ s.116 2009, S. Howe s.92 1975, Furia s.45 1986).

Şekil 2.20: Alt Geçirgen ve Üst Geçirgen Filtre Birleşimi



Şekil 2.21: Bant Geçirgen Filtre

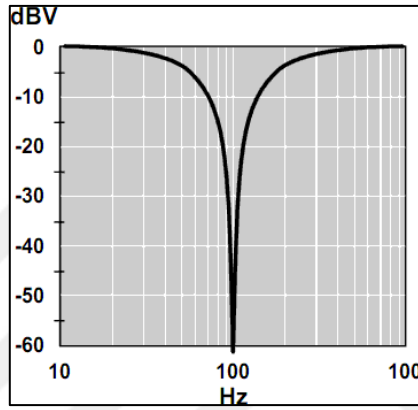




### 2.2.2.5 Çentik (Notch) Filtre

Çentik filtreler bant geçiren filtrelerin tam tersi olarak çalışır. Bazen bant geçirmeyen (band reject) olarak da adlandırılır. Belli bir frekans alanını geçirmek yerine o frekans alanını zayıflatarak, alanın dışında kalan frekansların geçmesine izin verir. Bu filtreler bir sesin belirli özel frekans değerlerini, harmoniklerini o ses ten ayırmak için çok kullanılır. Bu filtre tipi şekil 2.22’de gösterilmiştir (Russ s.116 2009).

Şekil 2.22: Notch Filtre

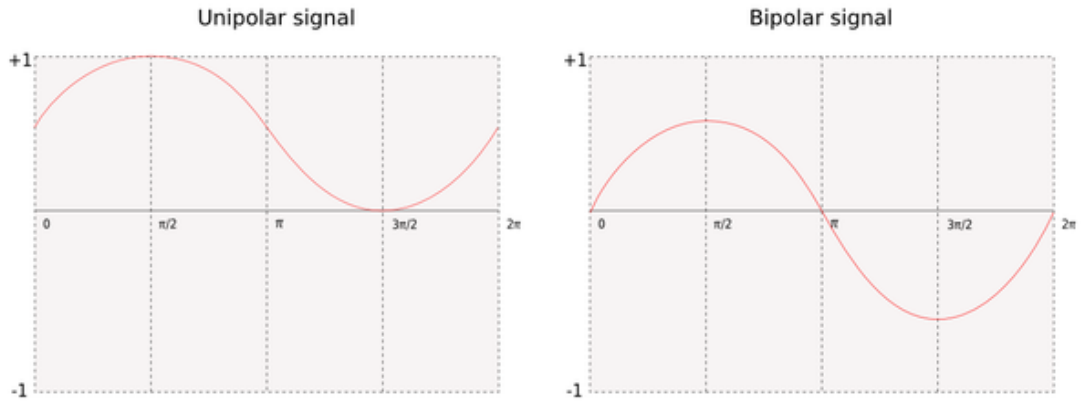


### 2.2.3 Modülasyon ile Sentezleme Yöntemleri

Bir sinyalin(taşıyıcı) bazı parametrelerinin, ikinci dalgaya(modülatör) göre değişiklik göstermesine modülasyon denir. Bu terim telekomünikasyon alanından alınmıştır ve bir elektronik sinyalin başka bir elektronik sinyal üzerinde değişiklik yapmasına denmiştir. Ses sentezleyicilerde de görüldüğü gibi bir LFO'nun (Düşük Frekanslı Osilatör), osilatör frekansını değiştirmesidir. Parametresi değiştirilen dalga taşıyıcı(carrier), değiştiren dalgaya ise modülatör denir. Genlik üzerinde gerçekleşen modülasyona genlik modülasyonu, frekans üzerinde gerçekleşen modülasyona ise frekans modülasyonu denmektedir. Modülasyon ile dalganın tonu, genliği ve tınısı değiştirilebilir. Örneğin genlik modülasyonunda *tremolo* olarak bilinen efekt aslında modülatör frekansının yaklaşık 20 Hz'in altında olduğu durumlarda olarak görülür. Aynı şekilde çok kullanılan *vibrato* efekti de frekans modülasyonunda modülatör frekansının yaklaşık 20 Hz altındayken, ortaya çıkan etki periyodik bir biçimde tizleşme ve pesleşme olarak algılanır. Modülasyon frekansı duyulabilir frekans

aralığına çıktığı zaman yeni harmonik yapı ortaya çıkar ve yan bantlar(*sidebands*) belirlemeye başlar. Oluşacak yan bantların sayısı osilatör dalga tiplerine bağlıdır. İki osilatöründe sinüs ya da kosinüs ürettiği durumda yalnızca iki adet yan bant görülür. Osilatörlerdeki dalga tipleri değiştikçe yan bant sayısı artabilir. Böylece spektrumda taşıyıcı dalganın frekansı ve yan bant frekansları gözükür. Modülasyon teknikleri genlik modülasyonu(AM), frekans modülasyonu(FM) ve ring modülasyonu(RM) olarak üçe ayrılır. Burada genlik modülasyonu ve ring modülasyonu birbirine çok benzemektedir. *Ring* Modülasyonu, genlik modülasyonunun bir başka formudur. Aralarında farkı anlamak için çift kutuplu(bipolar) ve tek kutuplu(unipolar) sinyalleri bilmek gerekir. Çift kutuplu ve tek kutuplu sinyaller şekil 2.23'te gösterilmiştir (Eden 2014, Shepard s.71 2013, Holmes s.198 2008, Road s.215 1996).

**Şekil 2.23: Bipolar ve Unipolar Sinyal**

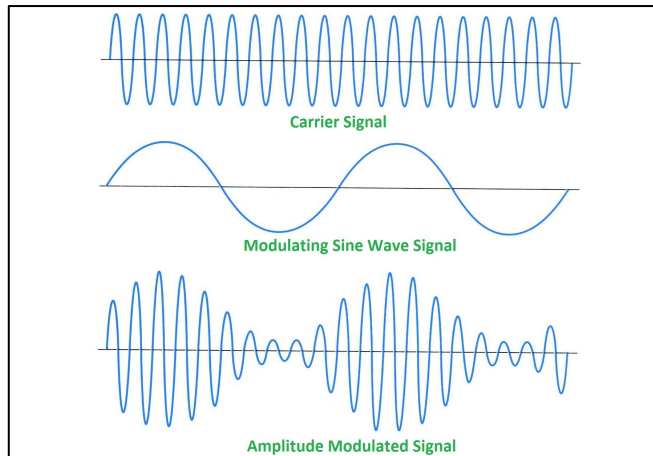


### 2.2.3.1 Genlik Modülasyonu(AM)

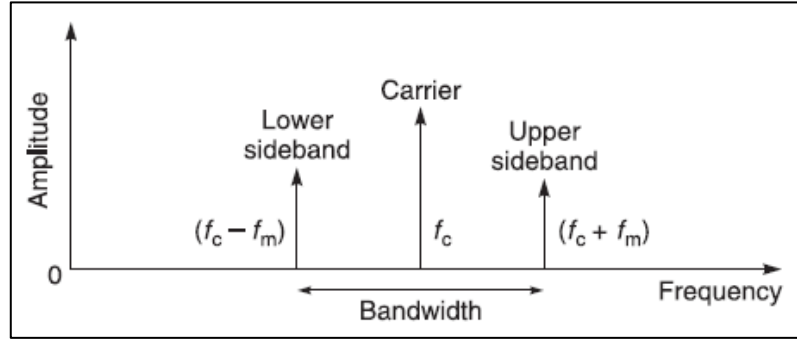
Genlik modülasyonu en eski modülasyon tekniklerinden biridir. Genlik modülasyonunda taşıyıcı dalganın genliği modülatör dalgaya bağlı olarak değiştirilir. Genlik modülasyonu, çift kutuplu(bipolar) bir taşıyıcı ve tek kutuplu(unipolar) bir modülatör ile oluşur. Bir amfinin sesini hızlıca açıp kapattığımız zaman aslında bir genlik modülasyonu yaratmış oluruz. Sinüs dalgasının modülatör olarak kullanmak, şekil 2.24'te gösterildiği gibi genliğin yükselip ardından düzgünce düşmesine neden olur. Üçgen dalga kullanımında ise genliğin aşamalı olarak yükselip, keskin bir dalga hareketinden sonra aşamalı olarak yeniden düşmesine sebep olur. Kare dalganın

kullanımında ise herhangi bir eğim olmadan iki nokta(genliğin ulaşabileceği en alt ve en üst noktası) arasında anlık gidip gelmesine sebep olur. Genlik modülasyonunda taşıyıcının frekansı değişmezken, sol ve sağ tarafında  $f_t - f_m$  (taşıyıcı frekansı-modülatör frekansı) ,  $f_t + f_m$  frekanslarında iki yeni doğuşkan oluşur. Bunlara yan bantlar(side bands) denmektedir. Örneğin, taşıyıcı frekansı 1000 Hz ve modülatör frekansı 300 Hz ise yan bantlar 1300 Hz ve 700 Hz olarak oluşur. Bu durum şekil 2.25 'te gösterilmiştir. Bu oluşan iki yan bantın genlik miktarı, modülasyon büyüklüğü ile doğru orantılı olarak artar ancak hiç bir zaman taşıyıcının genliğinin yarısından fazla olmaz. Modüle eden osilatörün genliğinin, modüle edilmemiş taşıyıcının genliğine oranı ile hesaplanır. Bu orana ise modülasyon indeksi(m) denir. Modülasyon değeri sıfırdayken hiç bir modülasyon oluşmaz. Modülasyon değeri 0.5'teyken yüzde 50 modülasyon görülür. Modülasyon değeri 1'deyken bu sefer yüzde 100 modülasyon görülür. Aynı zamanda iki tarafta oluşan yan bantların genlikleri taşıyıcı frekansın genliğinin yarısındadır. Desibel olarak ifade etmek gerekirse yan bantların genliği, taşıyıcının genliğine göre 6 dB daha azdır. Modülasyon değerinin 1'i aşması halinde dalgada bozulmalara(*distortion*) neden olur. Genellikle istenmeyen durumlardan birisidir. Modülasyon indeksi oranına bağlı modülasyon derinlikleri şekil 2.26'da ve şekil 2.27'de gösterilmiştir (Shepard s.71 2013, Holmes s.198 ,2008, Dodge ve Jerse s.90 1997,Road s.215 1996).

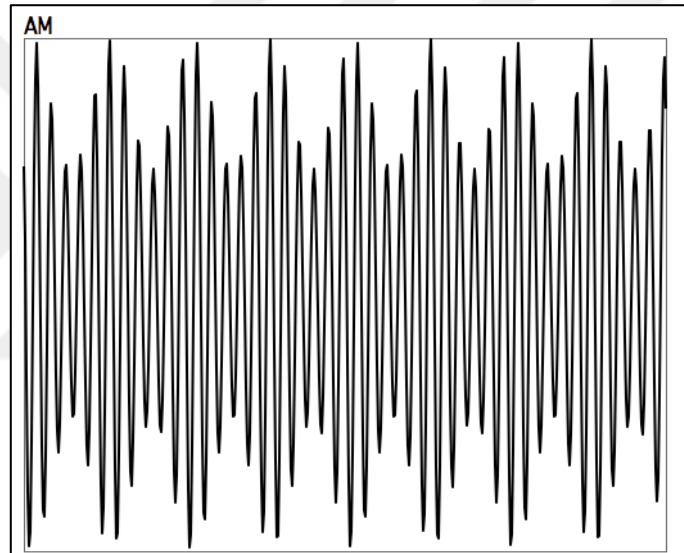
**Şekil 2.24: Genlik Modülasyonu**



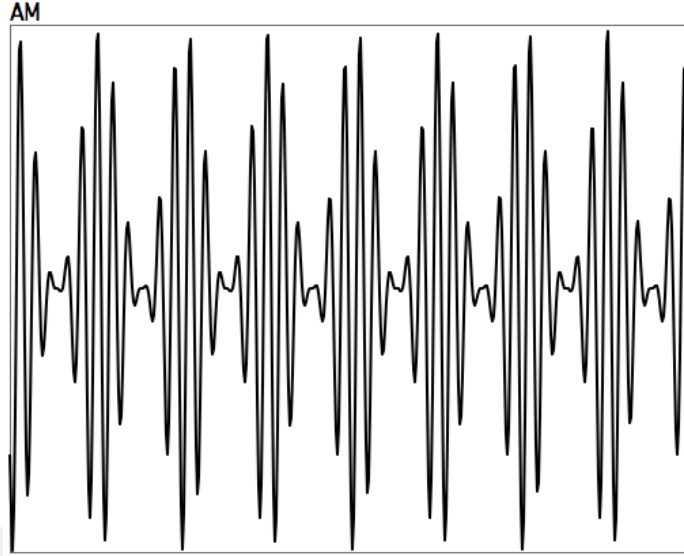
**Şekil 2.25: Genlik Modülasyonu Yan Bant Oluşumu**



**Şekil 2.26: Modülasyon İndeksi 0.5 Olduğu Durumdaki Genlik Modülasyonu**



### Şekil 2.27: Modülasyon İndeksi 1 Olduğu Durumdaki Genlik Modülasyonu

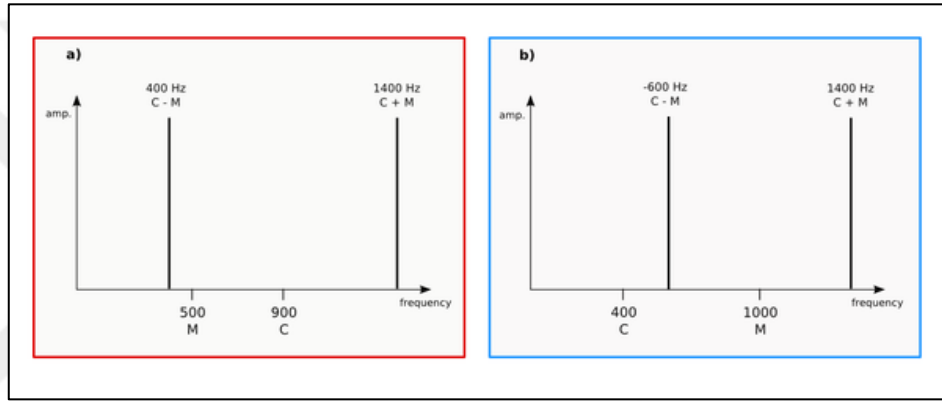


#### 2.2.3.2 Ring Modülasyonu

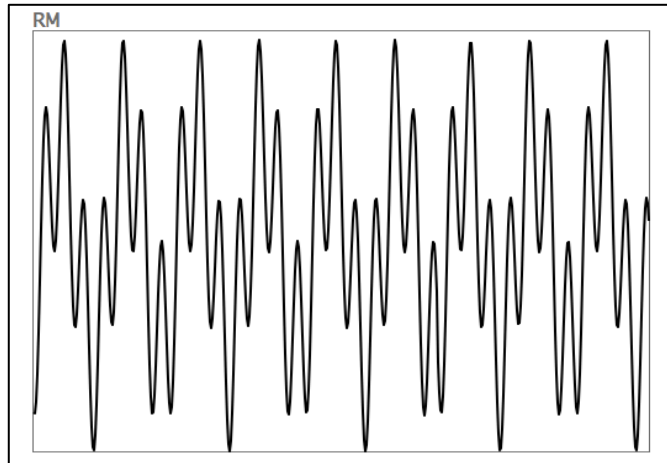
*Ring* modülasyonu, genlik modülasyonunun başka bir çeşitidir. Genlik modülasyonunda çift kutuplu bir taşıyıcı ve tek kutuplu bir modülatör yer alırken, *ring* modülasyonunda, taşıyıcıda modülatörde çift kutupludur. *Ring* modülasyonu iki osilatörün çıkışlarının çarpımı sonucu ortaya çıkar. Genlik modülasyonunda taşıyıcı frekansı kaybolmazken, şekil 2.28’de gösterildiği gibi ring modülasyonunda taşıyıcı frekansı tamamen kaybolur ve genlik modülasyonundaki gibi yan bant çifti oluşur. Yan bant sayısı iki osilatörün dalga tipine bağlıdır. Eğer iki modülatörün frekansı duyulabilir frekans aralığına geldiği zaman taşıyıcının tınısı değişir. Ayrıca taşıyıcının ve modülatör frekansının oranı tam sayıya eşit olduğu durumlarda, yan bantlar birbirine harmonik olacak şekilde üretilir. Eğer birbirlerine oranı tam sayı değilse yan bantlar inharmonik şekilde üretilir. Modülatör frekansının taşıyıcı frekansından büyük olduğu durumlarda negatif frekans meydana gelir. Bu yan bant x ekseninden aşağıya doğru oluşur. Bu durum sinyalin fazının yönünün değişmesi ile açıklanır. İlk analog *ring* modülatör *Moog Music* şirketi tarafından yapılmıştır. Genelde dijital olarak uygulanan *ring* modülasyonunda ortaya çıkan ses pek değişmezken, analog olarak uygulanan ring modülasyonunda, devrelede kullanılan diyot türlerine(silikon-

germanyum) göre farklı frekans cevapları oluşacağından karakter farkı görülebilir. Analog *ring* modülasyonu *Karlheinz Stockhausen* gibi elektronik müziğin öncüleri tarafından çok kullanılıyordu ve günümüzde de çok sık kullanılmaktadır (Eden s.69, Road s.217 1996) Şekil 2.29'da taşıyıcı frekansı 900 Hz olan, modülatör frekansı 500 Hz olan iki osilatörün çıkışlarının çarpılarak elde edilen frekans spektrum analizi gösterilmiştir. *Ring* modülasyonu ve genlik modülasyonu arasındaki en temel fark modülatör dalganın çift ya da tek kutuplu olmasıdır (Road s.217 1996).

**Şekil 2.28: Ring Modülasyonu Spektrumu**



**Şekil 2.29: Ring Modülasyon Dalga Formu Analizi**



### 2.2.3.3 Frekans Modülasyonu

Frekans modülasyonu, iletişim ve haberleşme sistemlerinde 19. Yüzyıla dayanan bir uygulamadır. Dijital frekans modülasyonu sentezinin müzikal anlamda gelişimi Stanford üniversitesinde *John Chowning* tarafından keşfedilmiştir. *John Chowning*, doğal seslerin frekans spektrum karakterlerinin taklit edilerek sentetik sesler üretilmesi üzerine bir süre çalışmıştır. Bu çalışmasına ise *vibrato* tekniğinin deneyi sırasında, *vibrato* hızlandığında sesin tınısını değiştirmesi sebep olmuştur. Bazı deneylerinin ardından *John Chowning* frekans modülasyonu uygulamasının patentini almıştır. 1975 yılında ise Japon *Yamaha* firması bu tekniği uygulamak için lisansını almıştır. Bu temel tekniğin geliştirilmesinden sonra 1980 yılında şekil 2.30'daki ilk dijital ses sentezleyicisini(synthesizer) piyasaya sürmüştür. Ardından 1983 yılında *Yamaha DX7* modelini piyasaya sürerek frekans modülasyonu tekniği uygulamasında çok ses getirmiştir. Temel frekans modülasyonu tekniği (basit frekans modülasyonu ya da *Chowning* frekans modülasyonu), bir taşıyıcının frekansının bir modülatör osilatör tarafından modüle edilmesi ile oluşur. Şekil 2.31'de frekans modülasyonun ve genlik modülasyonun arasındaki fark rahatça görülebilir. Frekans modülasyonu en basit haliyle bir modülatörün, taşıyıcının frekansını modüle etmesi şeklinde gerçekleşir. Bu durum şekil 2.32'de *pure data* yardımı ile gösterilmiştir. Buradaki örnekte değerler doğrudan girilmiştir.

Frekans modülasyonunda, şekil 2.33'deki gibi genlik ve *ring* modülasyonlarına göre bir çift yan bant yerine çok daha fazla yan bantlar, yan bant serileri(doğuşkanlar) oluşur. Frekans modülasyonu ile oluşan yeni bileşenlerin frekansları taşıyıcının sağ tarafında  $T+M$ ,  $T+2M$ ,  $T+3M$ ..., taşıyıcının sol tarafında ise  $T-M$ ,  $T-2M$ ,  $T-3M$ ... şeklinde görülür. Eğer taşıyıcının modülatöre oranı tam sayı ise örneğin, taşıyıcının modülatöre oranı( $T/M$ ) oluşacak doğuşkanların (yan bantların, yeni frekans bileşenlerinin) uyumlu(konsonant) ya da uyumsuz(disonant) olacağını belirler. Örneğin, taşıyıcının modülatöre oranı 5 ise (taşıyıcı 1000 Hz, Modülatör frekansı 200 Hz) oluşacak yan bantlar taşıyıcının sağ tarafında 1200 Hz, 1400 Hz, 1600 Hz..., sol tarafında ise 800 Hz, 600 Hz, 400 Hz şeklinde oluşur.

Modülatörün genliği( $D$ ), modülasyon miktarını belirler. Eğer modülatör genliği sıfır ise frekans sapması(taşıyıcının frekans değişimi) sıfır olacağından hiç bir modülasyon

görülmez. Modülatörün genliği(D), frekans modülasyonunda modülatör genliğine uygulanan Hz cinsinden bir değer olarak da söylenilebilir.

Frekans modülasyonu spektrumunda bant aralığı(yan bantların sayısı) modülasyon indeksine(I) bağlı olarak değişir. Frekans modülasyonunda bant aralığının yaklaşık hesabı denklem 2.4'te verilmiştir. Bant aralığı modülasyon indeksi arttıkça artar. Modülasyon indeksinin denklemi 2.5'te verilmiştir. Modülasyon indeksi, modülatör genliğinin(D), modülatör frekansına(mf) oranıdır. Örneğin, modülasyon miktarı 100 Hz ve modülatör frekanası 100 Hz ise modülasyon indeksi 1 olur. Modülasyon indeksine bağlı olarak oluşan yan bantların oluşumu şekil 2.34'de gösterilmiştir. Aynı zamanda her bir spektral bileşenlerin genliği modülasyon indeksi ile belirlenebilir. Frekans modülasyonu formülü denklem 2.6'da verilmiştir. Burada A değeri taşıyıcının genliği, C taşıyıcı frekansı, M modülatör frekansını ve I ise modülatör indeksini temsil etmektedir.

$$\text{Yaklaşık FM Bant Aralığı} = 2 \times (D + F_m) \quad (2.4)$$

$$I = D / F_m \quad (2.5)$$

$$FM = A \times \sin(Ct + [I \times \sin(Mt)]) \quad (2.6)$$

$$Ct = 2\pi \times C, \quad Mt = 2\pi \times M \quad (2.7)$$

Bazı modülasyon frekansı, taşıyıcı frekansı ve indeks değerlerinde en uçta oluşan yan bantlar spektrumun en üst ve en alt değerlerinden dışarıya yansır, bu yansıma duyulabilir yan etkilere sebep olabilir. Örneğin en üst bölüm olan Nyquist frekansında katlama(spektrumda katlama) olarak spektrumdaki düşük frekanslı bölüme(taşıyıcı frekansın sol tarafı) geri yansır.

0 Hz'in altında oluşan yan bantlar spektrum içine fazı 180 derece çevrilmiş bir biçimde geri yansır. Negatif bölüm pozitif, pozitif bölüm ise negatif olur. Bu olay spektrumun düşük frekans bantlarında zenginlik katar. Eğer bu negatif frekans bileşenleri tam anlamıyla pozitif bileşenlerle üst üste binerse, bu sefer birbirlerini iptal ederler ve hiç bir şey duyulmaz.

Oluşan her bir yan bandın genliği, modülasyon indeksine bağlıdır. Taşıyıcının genliğine aynı zamanda sıfırıncı yan bantta denebilir. Taşıyıcının genliği  $J_0(I)$



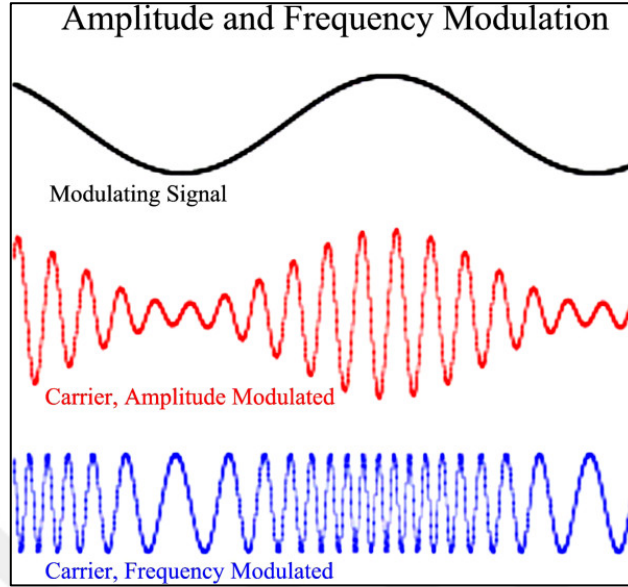
değerine eşittir. Burada J değeri *Bessel* matematiksel fonksiyonundan gelmektedir. Örneğin, üçüncü yan bantın genliği hesaplanmak istendiğinde *bessel* fonksiyonunda  $J_3(I)$  değerini bulmamız gerekir ve bu oluşan frekans bileşeni taşıyıcının her iki yanında aynı genlikle oluşur. Frekans modülasyonunda düşük yan bantlarda (taşıyıcı frekansın sol tarafı) *bessel* fonksiyonu eksi ile çarpılır. Örneğin üçüncü yan bant oluşumunu *Bessel* fonksiyonları çeşitli matematiksel denklemleri çözmek için kullanılır bunlardan biriside Frekans Modülasyon denklemidir. *Bessel* fonksiyonunda tek sayılarda oluşan bileşenlerin genliği eksi ile çarpılır. Frekans modülasyonunun *bessel* fonksiyonu ile tanımı denklem 2.8'de gösterilmiştir. Aynı zamanda şekil 2.35'de *bessel* fonksiyonunun modülasyon indeks aralığı 0-20 iken, n sayısının (yan bant sayısı) 1-15 aralığındaki üç boyutlu gösterimi şekil 2.32'de gösterilmiştir. Bu şekilde dik düzlemde modülasyon indeksine bağlı olarak yan bantların genliğinin değişimini göstermektedir. Aynı zamanda diğer bir önemli durum ise Yan bant sayısının artması ile genlik değişimi oldukça az olması ve az sayıda yan bant oluşumunda genlik değişiminin oldukça dikkat çekmesidir (Dodge ve Jerse s.117 1997, Road s.226 1996).

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} J_n(B) (\sin)(\omega c + n\omega m)t \quad (2.8)$$

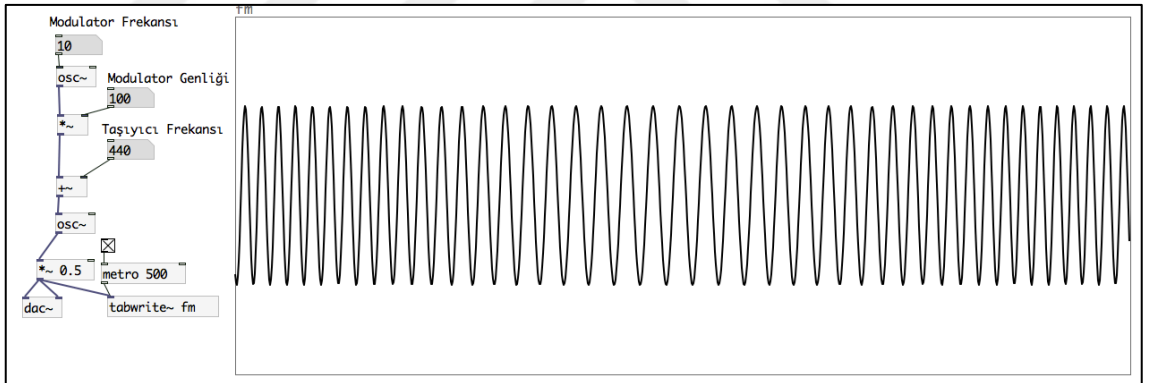
**Şekil 2.30: Yamaha Marka Dijital Ses Sentezleyici**



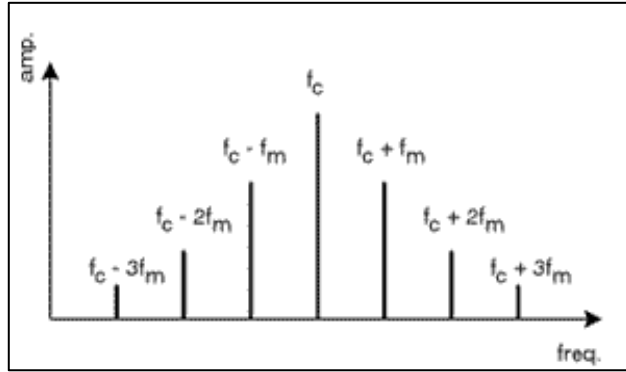
Şekil 2.31: Frekans Ve Genlik Modülasyonu



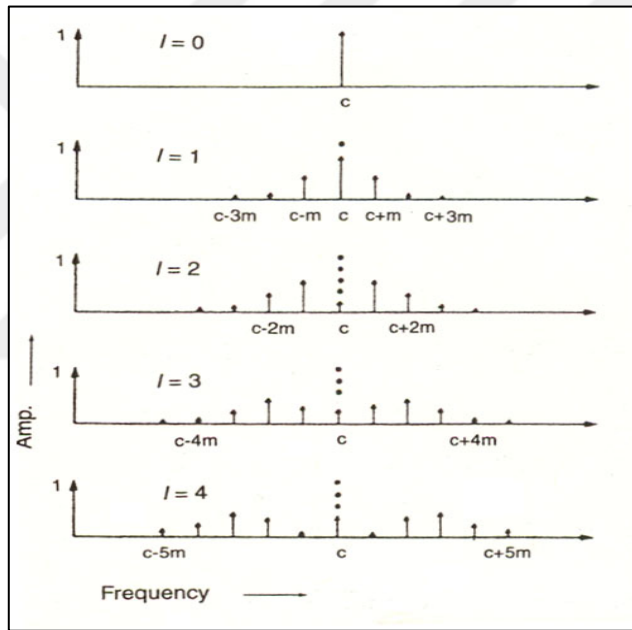
Şekil 2.32: Pure Data Yazılımı Yardımı İle Frekans Modülasyonu Sinyal Akışı



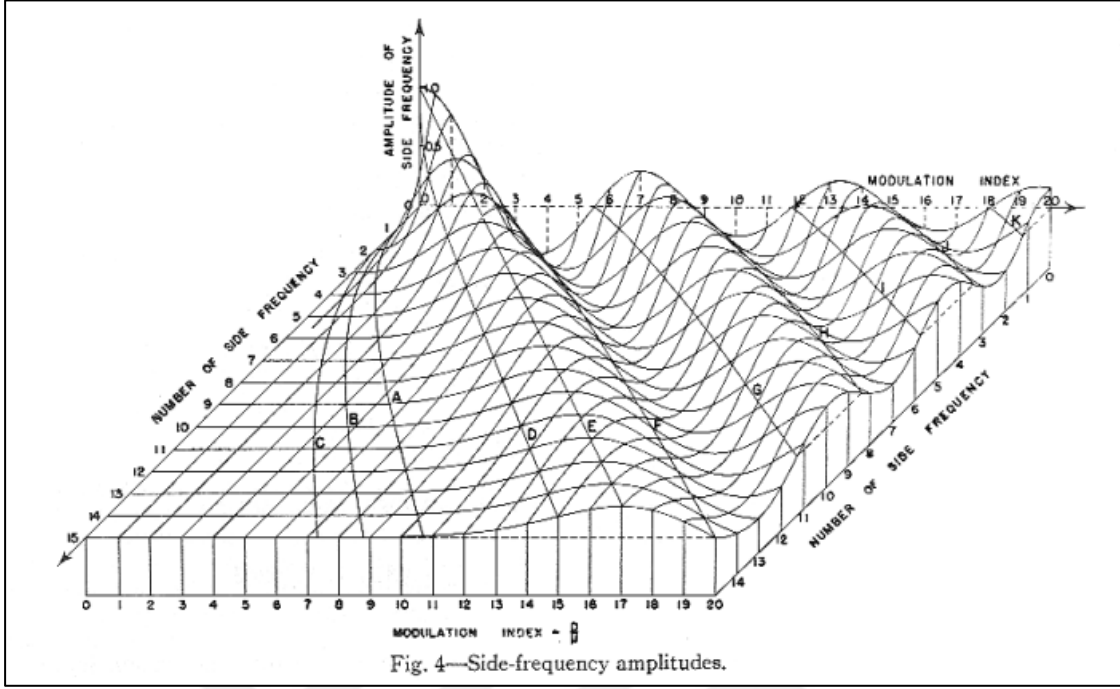
Şekil 2.33: Frekans Modülasyonunda Ortaya Çıkan Yan Bantlar



Şekil 2.34: Modülasyon İndeksine Bağlı Olarak Yan Bant Oluşumu



## Şekil 2.35: Bessel Fonksiyonunun Üç Boyutlu Grafiği

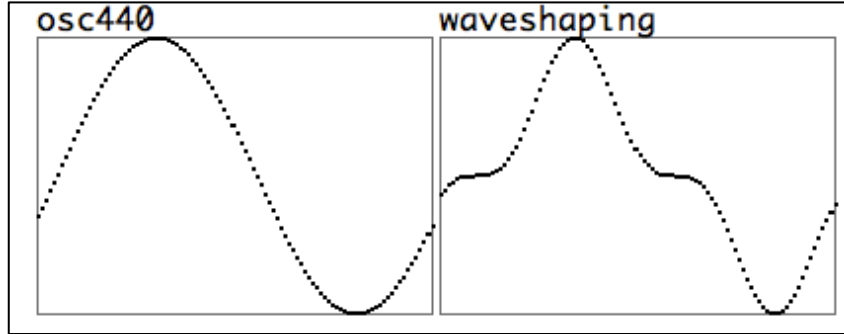


### 2.2.4 Dalga Şekillendirme(Waveshaping) ile Sentezleme

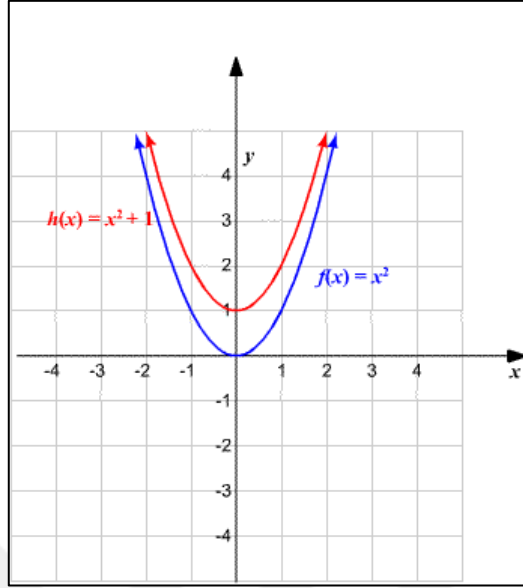
*Jean-Claude Risset*, *Bell* telefon laboratuvarında 1960'ların sonlarına doğru dalga şekillendirme ile sentezleme deneyini ilk gerçekleştiren kişidir. Ardından *Daniel Arfib* ve *Marc LeBrun* ise temel metot üzerinde teorik ve deneysel anlamda bu yöntemi geliştiren kişilerdir. Müzikte çok ilginç seslere yol açan bu yöntemin arkasında olan temel fikir bir sinyalin sinyali bozulmaya uğratan bir kutunun (*distortion box*) içinden geçmesi olarak düşünülebilir. Bu işlemi bir sinyalin tanımlanmış bir fonksiyondan geçerek dalganın şekillendirilmesi olarakta düşünülebilir. Dalga şekillendirmeyi en rahat duymak için bir sinyali amfi de bozulmaya uğrayarak duyabiliriz. Sinyali kontrollü bir şekilde bozulmaya uğratmak, çok kullanışlı tınılar ortaya çıkarabilir. Giren sinyalin genlik değerinin artması spektrumda harmonik sayısının artmasına neden olur ve bu nedenle daha zengin harmoniklere sahip bir ses ortaya çıkar. Dalga şekillendirme de doğrusal olmayan bir fonksiyon tercih edilir bunun sebebi ise eğer sinyal doğrusal bir fonksiyondan( $f(x)=x$ ) geçerse her girilen değer aynı şekilde çıkar. Bu seçilmiş fonksiyonlara transfer fonksiyonu ismi verilir. Şekil 2.36'da bir kosinüs dalganın  $f(x)=x^3$  fonksiyonu ile dalga şekillendirilmesi gösterilmiştir. Şekil 2.37'te bir

sonraki şekli daha iyi anlamak için  $f(x)=x^2$  fonksiyonun grafiği verilmiştir. Şekil 2.38'de ise bir testere dalganın  $f(x)=x^2$  fonksiyonu ile şekillendirilip ardında maksimum ve minimum genlik değerlerinin kırılarak başka bir dalga şekillendirme yöntemi gösterilmiştir. Transfer fonksiyonu ve giren sinyal ilişkisinin sonucu(çarpımı) şekil 2.39'da gösterilmiştir. Giren sinyalin genliği eğer az ise küçük değişikliğe uğrayarak bir spektrum oluşturur. Giren sinyalin genliği ne kadar artarsa transfer fonksiyonu ile etkileşimi daha çok olacağından harmonik sayısı artacaktır. Transfer fonksiyonu grafiğin merkezine simetrik ise sadece tek sayılı harmonikler oluşur. Eğer transfer fonksiyonu dikey düzleme simetrik ise bu sefer de sadece çift sayılı harmonikler oluşur. Dalga şekillendirme sentezlemede oluşan harmoniklerin genliklerini bulmak için kullanılması gereken bazı değerler vardır. Bu değerleri gösteren tablo 1'de verilmiştir. Tabloda her harmonik değerinin bir bölüni(div) vardır. Örneğin transfer fonksiyonunu  $f(x)=x^5$  olarak düşünürsek, harmoniklerin genlikleri sırasıyla  $H_1=1/16*(10)=0.625$ ,  $H_3=1/16*(5)$ ,  $H_5=1/16*(1)=0.0625$  olarak bulunur. Görüldüğü gibi transfer fonksiyonu tek olduğundan dolayı oluşan harmonikler de tek sayılarda oluşmuştur. (Eden 2014, Russ s.279 2009)

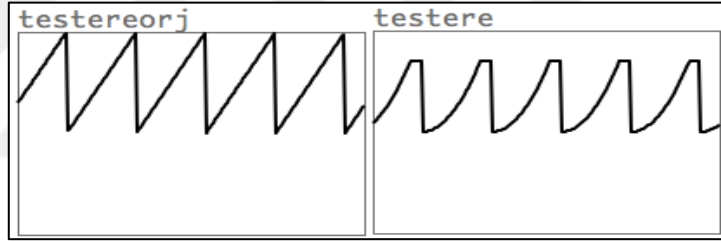
**Şekil 2.36: Kosinüs Dalga Şekillendirme**



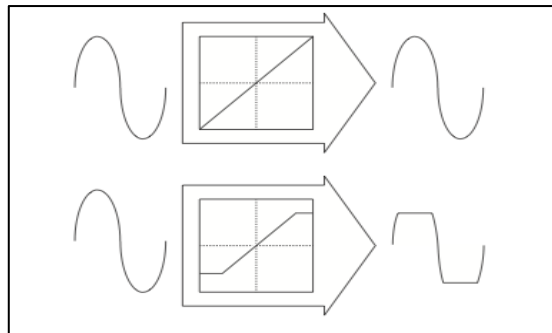
Şekil 2.37:  $f(x)=x^2$  Grafiği



Şekil 2.38: Testere Dalga Şekillendirme



Şekil 2.39: Giren Sinyal ve Transfer Fonksiyonu İlişkisi



**Tablo 2.1: Transfer Fonksiyonuna Bağlı Olarak Üretilen Harmoniklerin Genlikleri**

|     | DIV  | h0  | h1  | h2  | h3  | h4  | h5  | h6 | h7 | h8 | h9 | h10 | h11 |
|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|-----|-----|
| x0  | 0.5  | 1   |     |     |     |     |     |    |    |    |    |     |     |
| x1  | 1    |     | 1   |     |     |     |     |    |    |    |    |     |     |
| x2  | 2    | 2   |     | 1   |     |     |     |    |    |    |    |     |     |
| x3  | 4    |     | 3   |     | 1   |     |     |    |    |    |    |     |     |
| x4  | 8    | 6   |     | 4   |     | 1   |     |    |    |    |    |     |     |
| x5  | 16   |     | 10  |     | 5   |     | 1   |    |    |    |    |     |     |
| x6  | 32   | 20  |     | 15  |     | 6   |     | 1  |    |    |    |     |     |
| x7  | 64   |     | 35  |     | 21  |     | 7   |    | 1  |    |    |     |     |
| x8  | 128  | 70  |     | 56  |     | 28  |     | 8  |    | 1  |    |     |     |
| x9  | 256  |     | 126 |     | 84  |     | 36  |    | 9  |    | 1  |     |     |
| x10 | 512  | 252 |     | 210 |     | 120 |     | 45 |    | 10 |    | 1   |     |
| x11 | 1024 |     | 462 |     | 330 |     | 165 |    | 55 |    | 11 |     | 1   |

### 2.2.8 Faz Distorsiyonu İle Sentezleme (Phase Distortion Synthesis)

Frekans modülasyonunun popüleritesinin zirve yaptığı 1980'li yıllarda şekil 2.40'da gösterildiği gibi *Casio*, CZ serilerinde dalga şekillendirmeyi esas alan faz distorsiyonu olarak isimlendirdiği sentez tekniğini kullanmıştır. Faz distorsiyonu ile sentezleme tekniği 1984 yılında *Casio* tarafından tanıtılmıştır. Frekans modülasyonuna çok benzemektedir. Faz distorsiyonu ismi aslında transfer fonksiyonunun alternatif bir yol ile incelenmesinden gelmektedir. Faz distorsiyon ile sentez tekniği, sinüs dalga tablosu içeren bir osilatör kullanır. Aynı zamanda sinüs dalga formu içeren bir tablonun farklı oranlarda taranması sinüs dalgasının bozulmasına(distortion) neden olur. Bu sonuç transfer fonksiyonun etkisi olarak görülse de gerçekte sinüs tablosunun hızlı ya da yavaş tarama hızından dolayı gerçekleşmektedir. Tarama frekansının değişmesi sinüs dalgasının fazının değişmesine karşılık gelmektedir ve böylece bu durum faz bozulması olarak bilinmektedir. Tarama, 0'dan  $\pi$ 'ye hızlanırken,  $\pi$ 'den  $2\pi$ 'ye doğru yavaşlar. Şekil 2.41'de çıkış dalga formunun hızlanarak ya da yavaşlayarak taranması gösterilmiştir. Hızlanma ve yavaşlama miktarı arttıkça, orjinal sinüsoidal dalga formu üçgen dalga benzeri bir dalga formuna dönüşür ve en sonunda testere dişi dalga formuna benzeyerek zengin harmoniklere sahip olur. Şekil 2.41 a şikkında sabit oranla okutulmasının sonucunda bir sinüs dalgasının oluştuğu gösterilmektedir. B şikkında ise bir devrin iki katı(*twice per cycle*) tarama frekansından dolayı sinüs dalgasının

distort edilerek testere dalga formuna benzer bir sonucun ortaya çıktığı görülmektedir. Şekil 2.42, 2.43 ve 2.44'te phase distortion simulator programı ile distorsiyon oranının sırasıyla 0, 50 ve 127 olduğu durumlar gösterilmiştir. Burada görüldüğü gibi distorsiyon oranı arttıkça harmoniklerde artış gözlenmiştir.

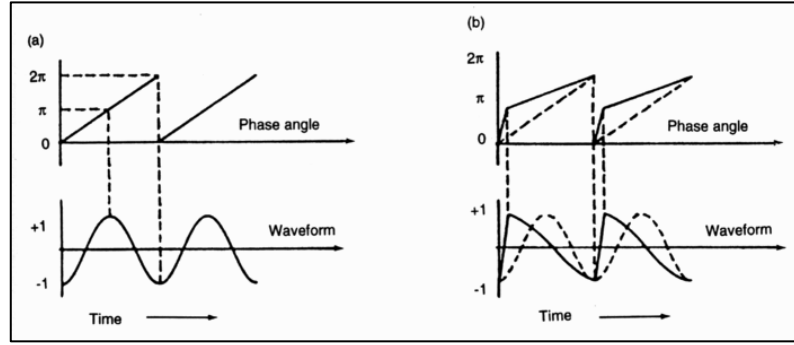
Faz distorsiyonu faz modülasyonunun alt türü olarak düşünülebilir. Faz modülasyonu da frekans modülasyonuna çok benzemektedir. Faz modülasyonu, zaman bazında taşıyıcının faz konumunun, başka bir modülatör ile değiştirilmesi ile oluşumuna verilen isimdir. Ayrıca faz kaydırma(*phase shifting keying*) olarak da isimlendirilir. Sinüs dalgası kullanıldığı durumda ortaya çıkan sonuç frekans modülasyonuna çok benzemektedir. Diğer dalga tipleri kullanıldığında ise ortaya çıkan sonuç frekans modülasyonundan farklı bir şekilde duyulur.<sup>iii</sup> Şekil 2.45'de faz modülasyonun bir örneği gösterilmiştir. Genel anlamda modülasyon ile sentezleme yönteminin dijital olarak gösterimi şekil 2.46'da gösterilmiştir (Vail s.50 2014, Russ s.278 2009, Road s.226 1996).

**Şekil 2.40 : Casio CZ Serisi**

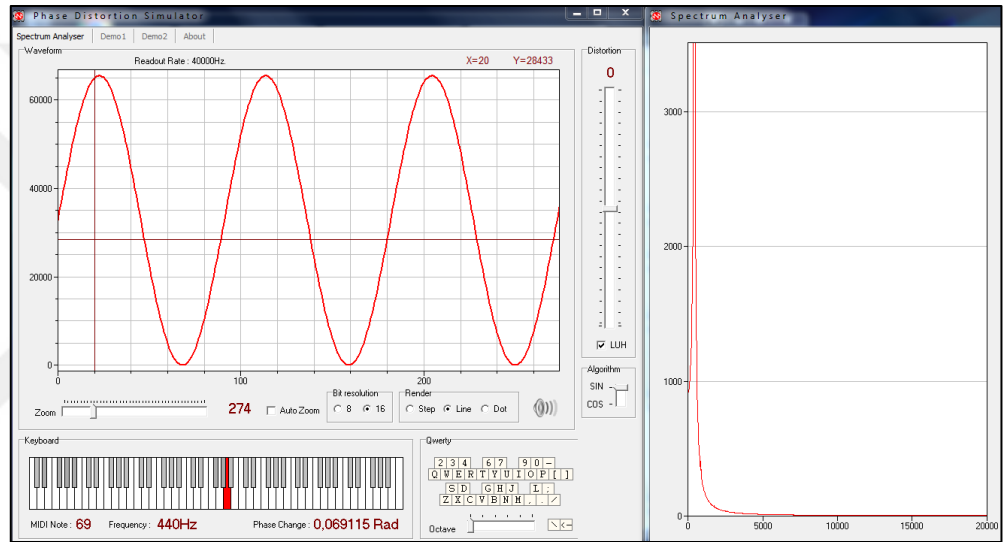




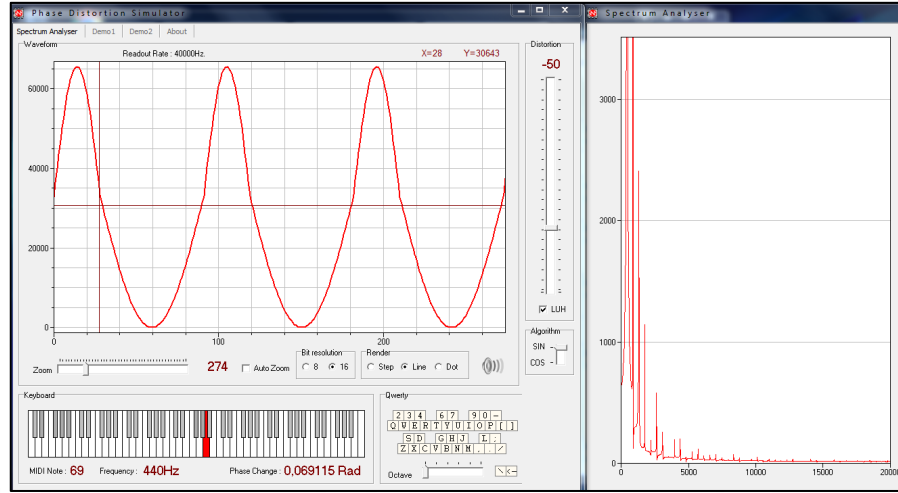
Şekil 2.41: Faz Distorsiyonu Gösterimi



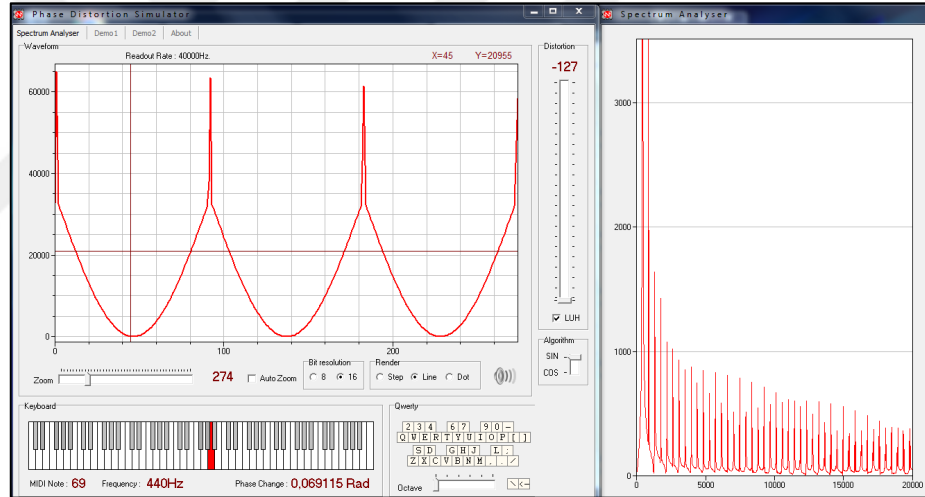
Şekil 2.42 : Faz Distorsiyonu Gösterimi



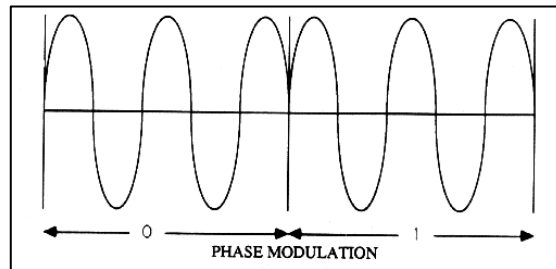
**Şekil 2.43: Faz Distorsiyonu Gösterimi**



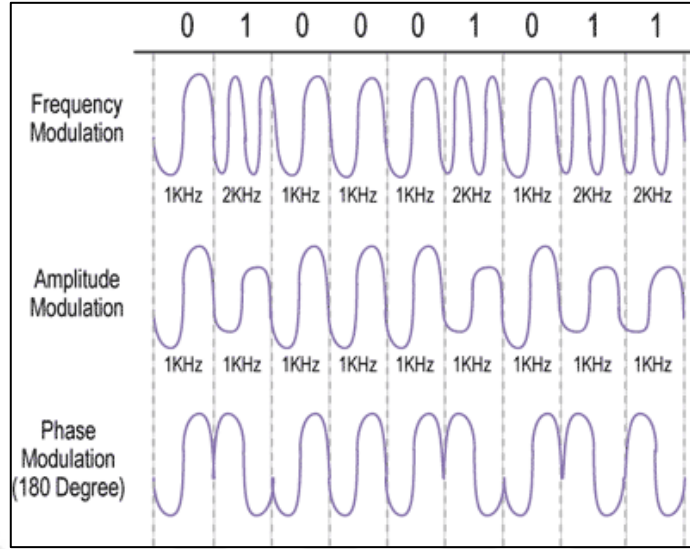
**Şekil 2.44 : Faz Distorsiyonu Gösterimi**



**Şekil 2.45 : Faz Modülasyonu Gösterimi**



Şekil 2.46 : Modülasyon İle Sentez Tekniklerinin Dijital Gösterimi



### 2.2.5 Dalga Tablosu(Wavetable) Sentezleme

Örnek esaslı sentez yöntemi(sample based synthesis) dalga tablosu, vektör sentezleme ve granüler sentezleme olmak üzere 3 başlıkta toplanabilir. Günümüzde dalga tablosu sentezleme oldukça kullanışlı bir hale gelmiştir. Dijital ses sentezleme işlemi bir dalga formunun örneklenmesinin ardından sayı dizileri ile ifade edilmesi ile olur. Bu sesler ise, dalga formundan elde edilmiş örneklerin dijital-analog dönüştürücüye göndererek çeşitli voltaj değerlerinde yükseltilecek ses sistemleri ile duyulabilir hale getirilir. Dalga tablosu sentezleme en eski bilgisayar ile ses oluşturma tekniklerinden birisidir. Dalga tabloları genellikle 128 ile 2048 arasında değerler içerir. Üretilen sesin tonu, tablo büyüklüğüne, tablo verisinin frekansına ve oynatım(*playback*) oranına bağlıdır<sup>iv</sup>. Dalga tablosu sentezlemede frekansın bulunması için gereken formül 2.9'da verilmiştir. Buradaki artış değeri, atlanan örnek sayısını ifade etmektedir. En basit örnekle anlatmak gerekirse tüm örnek değerleri okunduğundan artış değeri 1'dir. Eğer sadece dalga tablosundan tek ya da çift sayı numaralı örnekler okutulursa artış değeri 2'dir. Yeni faz değeri faz artışının, faz ile toplanması ile bulunur. Dalga tablosunun en yaygın kullanımlarından bir tanesi şekil 2.47'de gösterildiği gibi sinusoidal sinyaller üretmektir. Sinüsoidal osilatörün frekansı faz artışına bağlı olarak kontrol edilebilir. Dalga tablosu doğası gereği çıkış sinyali periyodiktir. Daha karmaşık dalga formları eklemeli sentezleme ile hesaplanarak oluşturulabilir. Zamanla bir tonun değişimini,

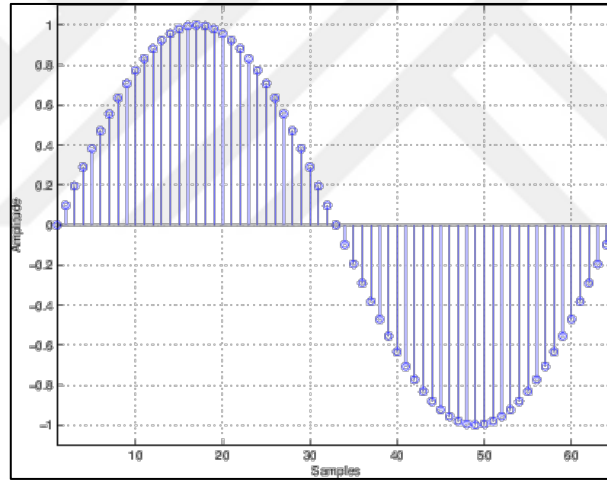
gelişimini isteyen bir kişi çoklu dalga tablolarını zaman ile değişen oranlarda miksleyerek ulaşabilir.

Dalga tablosu sentezleme dijital ortamda saf bir sinüs oluşturma yöntemi ile çok benzerdir. Eklemeli sentezleme sinüs dalgalarını toplarken, dalga tablosu sentezlemede dalgalar karmaşık olabilir. Hatta bazı örneklenmiş (sampled) sesler bile olabilir. Bir sinüs dalgası oluşturmak için iki yöntem vardır. Birinci yöntem, bir bilgisayarın bir matematiksel formüle bağlı olarak, bir dalganın tüm örnek(sample) değerlerinin hesaplanmasıdır. İkinci yöntem ise dalganın tam bir devri için gereken değerlerin hesaplandıktan sonra bir hafızaya yazmak, ardından bu değerlerin istenilen frekanslarda tekrar okutmaktır. Bu ikinci teknikte dalgaya ait örneklerin yazıldığı hafızaya şekil 2.47’de gösterildiği gibi dalga tablosu (wavetable ya da lookup table) denmektedir. Bir dalga tablosunun her elemanının bulunduğu adrese indeks ismi verilir ve dizinin istenilen bir elemanına, o elemana karşılık gelen tablo indis değeri ile ulaşılabilir. Örneğin, dalga tablosunun sıfıncı elemanı (wavetable[0]=0 genliği 0) değeri sıfırdır ya da altıncı elemanının değeri (wavetable[6]=1 genliği 1) birdir. Bilgisayar dalganın örnek değerlerini ardışık olarak artan indeks sayılarıyla hafızasında tutar ve DAC’ye gönderir. Müzikal anlamda kullanılan sesler genelde birbirlerini tekrar ederler. Bu durum frekans ya da ton bilgisinin, başka başka fikirlerle yansımaları olarak kabul edilebilir. Periyodik sesler üretmek için, bilgisayarın bu hafızayı(dalga tablosu) tekrar ederek tarama işlemine dalga tablosu sentezleme ismi verilir. Bir bilgisayarın hafızadan(dalga tablosu) bu değerleri okuması yalnızca bir kaç nanosaniyede gerçekleşir. Dalga tablosu içerisine örneklenmiş bir ses eklendiğinde bu tablonun hangi frekansta okunacağını bulmak için örnekleme frekansını, tablo uzunluğuna bölmek gerekmektedir. Dalga tablosu ses sentezleyicilerde en çok kullanılan teknik loop (döngü) tekniğidir. Bu teknikte bir sesin atak ve uzama süreleri çok önemlidir. Uzama süresi, atak süresinin ardından gelen bölümdür ve bu bölümü dalga tablosu sentezlemede döngü haline getirilerek döngü haline getirilmiş periyodik ses elde edilmektedir. Bir dalga formunun atak ve uzama bölümlerinde faydalanarak, loop, tek çalım(one shot), ses editleme(*sample editing*) ve işleme gibi işlemler gerçekleştirilebilir. Günümüzde müzik alanında bu teknikler oldukça kullanılmaktadır. Dijital ortamda dalga tablosu oluşturmak için, *Pure Data* programında tablo içerisine çeşitli değerler yazmanın bir yöntemi olan *Sinesum* fonksiyonu kullanılır. *Sinesum*

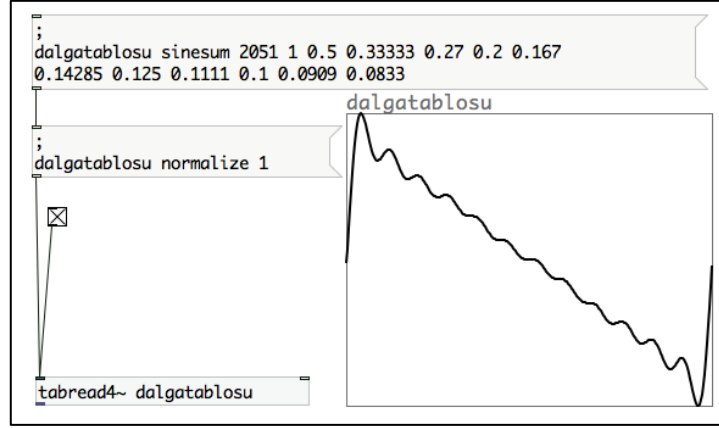
fonksiyonu sinüslerin toplanması ile dalga oluşturmaya yarayan bir fonksiyondur ve bu işleyişinden dolayı eklemeli sentezlemeye çok benzemektedir. Ayrıca interpolasyonlu bir fonksiyondur ve bu sayede boşlukları doldurur. Şekil 2.48’de pure data programında sinesum fonksiyonuna 1, 0.5, 0.33333, 0.27, 0.2, 0.167, 0.14285, 0.125, 0.1111, 0.1, 0.0909, 0.0833 değerleri girilerek bir dalga tablosu oluşturulmuştur. Bu değerler sırasıyla doğuşkanların genlik değerleridir. Şekil 2.49’da ise başka değerler girilerek bu oluşan dalga 1000 Hz ile dinlenmiştir. Frekans girdisi dalga tablosunu değiştirmez sadece üretilen dalgayı o frekansta dinlememizi sağlar (Eden s.73 2014, Road s.92 1996).

$$f = (\text{Artış değeri (increment)} \times \text{örnekleme frekansı (sample rate)}) / \text{Lenght} (2.9)$$

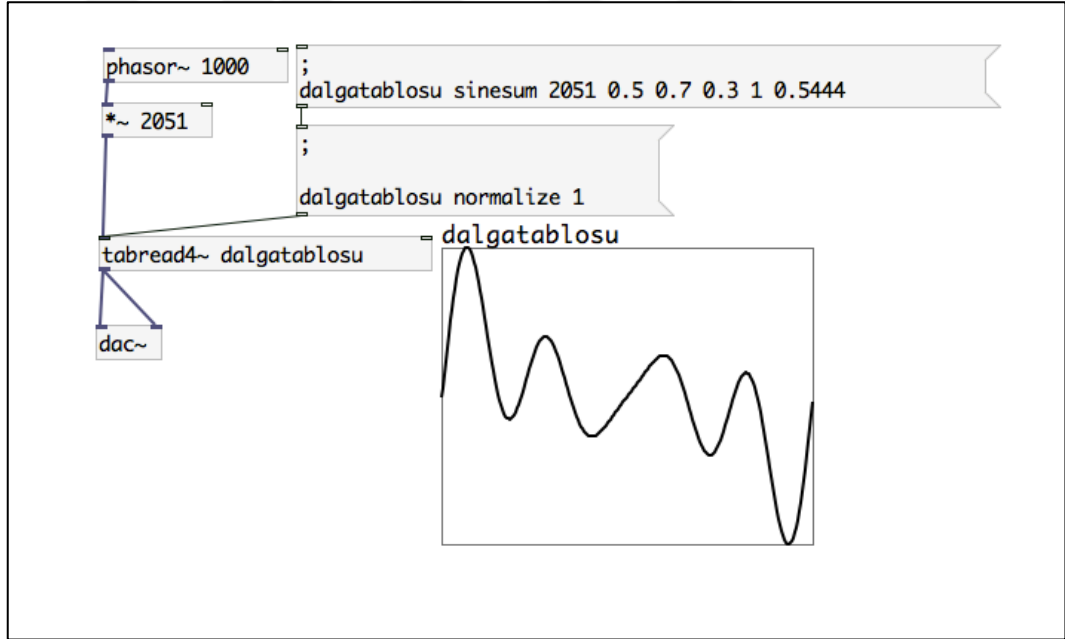
**Şekil 2.47 Dalga Tablosunun Grafik İle Gösterimi**



Şekil 2.48 Dalga Tablosu Sentezleme İle Testere Dalga Oluşumu



Şekil 2.49: 1000 Hz ile Dalga Tablosu Dinleme



## 2.2.6 Vektör Sentezleme

Vektör sentezleme yöntemi ilk defa 1980'li yıllarda *Prophet VS* model ses sentezleyicisinde kullanılmıştır. Şekil 2.50'de *Prophet Vs* model ses sentezleyici gösterilmiştir. Bu ses sentezleyicinin sol tarafında bir joystick ile dört ayrı dalga tablosu işlenebilmektedir. Daha sonradan *Yamaha* ve *Korg* gibi dünyaca ünlü markalar bu

sentezleme yöntemini kullanarak çeşitli ses sentezleyiciler üretmişlerdir. Vektör sentezleme yöntemi günümüzde de çok sık kullanılmaktadır. Dört ayrı dalgayı mikslemek ve işlemek isteyenler için bu sentezleme yöntemi ihtiyacı çok iyi bir şekilde karşılamaktadır.

Vektör sentezleme yöntemi birden fazla dalga tablosunu birlikte mikslemek ya da işlemek için kullanılan bir sentezleme yöntemidir. Örneğin, dalga tablosu sayısı iki olduğunda çapraz sönümlleme (crossfading) ile istenilen oranda bu iki dalga tablosu işlenebilir. Dalga tablosu ikiden fazla olduğu durumlarda bu çapraz sönümlleme x ve y ekseninde kontrol paneli ile gerçekleştirilir (Vail s.55 2014).

**Şekil 2.50: Prophet VS Ses Sentezleyici**



### 2.2.7 Granüler Sentezleme

Granüler sentezleme metodu bir sesin küçük taneciklere ayrıldıktan sonra başka bir ses için yeniden düzenlenme ve dağılma metodudur. Kuantum fiziğine göre bir ses, yapısı itibariyle atomik parçacıklar haline indirgenebilir. Bir ses taneciği o anki durumun bir özeti gibi düşünülebilir. Müzikal sinyallerin granüler olarak gösterimi *short time segment*, *sliding window*, *wavelet*, *window function pulse*, *formant wave function*, *vosim pulse*, *toneburst*, *tone pulse* gibi bir çok farklı şekilde ifade edilebilir.

Alman bilim adamı *Isaac Beekman* 1616 yılında sesin fiziksel halini düşünerek, sesin havada kürecikler(küçük ses dalgaları) halinde yayıldığını belirtmiştir. *Isaac* bu ifadeyle granular sentezin mecazi anlamda algılanmasına katkıda bulunmuştur. Ardından sese granular ya da kuantum anlamında yaklaşım fikri İngiliz Fizikçi *Dennis Gabor* tarafından ileri sürülmüştür. Gabora göre, granüler gösterim her türlü

sesi tanımlayabiliyordu. Bu teorisi matematiksel olarak *Bastiaans* tarafından ispatlanmıştır. Ardından granüler gösterim 1960 'larda pencereleme tekniğinde(windowing) kısa süreli fourier transferi uygulaması ile kesin olarak gösterilmiştir.

Besteci *Xenakis* ses taneciklerini bestesel anlamda ilk yorumlayan kişi olmuştur. *Xenakis* analog tonlar kullanarak ve bantları birbirine ekleyerek(tape splicing) granüler sesler oluşturmuştur. Buna örnek olarak 1992 yılında yaylı orkestrası ve bant ekleme tekniğini birleştirerek Analoguqie A-B bestesini oluşturmuştur. *Curtis Road* ise 1974 yılında Granüler sentezi ilk kez bilgisayar ortamında gerçekleştiren kişi olmuştur.

Ses dalgalarının küçük parçalarına tanecik(grain) ismi verilir. Bir tanecik(grain) her hangi bir ses dalgasından elde edilebilir. Sinüs dalgası en saf dalga olduğu gibi bir de eklemeli sentezleme ile yeni sesler ve sinyaller üretmek için çok kullanışlıdır. Eklemeli sentezleme yöntemi granüler sentezlemenin temelidir. Her dalgada olduğu gibi sinüs dalgasının üç önemli parametresi(genlik, frekans, faz) kullanıcıya hangi frekansta sinüs dalgasının oynatılabileceğini belirleyebilir. Ancak tam olarak ne kadar süre oynacağını belirleyemez. Çünkü sinüs dalgalarının başlıca problemi teorik olarak sonsuz devam sürelerinin(*duration*) olmasıdır. Granüler sentez yöntemi ile devam süresi boyutlandırılarak bir sinüs dalgasına eklenebilir. Granüler sentez yönteminde sadece eklemeli sentez yöntemi kullanılmaz. Aynı zamanda diğer sentez yöntemleride bu teknikle kolayca birlikte çalışabilir.

Granüler sentez yönteminde kısa örneklenmiş ve uzun örneklenmiş olmak üzere iki çeşit sınıflandırılmış ses örnekleri vardır. Kısa örneklerin etki süresi bir taneciğin(*grain*) etki süresi ile aynıdır. Uzun örneklenmiş sesler ise tanecik serileri olarak düşünülebilir. Zaman bazlı uzatma işlemi(*time stretching*) ses tanecikleri üzerine işlem uyguladığından dolayı bu işlemin temeli granüler sentezlemeyi barındırmaktadır. Burada ses taneciklerini başka şekillerle de kullanmanın bir çok yöntemi vardır. Örneğin içerik bilgisi olarak uzunca örneklenmiş bir sestem üç küçük bölüm kullanılabilir. Bu durum şekil 2.51 ve şekil 2.52'de gösterilmiştir. Şekil 2.52'de aynı ses örneği tanecik halinde modellenmiştir. Bu sayede ses tanecikleri daha iyi anlaşılabilir. Örneklenmiş sesin, tanecik şeklinde düzenlendikten sonra ses örneğinin şeklinin değiştiği görülür buna sebep olansa o taneciğin zarfıdır. Bu zarf



taneciğin genliğini ve periyodunu(*duration*) belirler. Taneciğe zarf ekleme işlemine genlik modülasyonu türü olan pencereleme adı verilir. Taneciğin genliği, bir bakıma zarfın şeklini alır denilebilir. Bir ses taneciğinin en basit şekilde üretimi şekil 2.53’de gösterilmiştir. Bir zarfın parametreleri şekil 2.54’te gösterildiği gibi atak zamanı(*attack time*), devam zamanı(*sustain time*), bozulma zamanı(*decay time*), etki süresi(*duration*) ve genlik(*amplitude*) olarak beş maddede tanımlanabilir. Bu parametreler şekil(*shape*) adında çok boyutlu bir parametre ile özetlenebilir. Bu şekiller düz çizgi(*straight line*), kavisli(*curved*) ve karmaşık(*complex*) olmak üzere üç temel başlıkta toplanabilir. Karmaşık şekil(*shape*) granüler sentez için halen daha yeni bir fikirdir ve iki zarfı birden içinde barındırır. Bu zarf türü 1988 yılında geliştirilen *Wavelet* analiz tekniğinde kullanılmaktadır. *Wavelet*, taneciğe çok benzemektedir ancak birincil amacı fazın ve frekansın büyüklüğünü analiz etmektir. *Wavelet* sentezleme yöntemi, granüler sentez tekniği ile çok benzerdir. Ancak burada granüler sentezlemede tanecik uzunluğu istenilen uzunlukta iken, wavelet sentez tekniğinde wavelet transform kullanılarak tanecik uzunluğu ton içeriğinden elde etmektedir. Bu yüzden *wavelet* sentez yöntemi, *pitch shifting* (ton kaydırma) yöntemi için daha kullanışlıdır.

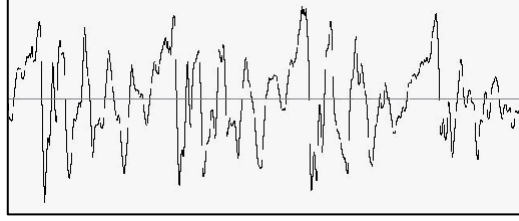
Granüler sentez tekniğinde kullanılan iki farklı yöntem vardır. Bunlar senkronize(eş zamanlı) granüler sentez ve asenkron granüler sentezleme olarak ikiye ayrılır. Bu iki yöntem birbirinden oldukça farklıdır ve ikisi de farklı yapısal efektler üretir. Senkronize granüler sentezlemede tanecikler birbirinden aynı zaman miktarı ile ayrılır. Senkronize granüler sentez *Formant* sentezleme ile çok yakından ilişkilidir. *Formant* sentezlemeye aynı zamanda Fransız bir terim olan *fonction d’onde formantique* (FOF) sentezleme de denmektedir. FOF tanecikleri sinüs tanecikleri ile çok benzerdir ve sadece sinüsoidal tanecikleri kullanırlar. Aynı zamanda zarfları belirli bir yapıdadır. Kısacası FOF sentezleme sinüsoidal taneciklerin toplanmasıyla oluşur. Senkronize granüler sentezleme ve asenkron granüler sentezleme genlik, tanecik yoğunluğu(*grain density*), *pitch*(ton) ve iç hücum zamanı(*inner onset time*) olarak dört farklı kontrol parametresini kullanır. Aynı zamanda atak ve bozulma zamanı parametrelerini de kullanır.

Senkronize granüler sentezlemede genlik, yapının tüm genliğini kontrol eder ve taneciğin zarfı gibi düşünülebilir. Tanecik yoğunluğu ise yapı veya doku içinde taneciklerin hangi yoğunlukta dağılacığını belirler. Tanecik yoğunluğu saniyedeki tanecik sayısı olarak ölçülebilir. Tanecik yoğunluğu yapının veya dokunun tınısına, genliğine etki eder. Yoğunluk arttıkça genlik artar ve ton yükselir. Ton algısı, taneciklerin farklı örnekleme oranlarında oynatılması ile oluşturulabilir. İç hücum zamanı(*inner onset time*) ise doğrudan tanecik yoğunluğu ve eşzamanlılık ile ilişkilidir. Bu zaman iki komşu tanecik arasındaki süre uzunluğudur.

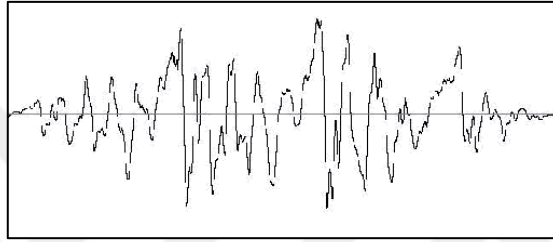
Asenkron granüler sentezlemede ise genlik parametresi senkronize granüler sentezleme ile aynı şekilde çalışır. Eşzamansız granüler sentezlemede yapı belirli bir zaman aralığı olmadan taneciklerin rasgele yayılması ile oluşur. Tanecik yoğunluğu, tanecikleri dağıtan en basit parametredir. Ton(*pitch*) ise yoğunluk arttıkça artmaz. Örneğin yoğunluk saniyedeki 200 tanecik ise saniyede 200 tanecik rasgele dağılır. İç hücum zamanı(*inner onset time*) ise iki komşu tanecik arasındaki süre uzunluğudur ve sürekli olarak değişir.

Granüler sentezleme kısa süreli ses taneciklerinin kümelenmesini sağlayan sentez tekniğidir. *Synchronous* ve *quasi-synchronous* granüler sentezleme tona bağlı bir spektrum oluştururken *asynchronous* metod ise daha fazla tanecikli ses efektleri oluşturur. Granüler sentezleme ile birden fazla parametrenin kontrol edilmesiyle, tüm bir yapının kontrol edilmesi sağlanmıştır. Bu durum mikro ve makro seviyeyi ortaya çıkarmıştır. Ancak binlerce taneciğin kontrolü bir probleme dönüşmüştür. Bu problem “stochastic determination” ve “poisson dağılımı” gibi çeşitli algoritmalarla çözülmüştür. Bu olasılıklı belirleme algoritmasının temel prensibi sınırlandırılmış parametreler ve değişen zarf uygulamaları ile bir fonksiyona bağlı kalarak sesin bir tını ile başlayıp giriş, sesin hareketlerinden sonra başladığı şekilde bitmesini esas alır. Buna en güzel örnek *Xenakis* tarafından yazılan *Analogique A-B* bestesidir. Bu olasılıklı belirleme metodu belirli bir noktada ya da belirli bir yönde kullanışlı granüler dokular sağlar. *Poisson* dağılım metodunun arkasındaki temel prensip ise sürekli bir dağılım değildir. Ancak belirli alanlar ile sınırlandırılmıştır<sup>v</sup>(Dodge ve Jerse s.262 1997,Road s. 1996).

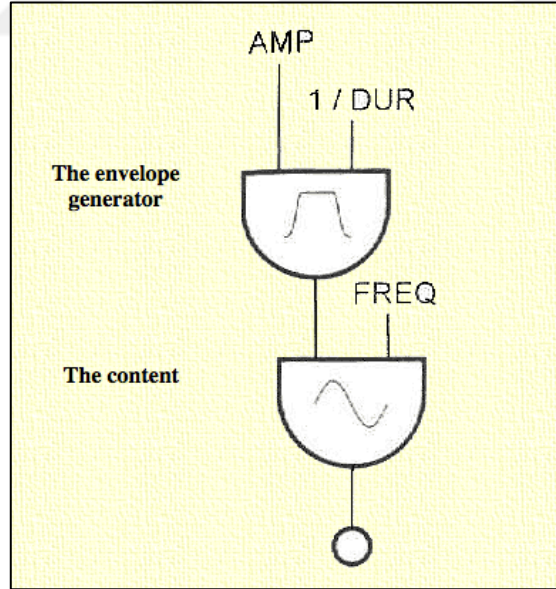
**Şekil 2.51: Analog-Dijital Dönüştürücü Kullanılarak Ses Örneklenmesi**



**Şekil 2.52: Ses Örneğinin Tanecik Olarak Oluşturulması**

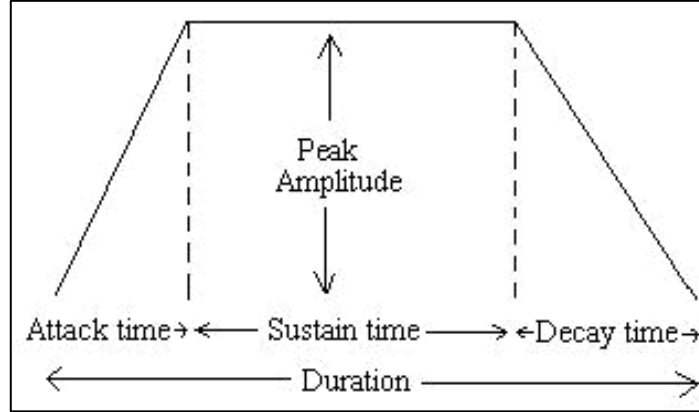


**Şekil 2.53: Ses Taneciği Oluşturma Metodu**



*Kaynak: (Dodge & Jerse 1997: 263)*

Şekil 2.54: Tanecik Zarfları

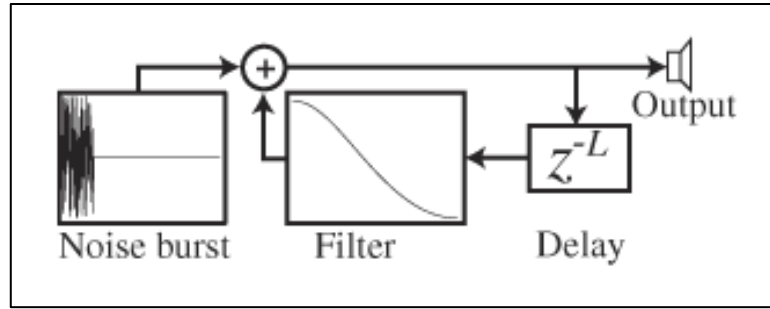


### 2.2.8 Karplus-Strong Algoritması

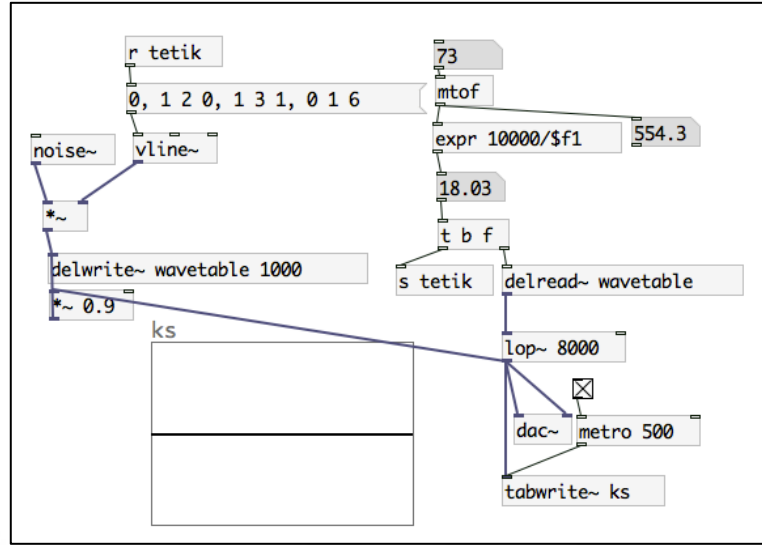
Fiziksel modelleme ile sentezleme yönteminde *Karplus-Strong*, *Formant* sentezleme ve *Digital Waveguide* sentezleme olmak üzere 3 adet teknik bulunmaktadır. En kullanışlı sentez yöntemlerinden biri ise *Karplus-Strong* Algoritmasıdır. *Karplus-Strong* tekniği ile sentezleme fiziksel modelleme tekniği olmasıyla birlikte bir dalga biçiminin bir geciktirme hattı(*delay*) içerisinde filtrelenerek döndürülmesi(*loop*) temeline dayanan bir tekniktir. *Alexander Strong* tarafından icat edilmiştir ve *Kevin Karplus* ise nasıl çalıştığını ilk analiz eden kişidir. Bu yüzden bu teknik *Karplus-Strong* olarak adlandırılmaktadır. Bu teknik ile telli ve vurmali çalgı benzeri sesleri üretmek mümkündür. Temel *Karplus-Strong* uygulamasında genel olarak beyaz gürültü tercih edilmektedir. Ancak diğer dalga tipleri de isteğe göre seçilebilir. Seçilen dalgaya belirli bir zarf uygulanarak kısa süreli bir dalga edilir ve bu dalga belirlenmiş süreye sahip geciktirme hattına(*delay line*) gönderilir. Buradan çıkan sinyal genliği 1'den düşük bir alt geçirgen filtreden geçirildikten sonra bir önceki dalga ile karıştırılır. Bu işlem sönüm gerçekleşinceye kadar devam eder. Ses tınısı karmaşık olan bir dalganın sönüm gerçekleştikçe daha basit bir sinüs dalgaya doğru değiştiği gözlemlenir. Şekil 2.55'te temel bir *Karplus-Strong* algoritmasının sinyal akışı gösterilmiştir. Burada ilk olarak gürültü kaynağı belirli bir süre içeren geciktirme hattının girişine bağlanır. Böylece geciktirme hattı, N birim kadar gürültü örneği ile doldurulmuş olur. Bu durumla dalga formu, geciktirme hattına geniş bir spektrum ile

yerleştirilir. Geciktirme hattı tamamlandığında gürültü jeneratörünün(*noise generator*) bağlantısı kesilir ve geciktirme hattının çıkışı alt geçiren filtreyi beslemeye başlar. Buradan sonra sinyal tekrar geciktirme hattının girişine geri döner. Bu durumu akustik anlamda daha iyi anlamak için alt geçiren filtrenin kesme frekansının(*cutoff*), duyulabilir frekans aralığının yukarısında olması gerekir. Dalga formu devir daim ederek bu işlemi devam ettirir. Bu işlemin sonucunda periyodik bir dalga formu haline gelerek kaynak gürültü bile olsa temiz bir tonu olan ses ulaşılabilir. Uygun perde değerlerinin elde edilmesi için gecikme süresi isteğe göre ayarlanabilir. Alt geçiren filtre şekli itibariyle her bir geçişte üst doğuşkanların enerji kaybetmesine sebep olması ile birlikte alt geçiren filtre, pes olan notalara göre daha kısa süreli tiz notalar oluşturur. *David Jaffe* ve *Julius Smith* bu algoritmanın pes ve tiz notalar arasındaki mükemmel bir etki süresi farklılıkları oluşturduğunu bulmuşlardır. *David Jaffe*'nin bilgisayar ile oluşturulmuş telli enstrümanlar için *Silicon Valley Breakdown* adlı kompozisyonu *Karplus-Strong* sentez tekniğinin en iyi örneklerindedir. Şekil 2.56'da pure data yardımı ile *Karplus-Strong* tekniği ile sentezleme örneği gösterilmiştir(Dodge ve Jerse s.277).

**Şekil 2.55: Karplus-Strong Algoritması Sinyal Akışı**



Şekil 2.56: Karplus-Strong Algoritması Pure Data Gösterimi

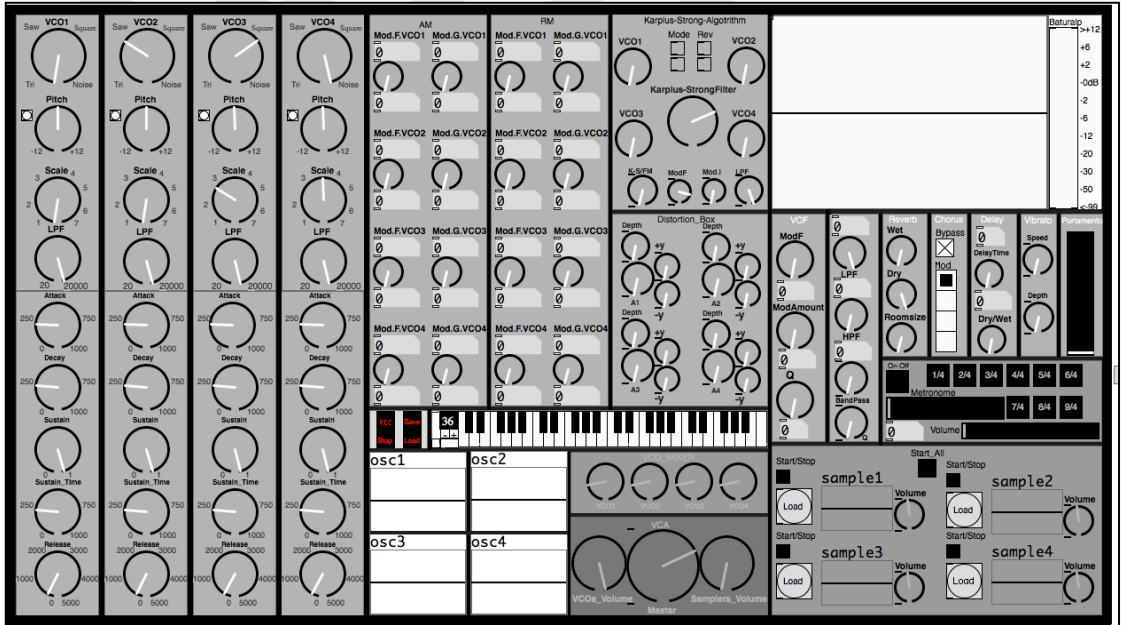


## 3.VERİ VE YÖNTEM

### 3.1 SYNTHESIZER TASARIMI

Ses sentezleyici tasarımı yaygın olarak kullanılan *Pure Data* programı ile oluşturulmuştur. Tasarımın tamamlanmasının ardından günümüzde ses tasarımında ya da elektronik müzik prodüksiyonunda kullanılabilir 10 farklı tipte ses tasarlanmıştır. *Pure Data* ile yapılan ses sentezleyici tasarımı şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Şekil 3.1: Pure Data Yardımı İle Tasarlanan Ses Sentezleyici



#### 3.1.1 Synthesizerin Genel Olarak İncelenmesi Ve Pure Data'da Yazılması

Bu tasarım üç bölüme ayrılmıştır. İlk bölüm osilatör, envelope, sentez yöntemleri ve bazı efektleri barındırmaktadır. İkinci bölüm metronom, üçüncü bölüm ise *sample* bölümüdür. Bu tasarımın çalışırken eş zamanlı kaydetme, kullandığı parametreleri preset olarak kaydedebilme, önceden tasarladığı bir sesin parametre ayarlarını geri yükleyebilme özellikleri bulunmaktadır.

Bu tasarımda, dalga formlarını görüntülemek için yeterli alan tasarlanmıştır. Alt

tarafında bulunan 4 ayrı grafik tablosu bölümüyle kullanıcı, tasarladığı sesleri eklemeli sentezlemeye girmeden önceki son halini görebilmektedir. Sağ üst bölümdeki grafik tablosunda ise ses sentezleyicinin uyguladığı tüm işlemler sonunda elde ettiği monofonik sesin dalga formunu görebilmektedir. Ayrıca bu tasarımın sinyal akışı şekil 3.2’de gösterilmiştir. Tasarımın block diagramı ise şekil 3.3’te gösterilmiştir. Tasarımda her osilatörde üçgen, testere, kare ve beyaz gürültü olmak üzere 4 farklı dalga formu bulunmaktadır. Dalga formunun seçiminin ardından perde, oktav ve alt geçiren filtre parametreleri gelmektedir. Her osilatörün *attack time*, *decay time*, *sustain*, *sustain time*, *release time* olmak üzere 5 parametre’ye sahip zarfları bulunmaktadır.

Ses sentezleyici tasarımının *VCO* bölümünü oluşturmak için her bir osilatör için 4 farklı dalga tipi kodlanmıştır. Şekil 3.4’de üçgen, testere ve kare dalgalarının Pure Data içinde nasıl kodlandığı gösterilmektedir. Beyaz gürültü parametresi ise şekil 3.6’da genel görünümde görüldüğü gibi kolayca oluşturulabilir. Osilatörün perde parametresi, oluşan sesi yarım ses aşağıya ya da yukarıya çekmektedir. Perde parametresinin kodlanması şekil 3.5’te gösterilmiştir. *Scale*(ölçek) bölümünde ise sesin oktavları elde edilebilmektedir. Şekil 3.6’da ise bir osilatörün içerisinde genel görünümü gösterilmektedir.

Zarf bölümünün *pure data* yazılımı ile yazılması şekil 3.7’de gösterilmiştir. Şekillerdeki atak(*attack*) parametresi oluşturulan sesin kaç milisaniye içerisinde maksimum ses seviyesine(1) ulaşacağını belirleyen parametredir. Bozunma zamanı(*decay*) ise, kaç milisaniye içerisinde uzama(*sustain*) seviyesine ineceğini belirleyen parametredir. Uzama süresi ise(*sustain time*) bu seviyede sesin, kaç milisaniye kalacağını ifade eden parametredir. Sönümlenme(*release*) ise ses sinyalinin kaç milisaniyede 0 ses seviyesine düşeceğini belirleyen parametredir.

Sinyal osilatörden çıktıktan sonra genlik modülasyonuna girerek istenildiği ölçüde genlik modülasyonu uygulanabilir. Bu parametrelerin altında ki kutucuklar değerleri göstermek, üstünde bulunan kutucuklar ise istenilen değerleri girmek için bulunmaktadır. Genlik modülasyonunun *pure data* ile yazılımı şekil 3.8’de gösterilmiştir. Burada her bir osilatör için ayrı ayrı modülatör frekansı ve genliği seçmek mümkündür. Modülatör frekansı sınır değerleri 0 ile 10000 Hz arasındadır.



Genlik değerleri ise 0 ile 1 arasındadır. Bu değerleri kullanıcı istediği şekilde değiştirebilir.

Buradan çıkan sinyal ring modülasyonuna ulaşır. Ring modülasyonun *pure data* ile yazılımı Şekil 3.9'de gösterilmiştir. Burada modülatör frekansı sınır değerleri 0 ile 1000 Hz arasındadır. Bu değerleri kullanıcı istediği şekilde yeniden değiştirebilir.

Ardından sinyal *Karplus-Strong* algoritmasına gelir. Burada istenilen alt geçirgen filtre değeri belirlenebilir ve bu gelen sinyal ile istenildiği ölçüde karıştırılabilir. Bu algoritma da dalga kaynağına beyaz gürültü yerine ring modülasyonundan gelen sinyal bağlanmıştır. Burada da yine her osilatör için ayrı ayrı *Karplus-Strong* algoritması karışımı yapılabilir. Alt bölümde yer alan 4 ayrı parametre ise sadece dördüncü osilatöre bağlıdır. Bu parametreler, frekans modülasyonu parametreleridir. Dördüncü osilatör *Karplus-Strong* algoritması ile karıştırılabilir, aynı zamanda karışımın sonucuna da aynı Şekilde frekans modülasyonu eklenebilir. Buradaki parametreler sırasıyla, *Karplus-Strong* Frekans Modülasyonu *crossfade*, frekans modülasyonu için frekans parametresi, aynı Şekilde frekans modülasyonu için genlik parametresi bulunmaktadır. Son parametre ise alt geçirgen filtre parametresidir. Bu karışımın sonunda istenirse bu filtre uygulanabilir. *Karplus-Strong* bölümünün *pure data* ile yazılımı Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Burada ilk osilatörün yazılımı gösterilmektedir. Diğer osilatörler içinde aynı işlem yapılmıştır.

Buradan çıkan sinyal dalga Şekillendirme ile sentezleme bölümüne gelmektedir. Burada yine her osilatör için ayrı ayrı dalga Şekillendirme yapılabilir. A isimli parametre kullanıcının, gelen sinyali kaç ile çarpacağını belirler. Bu değer 0 ile 40 arasındadır. +y ve -y parametreleri ise hangi değerlerde artı ve eksi kutupta kırpmayı yapılacağını gösteren 0 ile 0.9 arasındaki değerlerdir. Bu sayede istenilen Şekilde farklı kutuplarda farklı kırpmalar yapılabilir. Dalga Şekillendirme bölümünün *pure data* ile yazılımı Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Burada ilk osilatörün yazılımı gösterilmektedir. Diğer osilatörler içinde aynı işlem yapılmıştır.

Bu işlemden sonra sinyaller eklemeli sentezleme için *VCO mixer* bölümünde toplanır. 4 ayrı osilatörden gelen sinyal burada istenildiği gibi mixlenebilir. Bu bölümünün *pure data* ile yazılımı Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Dört sinyal eklemeli sentez sonrasında filtreler ve ardından efektler bölümüne geçer. Burada vcf, lpf, hpf, bpf ve sonrasında

sırasıyla reverb, chorus, delay, portamento şeklinde takip ederek *VCO's Volume* bölümüne gelir. Bu bölüm ise Master Volume parametresine ulaşır..

Filtreler bölümüne gelindiğinde ilk olarak voltaj kontrollü filtre görülmektedir. Bu filtrenin özelliği merkez frekans girişi ses sinyali tipinde bir giriştir. Burada bulunan parametreler, modülatör osilatörün filtreleridir. Modulatör osilatör ile merkez frekansı toplanarak bu filtrenin frekans girişine bağlanmıştır. Frekans modülasyonu ile çok benzer bir çalışma mantığına sahiptir. Bu filtrenin ardından sırasıyla alt geçiren filtre, üst geçiren filtre ve band geçiren filtreler gelmektedir. Filtrelerin pure data ile yazılımı şekil 3.13'te gösterilmiştir.

Sinyal filtrelerden sora efekt bölümüne ulaşır. *Reverb*, *Chorus* ve *Delay* gibi efektlerin pure data ile yazılımı şekil 3.14'de gösterilmiştir. *Chorus* bölümünde 4 farklı mod bulunmaktadır. *Vibrato* ve *Portamento*'nun ise pure data ile yazılımı şekil 3.15'te gösterilmiştir.

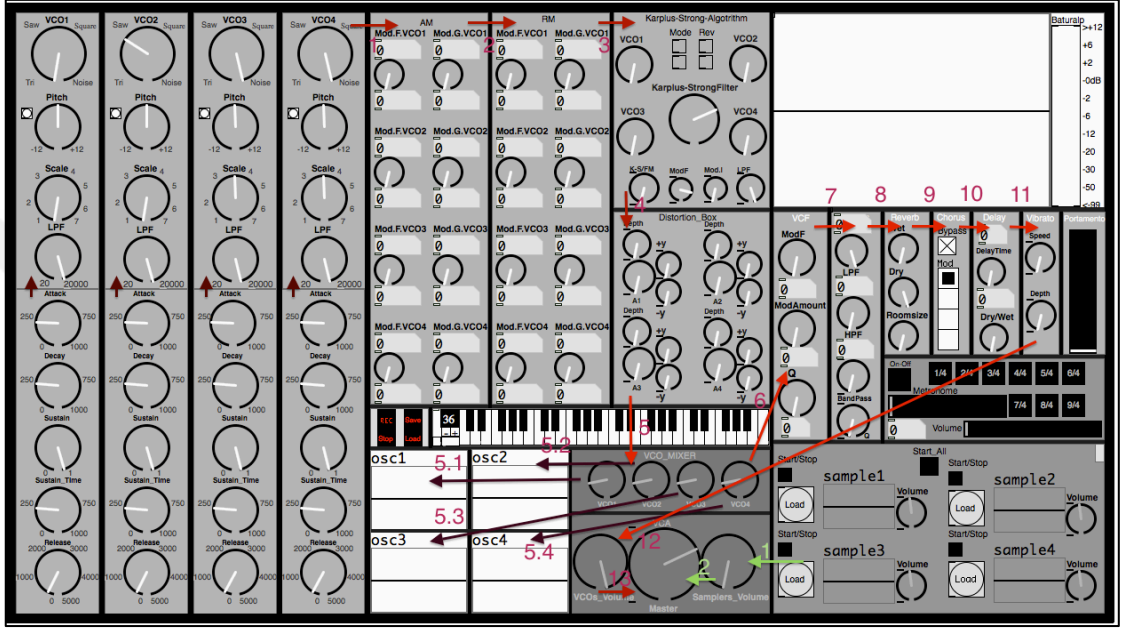
Tasarımda ikinci bölüm olan metronom ile 1/4, 2/4, 3/4, 4/4, 5/4, 6/4, 7/4, 8/4 ve 9/4'lük metronomlar istenilen bpm'de çalınabilir. Bu bölümün volume kontrolü kendi üzerindedir. Bu bölümün pure data ile yazılımı şekil 3.16'te gösterilmiştir.

Tasarımın üçüncü bölümü olan *Sample* bölümünde ise kullanıcının ayrı ayrı 4 kanal yükleyip üzerine istediği tonda çalması sağlanmıştır. Örneğin, vurmali, yaylılar, klavye ve vocal'i kaydedilmiş olan bir parçanın, bu sample bölümü sayesinde hepsini dinlerken üzerine tasarladığı sesi, üzerine çalıp ses sentezleyici üzerindeki kayıt tuşu ile kaydedebilmektedir. Kullanıcının kaydettiği ses, tasarımın uygulamasının bulunduğu klasöre deneme.wav ismi ile kaydedilmektedir. Start all butonu 4 ses dosyasını aynı anda çalma özelliğini sağlamaktadır. Bu bölümün pure data ile yazılımı şekil 3.17'te gösterilmiştir. *Sample* bölümünün çıkışı *Samples Volume* parametresine bağlı olup, bu parametre de Master Volume kısmına bağlanmıştır. Bu sayede master volume ile her iki bölümde control edilebilmektedir.

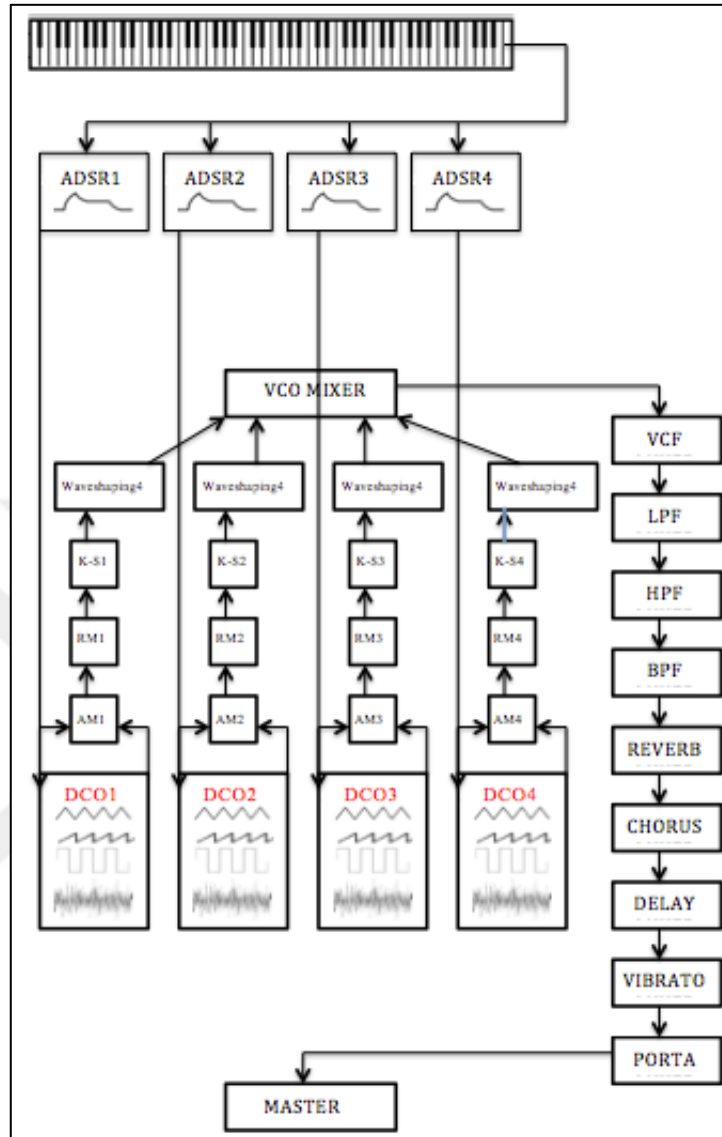
Tüm bu tasarıma ait parametreler *Open Sound Control* protokolü aracılığıyla, mobil telefonlardan, tabletlerden kontrol edilebilmektedir. Kontrol sağlamak için sadece aynı ağa bağlanmak ve tasarımın bulunduğu bilgisayar IP'sinin uygulamaya girilmesi yeterlidir. Bu tasarımın kontrol arayüzü *TouchOSC* programı ile oluşturulmuştur. Bu arayüzün hazırlanması şekil 3.18'te gösterilmiştir. Bu programdan gelen kodları tasarıma entegre etmek için yazılan kod 3.19'da gösterilmiştir. Bu kodlama sayesinde

gelen bilgilerin istenilen parametrelere atanması sağlanmıştır. *TouchOSC* uygulamasının da tasarlanan her sayfanın parametreleri ayrı ayrı ses sentezleyicisine tanıtılmıştır. *TouchOSC* uygulamasında bu tasarım için oluşturulan sayfalar 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26 ve 3.27'te gösterilmiştir.

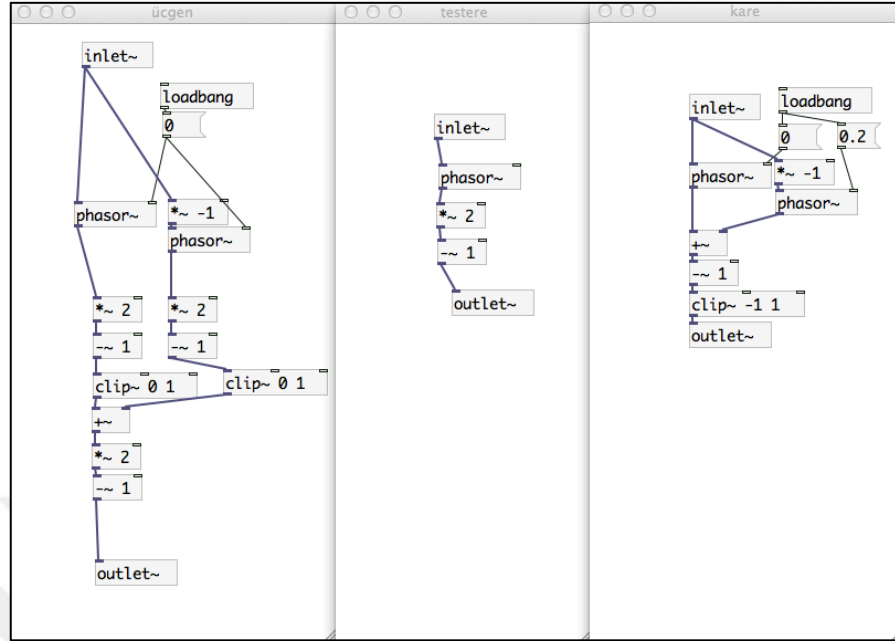
**Şekil 3.2: Tasarlanan Ses Sentezleyicinin Sinyal Akışı**



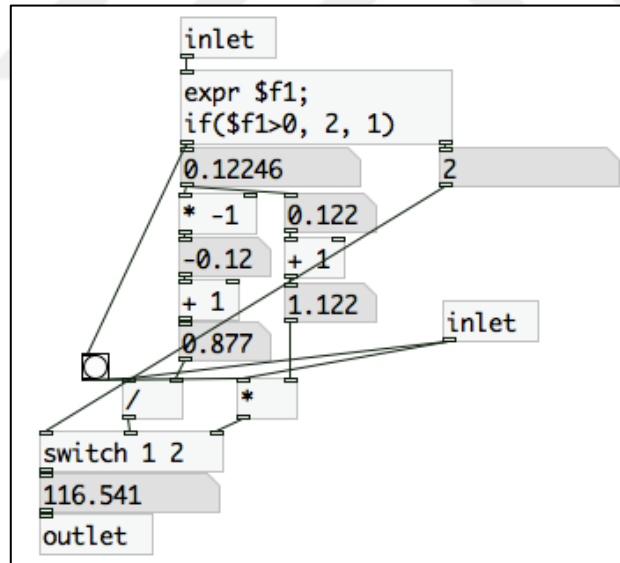
Şekil 3.3: Tasarlanan Ses Sentezleyicinin Block Diagramı



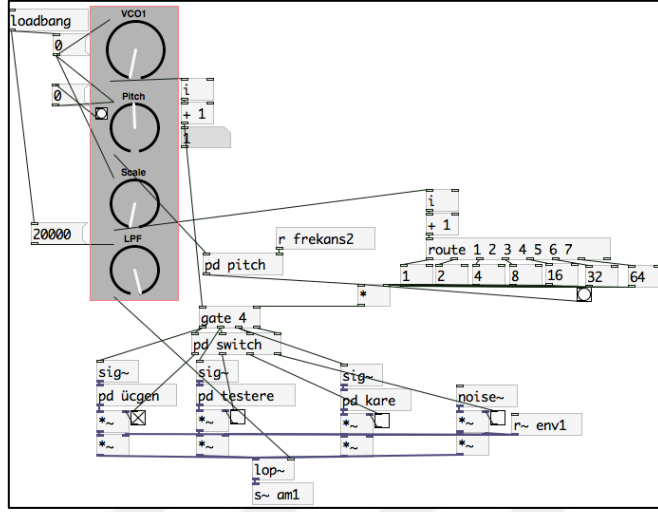
Şekil 3.4: Dalga Tiplerinin Pure Data'da Yazılması



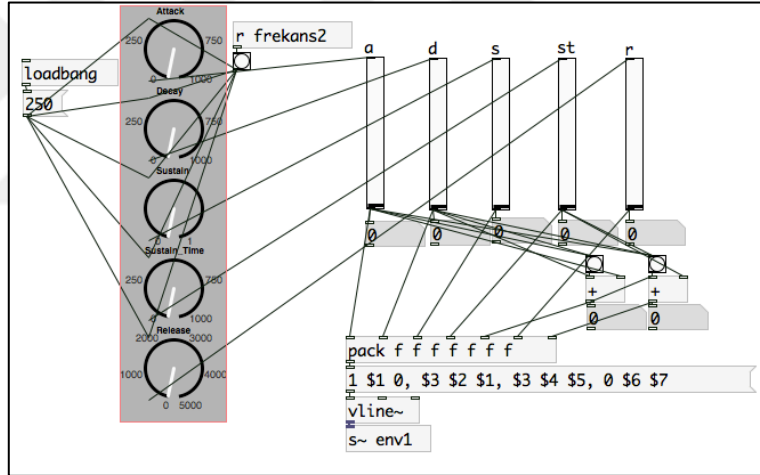
Şekil 3.5: Perde Bölümünün Pure Data'da yazılması



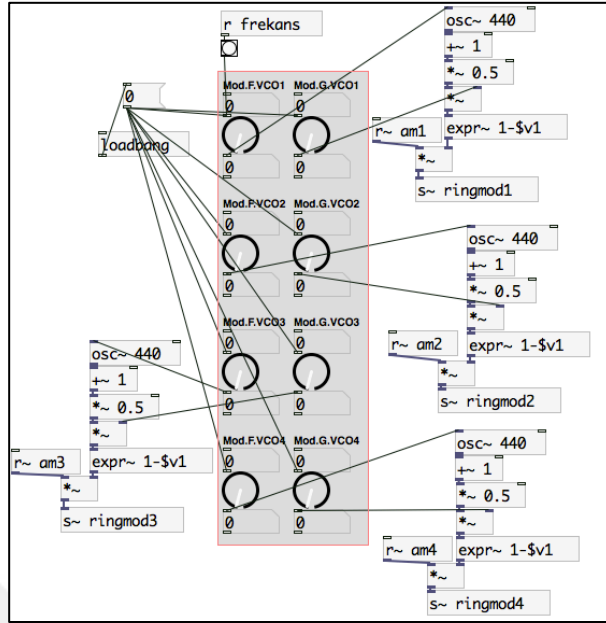
Şekil 3.6: Osilatör Genel Görünümü



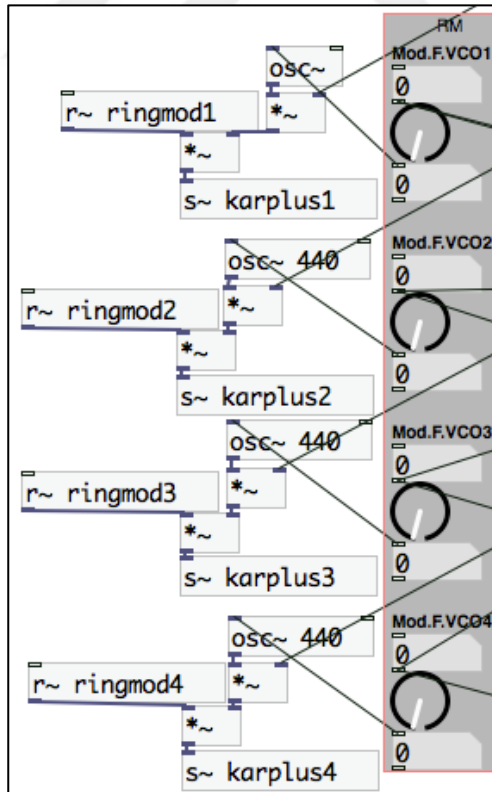
Şekil 3.7: Zarf Bölümünün Pure Data'da Yazılması



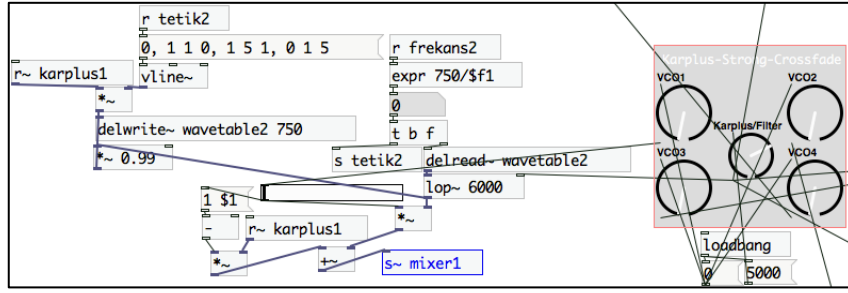
Şekil 3.8: Genlik Modülasyonu Bölümünün Pure Data'da Yazılması



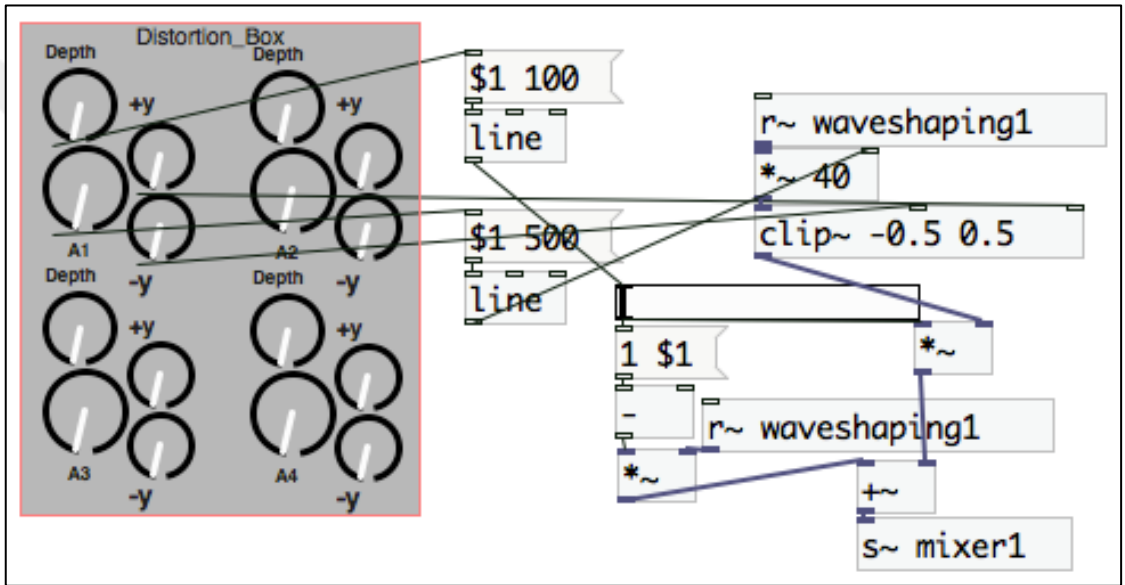
Şekil 3.9: Ring Modülasyonu Bölümünün Pure Data'da Yazılması



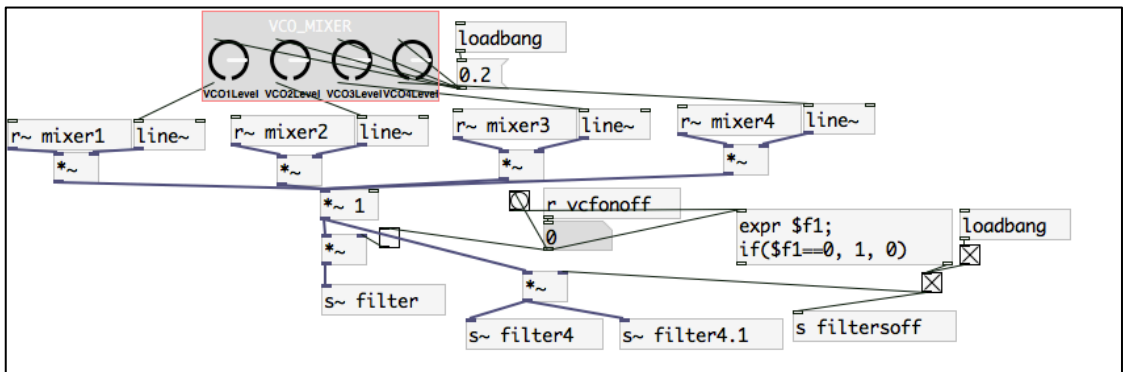
Şekil 3.10: Karplus-Strong Bölümünün Pure Data'da Yazılması



Şekil 3.11: Dalga Şekillendirme Bölümünün Pure Data'da Yazılması

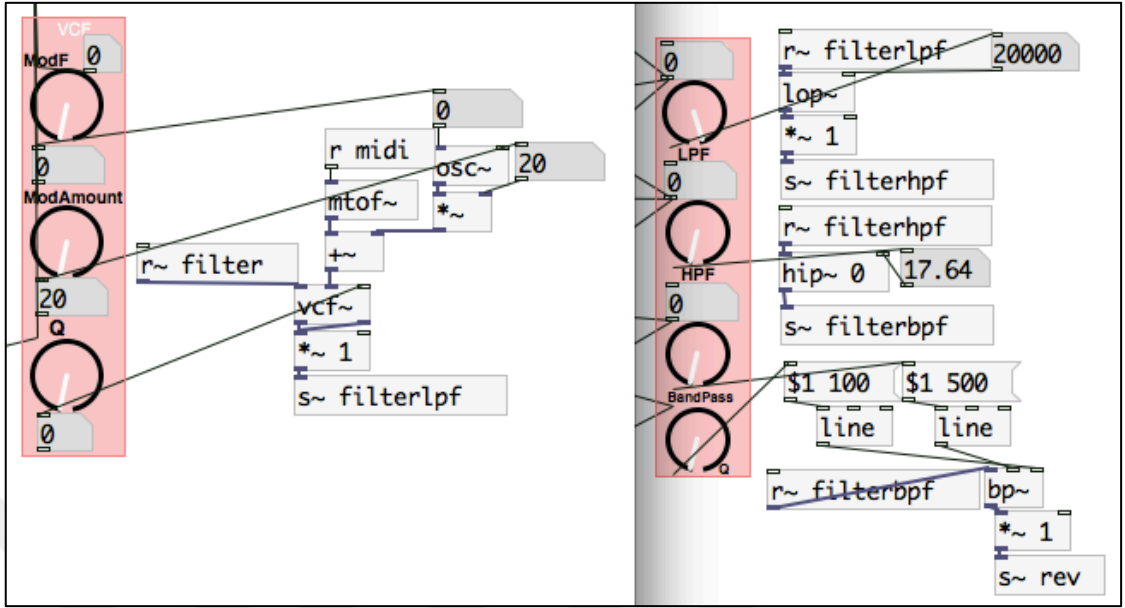


Şekil 3.12: Vco Mixer Bölümünün Pure Data'da Yazılması

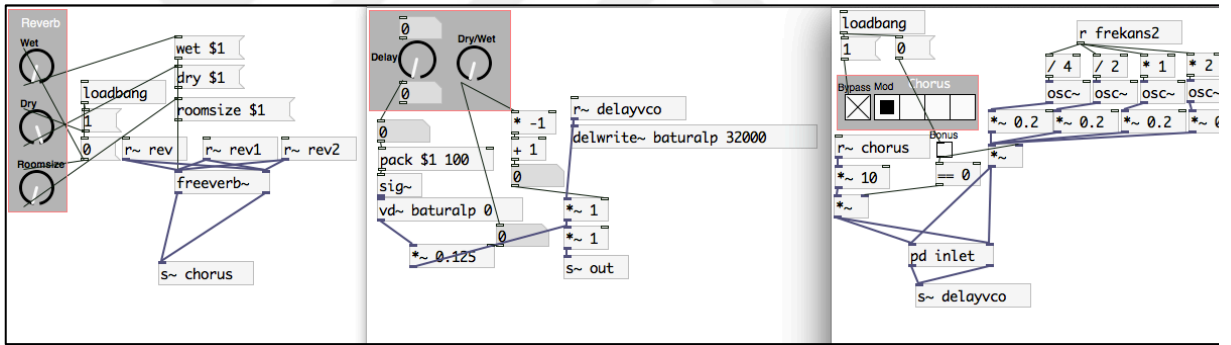




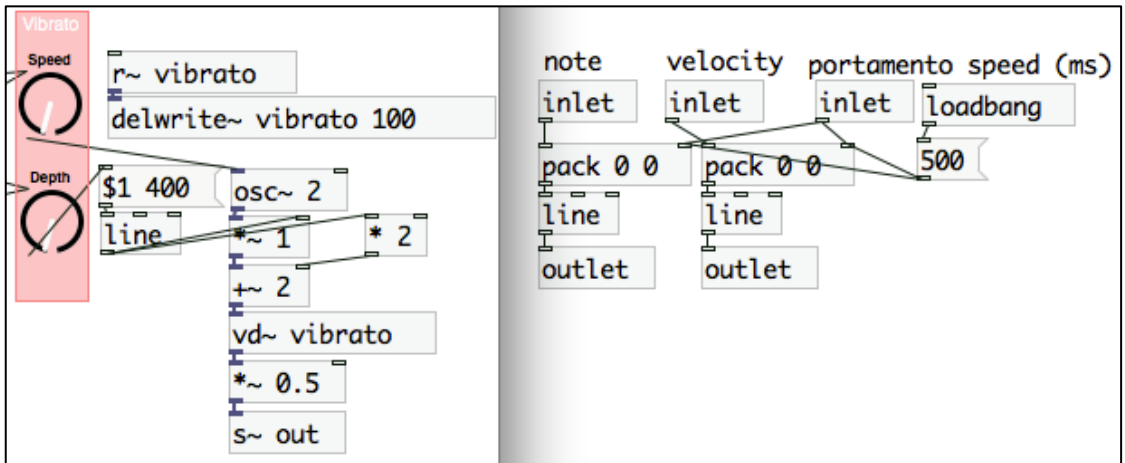
Şekil 3.13: Filtreler Bölümünün Pure Data'da Yazılması



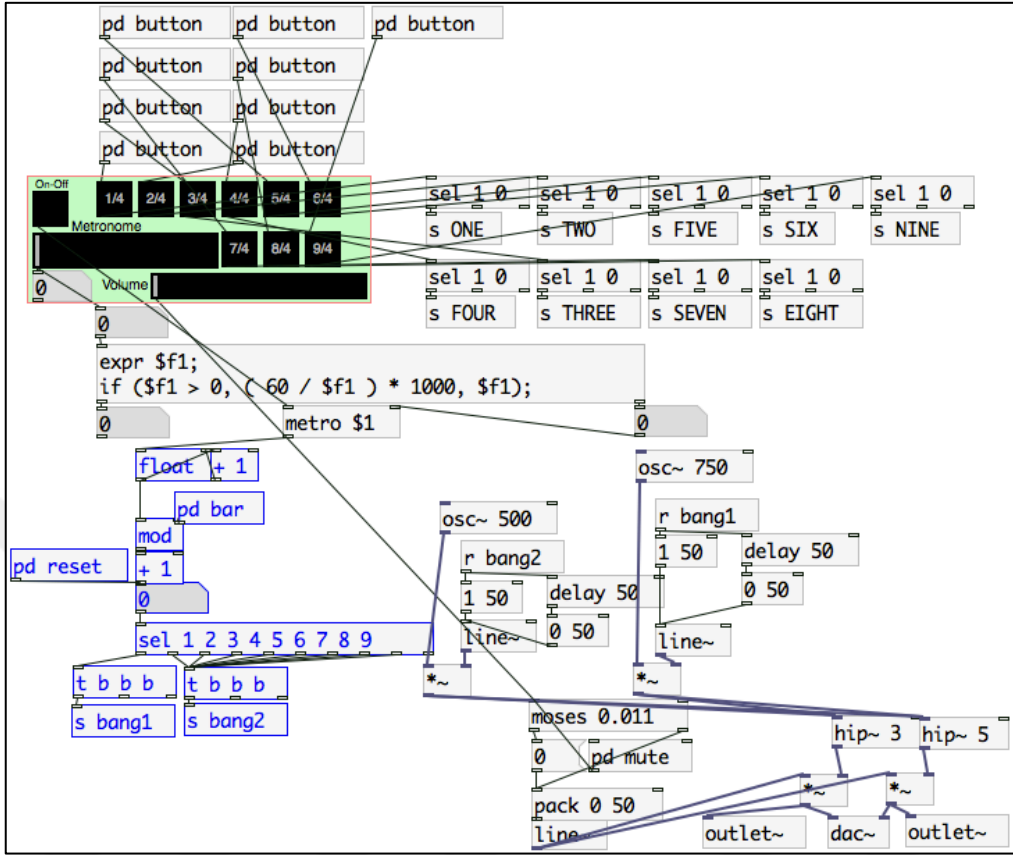
Şekil 3.14: Reverb, Delay ve Chorus Bölümünün Pure Data'da Yazılması



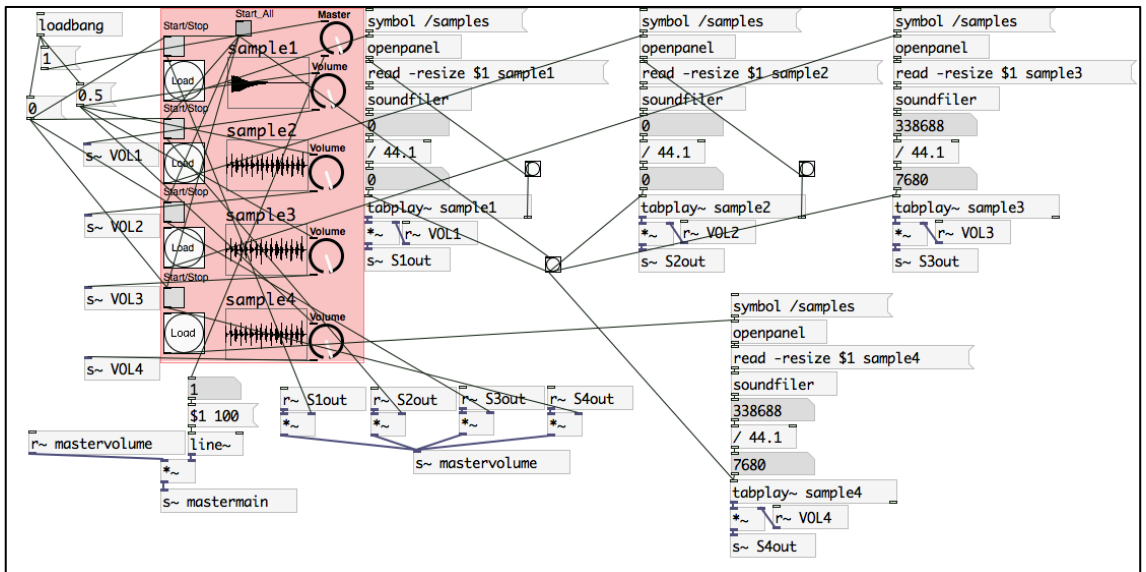
Şekil 3.15: Vibrato ve Portamento Bölümünün Pure Data'da yazılması



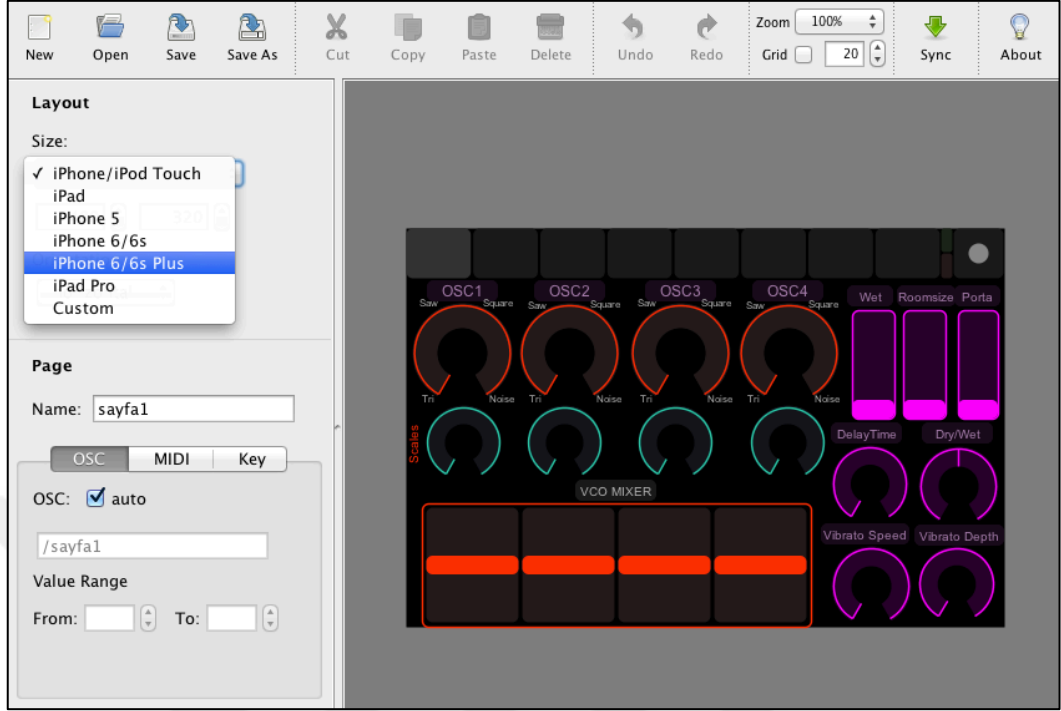
Şekil 3.16: Metronome Bölümünün Pure Data'da Yazılması



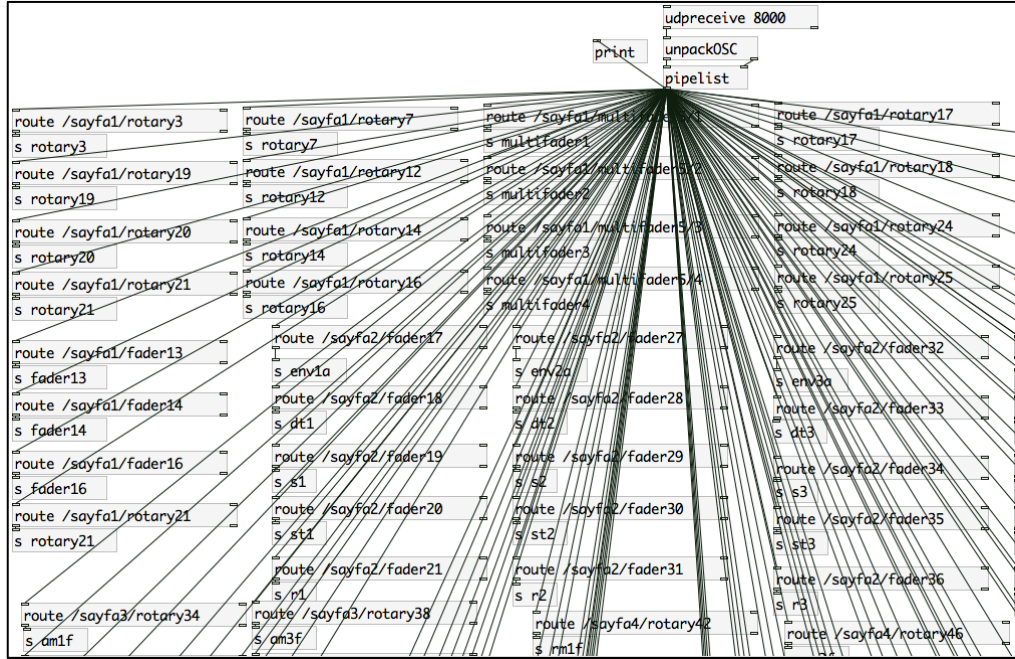
Şekil 3.17: Sample Bölümünün Pure Data'da Yazılması



Şekil 3.18: TouchOSC Programı İle Kontrol Arayüzünün Hazırlanması



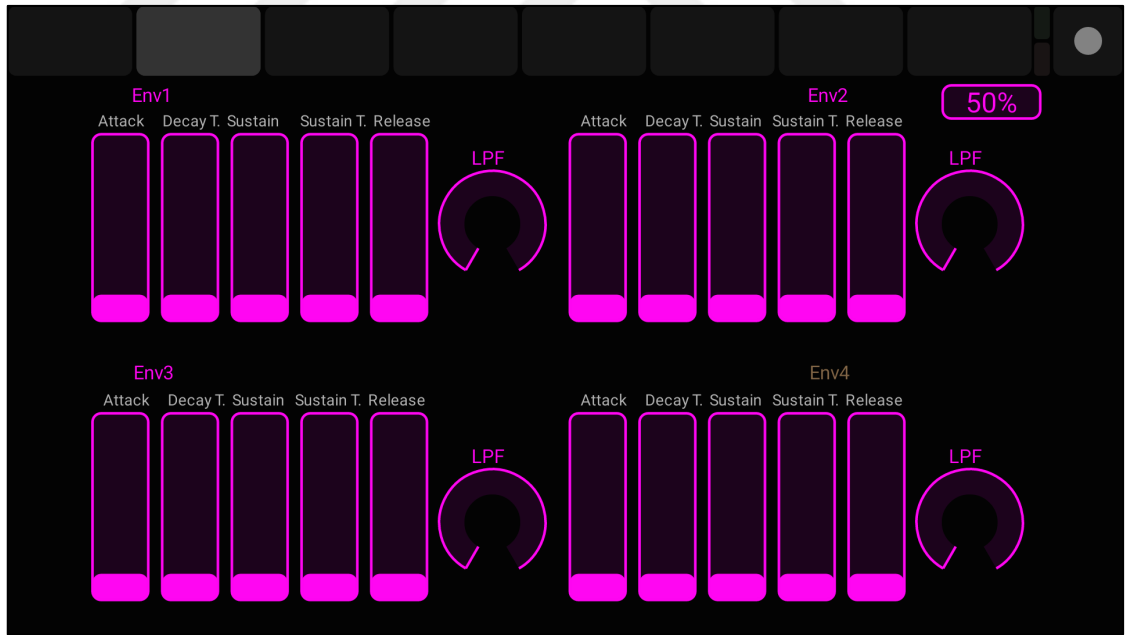
Şekil 3.19: TouchOSC Programından Gelen Kodların Tasarıma Entegre Edilmesi



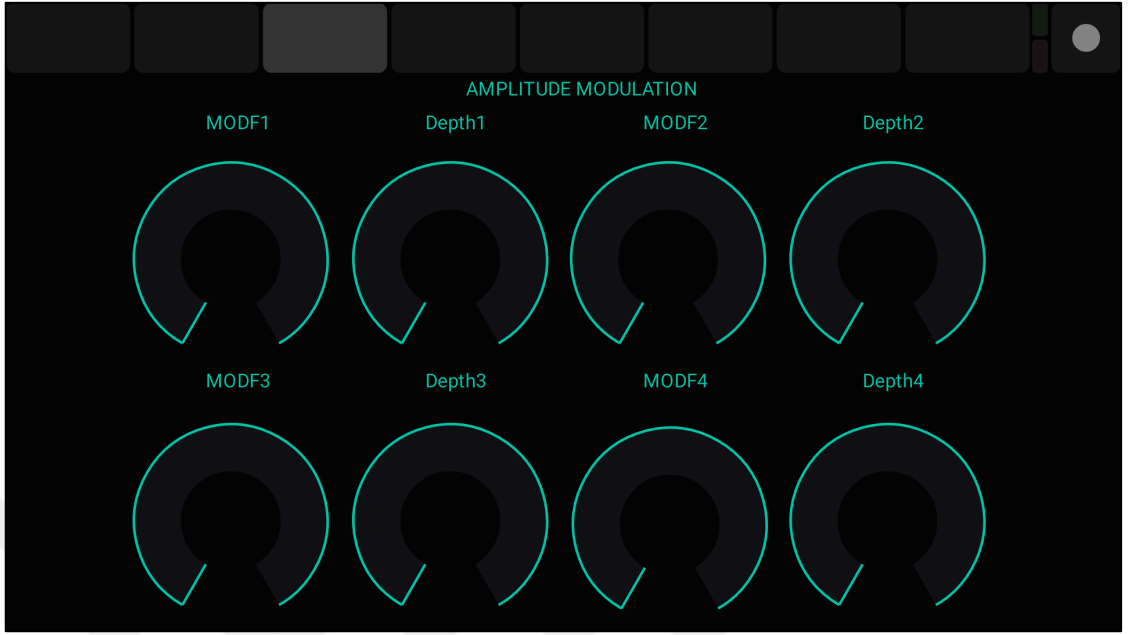
Şekil 3.20: TouchOSC Uygulamasında Tasarlanan Sayfa1



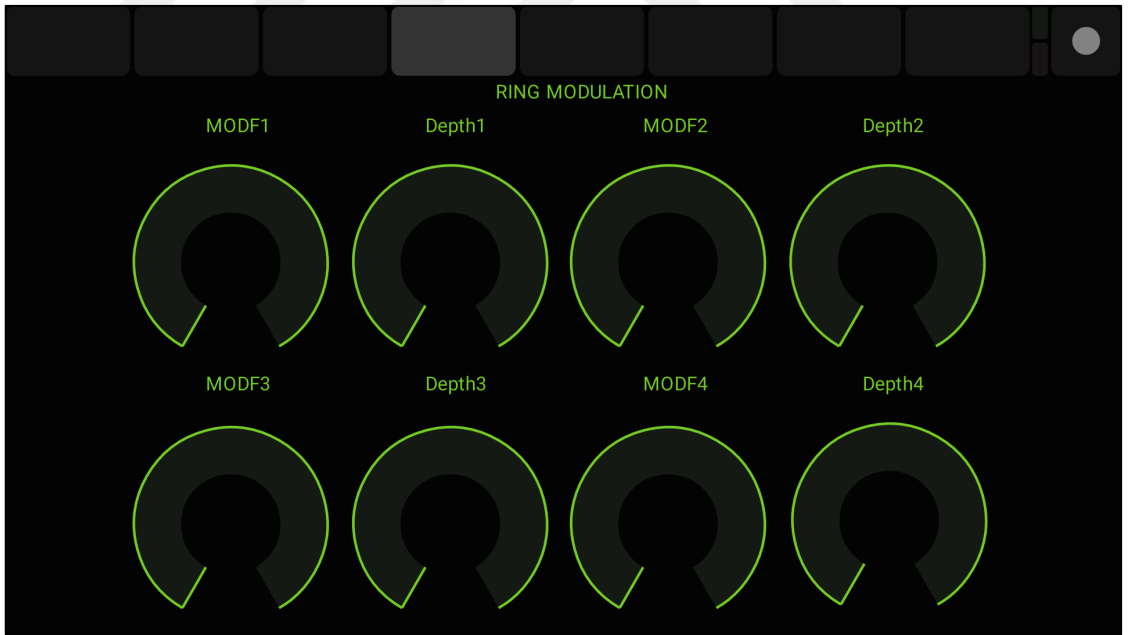
Şekil 3.21: TouchOSC Uygulamasında Tasarlanan Sayfa2



Şekil 3.22: TouchOSC Uygulamasında Tasarlanan Sayfa3



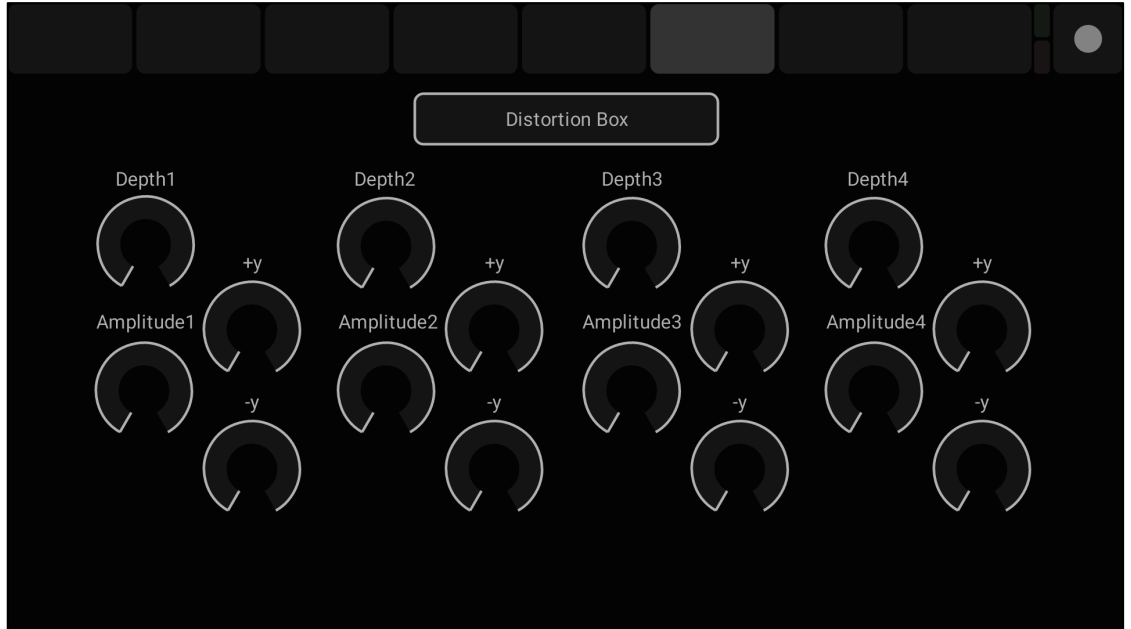
Şekil 3.23: TouchOSC Uygulamasında Tasarlanan Sayfa4



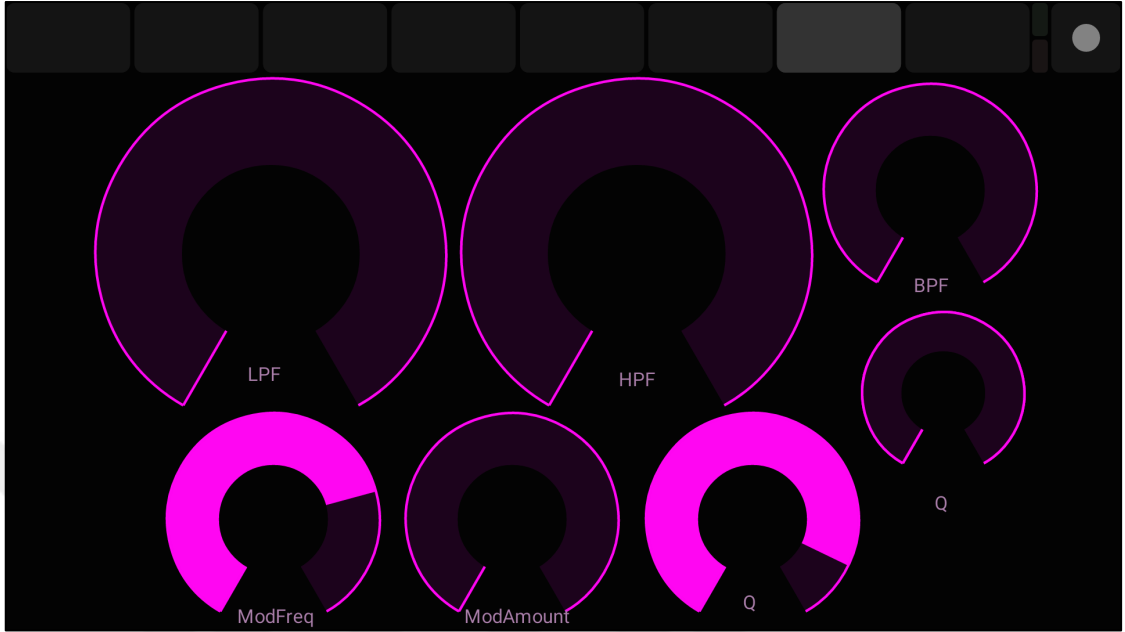
Şekil 3.24: TouchOSC Uygulamasında Tasarlanan Sayfa5



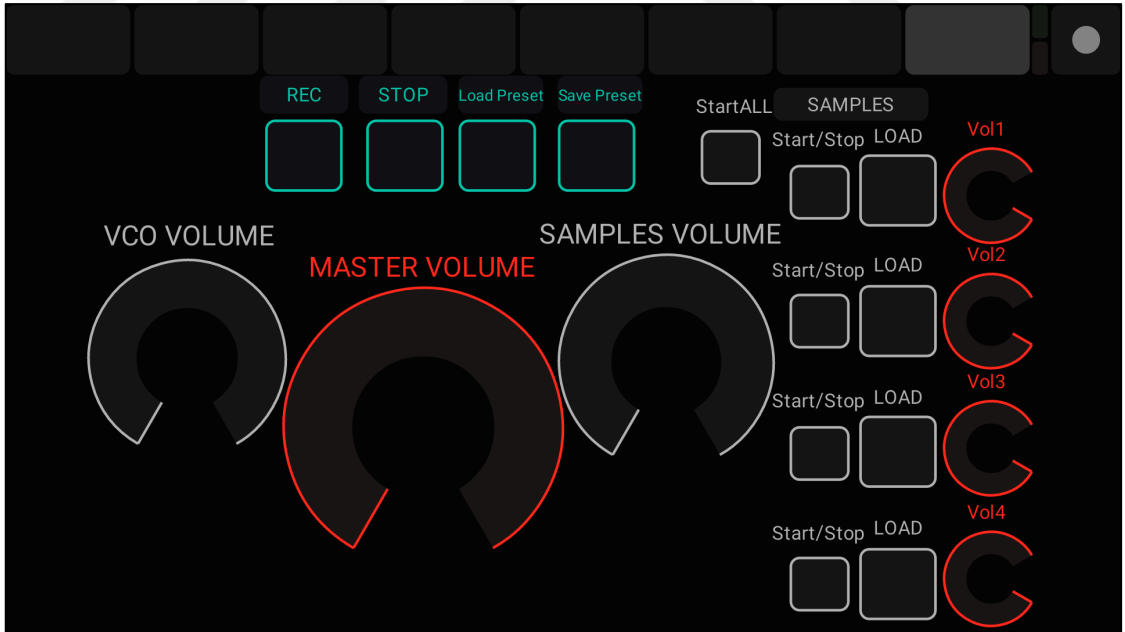
Şekil 3.25: TouchOSC Uygulamasında Tasarlanan Sayfa6



Şekil 3.26: TouchOSC Uygulamasında Tasarlanan Sayfa7



Şekil 3.27: TouchOSC Uygulamasında Tasarlanan Sayfa8



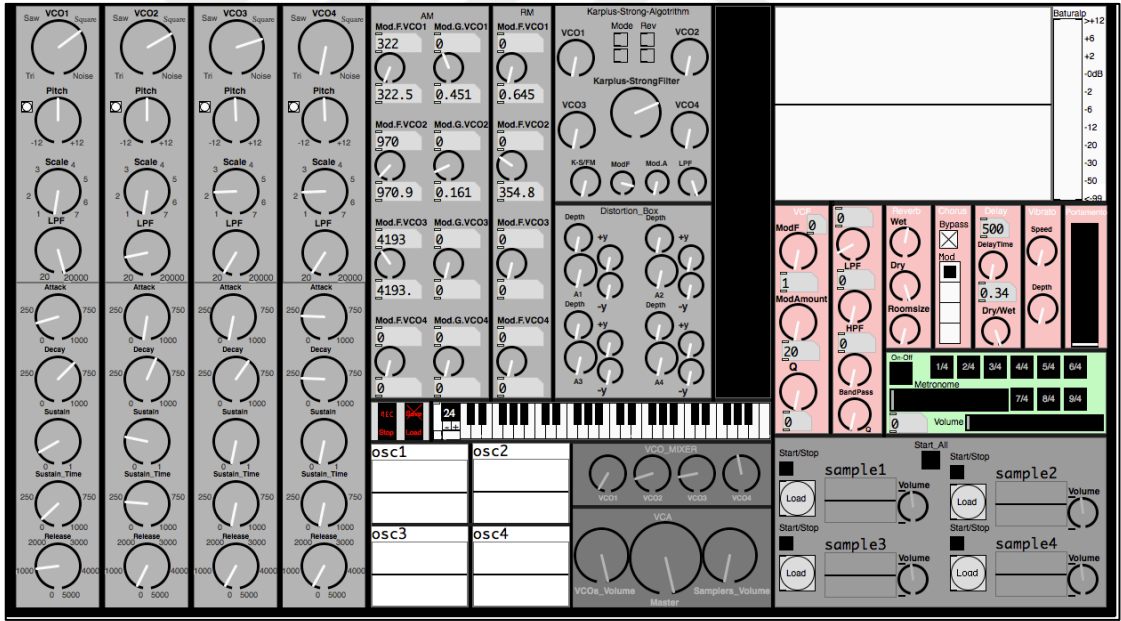
## 4.BULGULAR

Tasarlanan bu ses sentezleyici ile 10 farklı ses tasarlanmıştır. Tasarlanan sesler ses tasarımında ve müzik prodüksiyonunda kullanılabilir seviyededir. Bu sesler tasarlanan ses sentezleyiciye bir midi klavye bağlanarak bir melodi kaydedilmiştir. Tüm tasarlanan sesler *preset* olarak kaydedilip kullanıcıya sunulmuştur.

### 4.1 Ses 1 - Lead Synth

İlk tasarlanan ses için kullanılan parametreler şekil 4.1'de gösterilmiştir. Bu sesin tasarımında 4 osilatör de farklı değerler ve modülasyonlarla kullanılmıştır. Modülasyon olarak genlik ve *Ring* modülasyonu birlikte kullanılmıştır. Efekt bölümünde ise *reverb* ve *delay* kullanılmıştır.

Şekil 4.1: Ses 1 İçin Pure Data'da Parametre Kullanımı

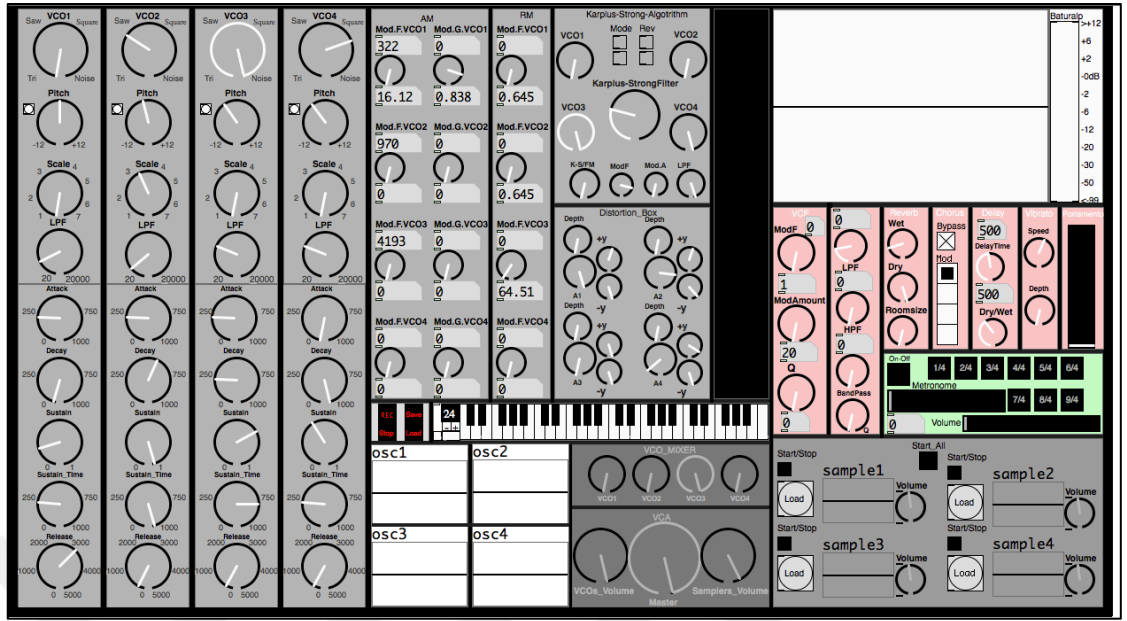


### 4.2 Ses 2 - Marimba

İkinci tasarlanan ses'te tek bir osilatör kullanarak *Marimba* enstrümanına yaklaşık bir ses elde edilmiştir. Bu ses için *Karpus-Strong* algoritması kullanılmıştır. Efekt bölümünde ise *reverb* ve *delay* kullanılmıştır. Bu sesin tasarımı için ayarlanan parametreler şekil 4.3'te gösterilmiştir.

Şekil 4.2: Ses 2 İçin Pure Data'da Parametre Kullanımı

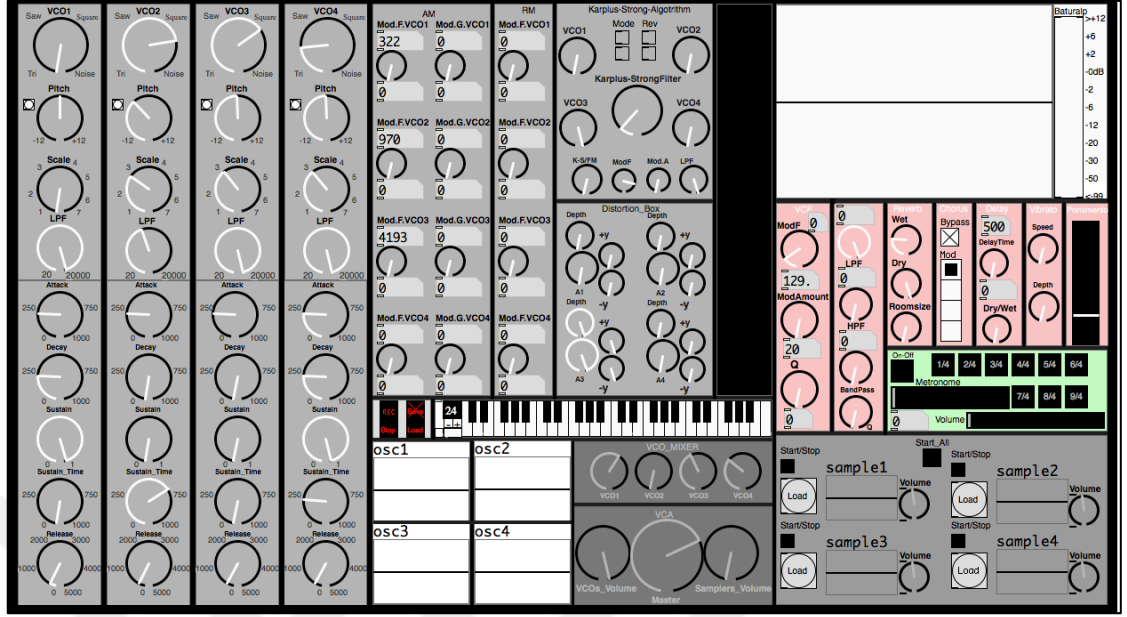




### 4.3 Ses 3 - Hard Guitar

Üçüncü tasarlanan ses'te gitar tonuna yakın bir ses elde edilmiştir. Bu sesin oluşumunda üç osilatör ile *Karplus-Strong* algoritması ve dalga şekillendirme kullanılmıştır. Efekt olarak *reverb* ve *portamento* kullanılmıştır.. Bu sesin tasarımınında ayarlanan parametreler şekil 4.4'te gösterilmiştir.

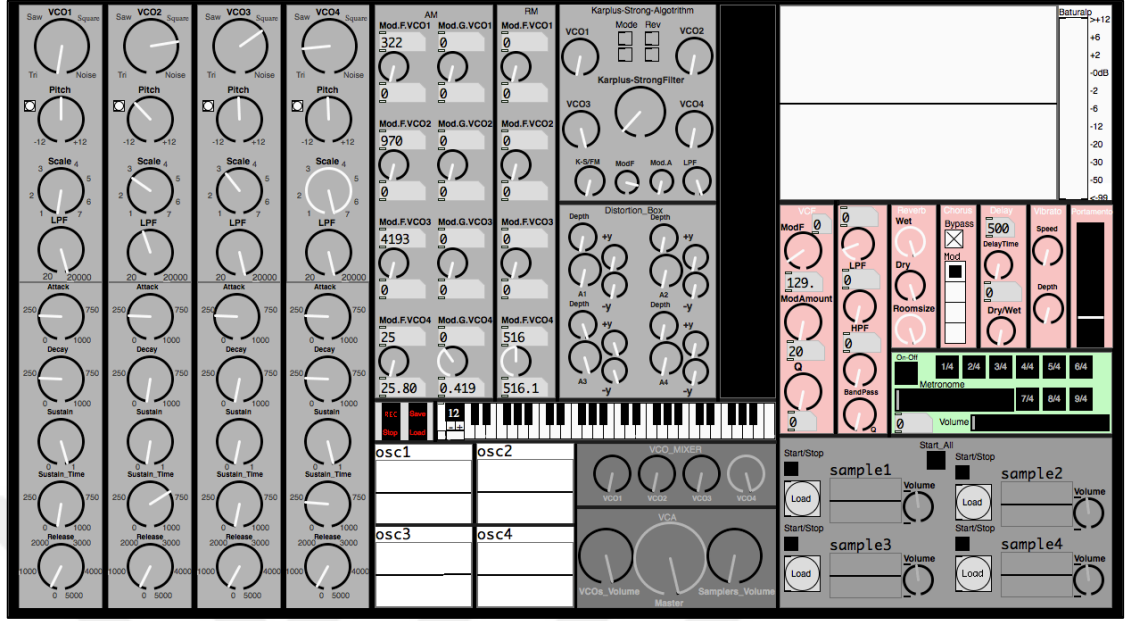
Şekil 4.3: Ses 3 İçin Pure Data'da Parametre Kullanımı



#### 4.4 Ses 4 - SFX1

Dördüncü tasarlanan ses'te ses tasarımında kullanılabilecek bir efekt tasarlanmıştır. Bu sesin tasarımın tek bir osilatör ve efekt olarak reverb kullanışmıştır. Modülasyon olarak da *ring* modülasyonu kullanılmıştır. Bu sesin tasarımında ayarlanan parametreler şekil 4.5'te gösterilmiştir.

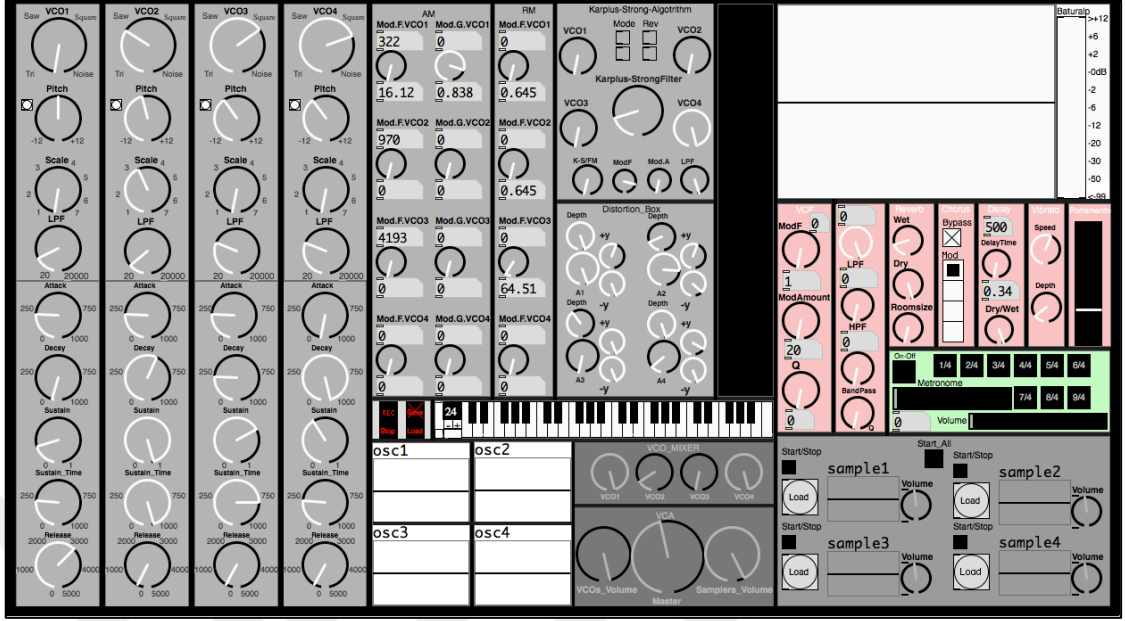
Şekil 4.4: Ses 4 İçin Pure Data'da Parametre Kullanımı



#### 4.5 Ses 5 - Dark Synth

Beşinci sesin tasarımının daha çok elektronik müzikte kullanılabilen bir lead ses tasarlanmıştır. Üç osilatör kullanılıp, tüm ses sentezleme yöntemleri kullanılmıştır. Etki olarak *reverb*, *vibrato* ve *portamento* kullanılmıştır.

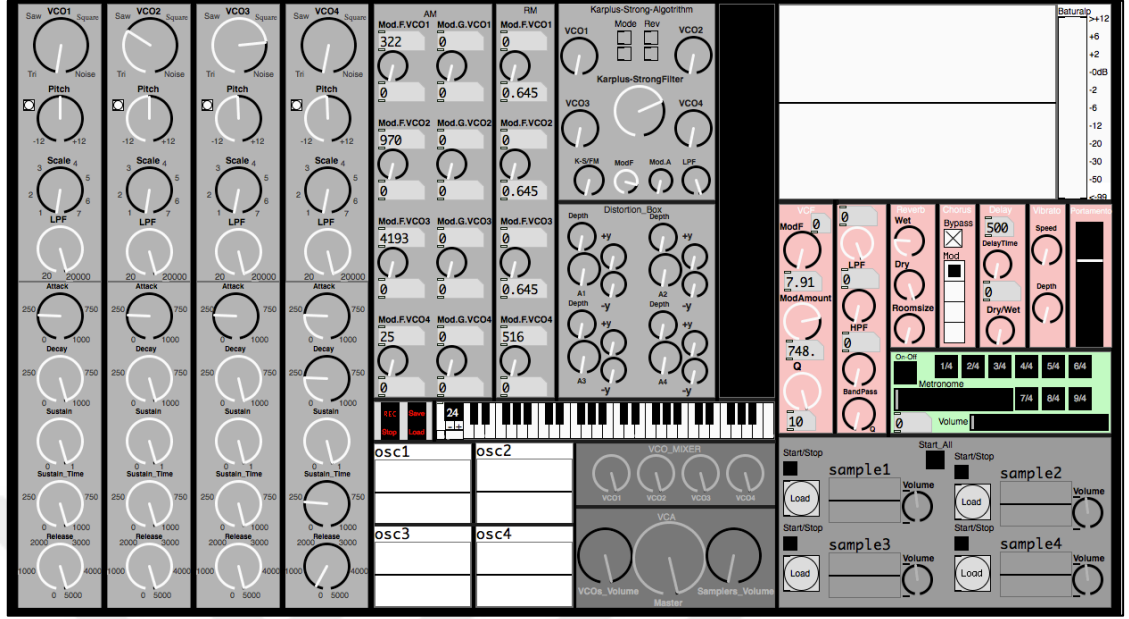
Şekil 4.5: Ses 5 İçin Pure Data'da Parametre Kullanımı



#### 4.6.Ses 6 - Wobble Synth

Altıncı tasarlanan seste, 4 osilatör farklı dalga formlarında kullanılmıştır. Genlik ya da ring modülasyonunu kullanılmamıştır. Voltaj kontrollü filtre kullanılarak farklı bir ses elde edilmiştir. Bu ses için ayarlanan parametreler şekil 4.6' da gösterilmiştir.

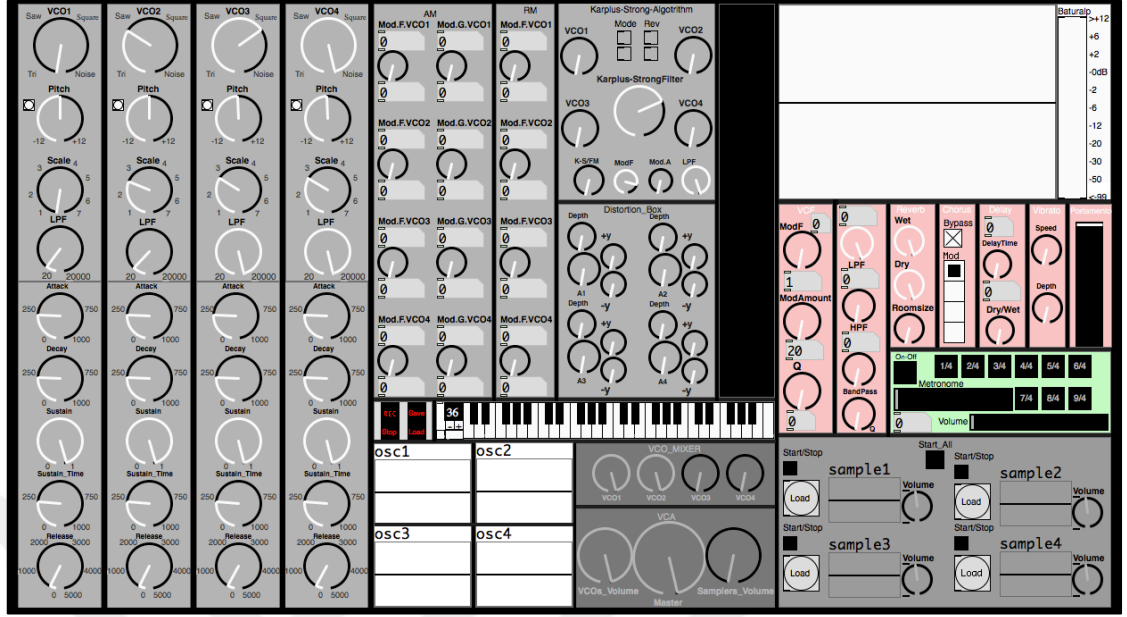
Şekil 4.6: Ses 6 İçin Pure Data'da Parametre Kullanımı



#### 4.7 Ses 7 - Lead Synth

Yedinci sesin tasarımında iki osilatör kullanılmıştır. Efekt bölümünde ise *reverb* ve *portamento* kullanılmıştır. Daha çok müzik prodüksiyonunda kullanılacak bir ses tasarlanmıştır. Bu ses için ayarlanan parametreler şekil 4.7'de gösterilmiştir.

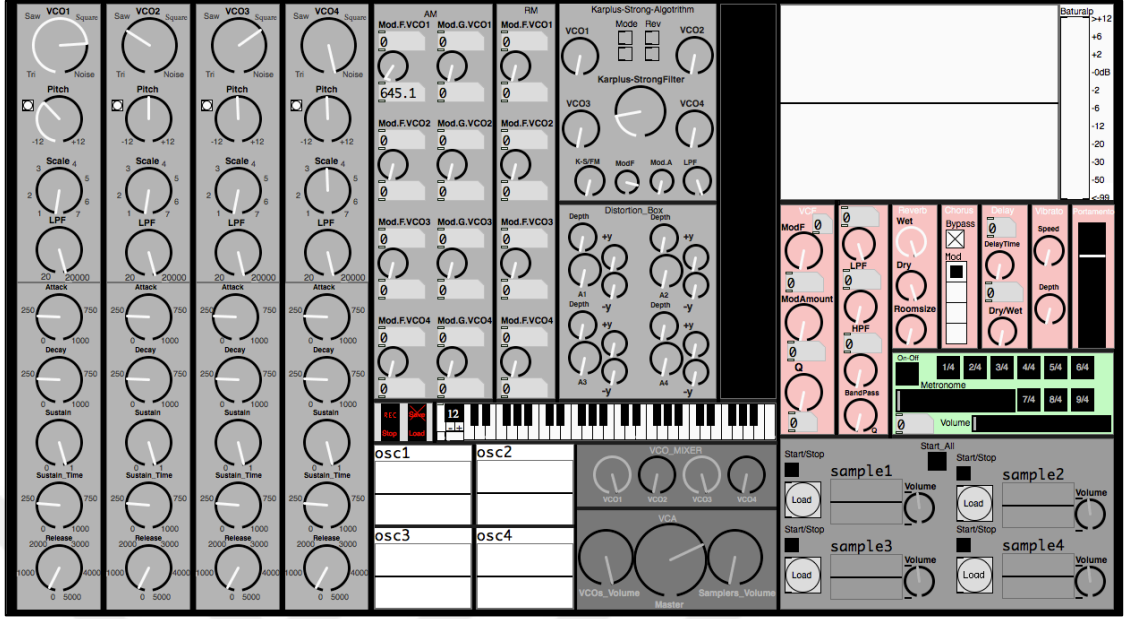
Şekil 4.7: Ses 7 İçin Pure Data'da Parametre Kullanımı



#### 4.8 Ses 8 - Lead Synth 2

Bu sesin tasarımında iki osilatör kullanılmıştır. İki osilatörden birinin perdesi diğerinden farklı olarak tasarlanmıştır. Efekt olarak sadece reverb ve portamento kullanılmıştır. Bu sesin tasarımında kullanılan parametre ayarları şekil 4.9'da gösterilmiştir.

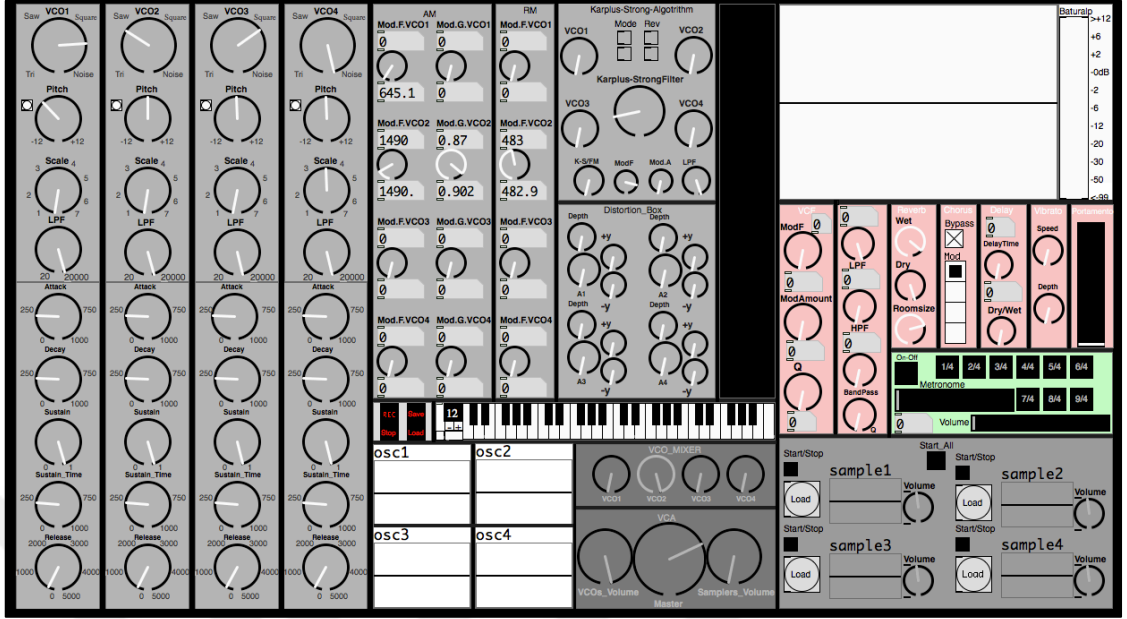
Şekil 4.8: Ses 8 İçin Pure Data'da Parametre Kullanımı



#### 4.9 Ses 9 - SFX 2

Dokuzuncu sesin tasarımında ses tasarımcıları için hem ses efekti hem de prodüksiyon amacıyla kullanılabilir bir ses tasarlanmıştır. Bu tasarım için tek osilatör ve efekt olarak reverb kullanılmıştır. Sentezleme yöntemlerinden genlik modülasyonu ve ring modülasyonu bir arada kullanılmıştır. Bu sesin tasarımında kullanılan parametre ayarları şekil 4.10'da gösterilmiştir.

Şekil 4.9: Ses 9 İçin Pure Data'da Parametre Kullanımı

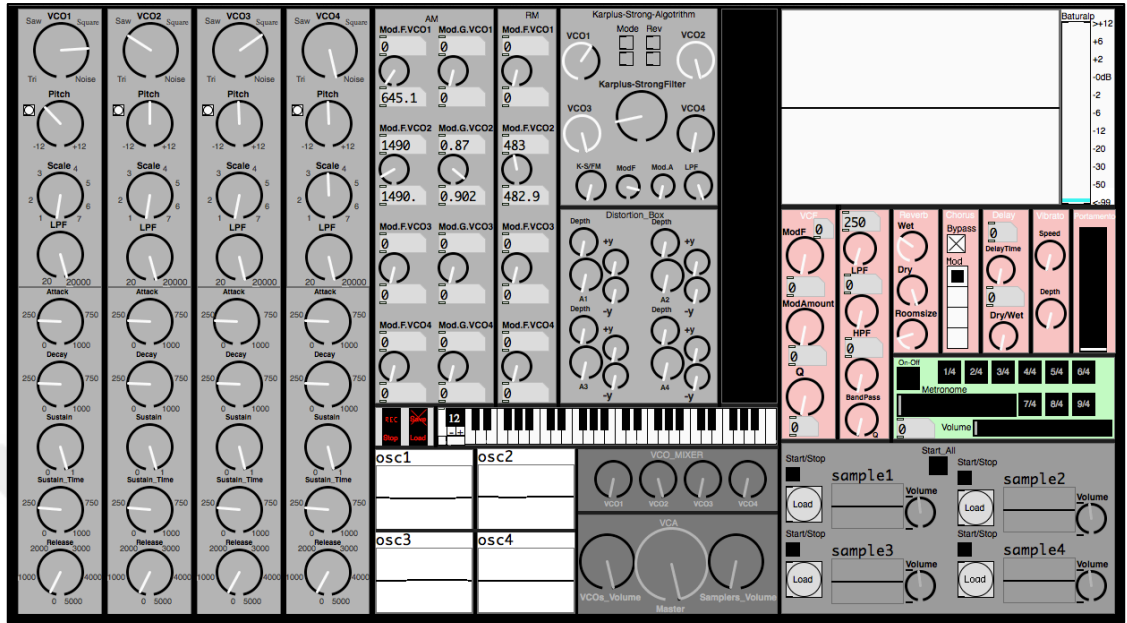


#### 4.10 Ses 10 - Bass Guitar

Tasarlanan son ses bass gitar tonuna yakın bir sound elde edilmiştir. Bu ses için *Karpus-Strong* algoritması kullanılmıştır. Aynı zamanda efekt olarak da reverb kullanılmıştır. Bu sesin tasarımında kullanılan parametre ayarları şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10: Ses 10 İçin Pure Data'da Parametre Kullanımı



## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tasarımla kullanıcılara farklı bir alternatif sunulması amaçlanmıştır. Tasarlanan bu ses sentezleyici oldukça basit ve kolay anlaşılabilirliği sayesinde tüm seviyedeki kullanıcılar tarafından rahatlıkla kullanılabilir. Bir midi klavye, tablet veya uyumlu mobil telefonlar aracılığıyla canlı performans sergilenebilir. Bu tasarım, eklemeli sentezleme, eksiltmeli sentezleme, genlik modülasyonu, *ring* modülasyonu, *Karplus-Strong* algoritması ve dalga şekillendirme gibi çok önemli ses sentezleme yöntemleri barındırmaktadır. Bu sayede ses mühendisliği öğrencilerinin ses sentezleme yöntemlerini daha iyi anlamaları için gerekli derslerde uygulamalı olarak zaman kaybettirmeden kullanılabilir. Tasarımda metronom bulunması kullanıcının istediği tempoda çalabilmesini sağlamıştır. Aynı şekilde *sample* bölümünde, kullanıcının dört ayrı wav formatındaki ses dosyalarını dinleyerek, tasarladığı sesi çalabilmesi sağlanmıştır. Tasarlanan sesin eş zamanlı kaydedilebilmesi, kullanıcı için çok büyük avantaj sağlamaktadır. Aynı şekilde tasarlanan her sesin ayarlanmış olarak kaydedilebilmesi ve eski tasarlanan seslerin tasarıma geri yüklenebilmesi özelliği bu tasarımın profesyonel anlamda kullanılabileceğini göstermektedir. Bu ses sentezleyici ile 10 farklı ses tasarlanmıştır. Bu sesler, ses tasarımcıların ve müzisyenlerin kullanabileceği kalitededir. Bu tasarımın diğer tasarımlardan en büyük farkı *Karplus-Strong* algoritması ile gelen sinyalin istediği şekilde karıştırabilmesidir. Kullandığı yöntem ve sinyal akışı sayesinde farklı sesler elde edilip, profesyonel amaçlar için kullanılabilir. Tasarımda kullanılan *Karplus-Strong* algoritmasının en büyük müzikal avantajlarından biri olan gitar ve vurmali seslerinin kolayca elde edilebilmesi kullanıcı için bu tarz sesleri çeşitli varyasyonlarla kullanabilir. Tasarımın kablosuz internet üzerinden tabletler, akıllı telefonlar ile kontrol protokolünün hazır olması da kullanıcı için ayrı bir avantaj sağlamaktadır.

Tasarımın gelişmesi için yapılacak yenilikler şunlar olabilir. *Karplus-Strong* algoritmasının filtre parametresi her bir osilatör için tasarlanabilir. Bu sayede her osilatör için farklı filtrelere sahip *Karplus-Strong* algoritması kullanılabilir. Tasarıma daha fazla ses sentezleme yöntemi eklenebilir ve bu sayede daha farklı tınılar elde edilebilir. Aynı şekilde daha fazla efekt eklenebilir. Sinyal akış şekli, kullanıcıya bırakılıp istediği şekilde sinyal akışını gerçekleştirebilir. Kompresör gibi dinamik alan

uygulamaları eklenebilir. Tasarım profesyonel anlamda yazılım haline getirilerek her türlü daw programında kullanılabilir. Bu tasarım 2016 haziran ayında Paris'te *Audio Engineering Society* tarafından düzenlenen kongrede tasarım kategorisinde finale kalmaya hak kazanmıştır.



## KAYNAKÇA

### *Kitaplar*

- Chadabe, J., 1997. *Electric Sound*. New Jersey: Prentice-Hall
- Dodge, C. ve Jerse, T. A., 1997, *Computer music*. 2. USA: Schirmer
- Eden, A., 2014. *Pure data ile ses sentezleme*. Ankara: Gece Kitaplığı
- Furia, S. D., 1986, *The secrets of analog & digital synthesis*. USA: Third Earth Productions
- Howe, H. S., 1975, *Electronic music synthesis*. USA: W.W. Norton & Company
- Holmes, T., 2008. *Electronic and experimental music*. 3. USA: Routledge
- Hurtig, B., 1988, *Synthesizer basics*. USA: Hal Leonard Books
- Roads, C., 1996, *The computer music tutorial*. England: MIT Press
- Russ, M., 2009. *Sound synthesis and sampling*. 3. USA: Focal Press
- Shepard, B., 2013, *Refining sound*. USA: Oxford University
- Rapen, R., 2012, *The 4 element of synth*.
- Vail, M., 2014, *The synthesizer*. USA: Oxford University
- Wilson, R., 2013 *Make:analog synthesizers*. Usa: Maker Media

## ***Diğer Yayınlar***

Tamer Y. B., (2011). FFT Ses Sentezleme Motoru *Doktora Tezi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

<https://cnx.org/resources/6e98c07a7efbb518d9a08be043a9311988da9a98/Harmseries3.png> ) (Erişim Tarihi : 06.11.2015)

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/audio/imgaud/gwav8.gif> (Erişim Tarihi:10.11.2015)

<http://beausievers.com/synth/synthbasics/i/sawtoothharmonics.png> (Erişim Tarihi:10.11.2015)

[http://www.thedawstudio.com/wp-admin/Images/Sound\\_Waves/Square\\_Wave.jpg](http://www.thedawstudio.com/wp-admin/Images/Sound_Waves/Square_Wave.jpg) Erişim Tarihi:10.11.2015)

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/audio/imgaud/gwav2.gif> (Erişim Tarihi:10.12.2015)

<http://codehop.com/wp-content/uploads/2010/10/pw.gif> (Erişim Tarihi:11.12.2015)

<http://whatis.techtarget.com/definition/white-noise> (Erişim Tarihi:14.12.2015)

<http://beausievers.com/synth/synthbasics/i/lowpassfreqdomain.png> (Erişim Tarihi:17.12.2015)

<http://www.rane.com/n134fig5.gif> (Erişim Tarihi:18.12..2015)

[http://www.learningelectronics.net/circuits/images/high\\_q\\_notch\\_filter-circuit-diagram.gif](http://www.learningelectronics.net/circuits/images/high_q_notch_filter-circuit-diagram.gif) (Erişim Tarihi:20.12.2015)

<https://upload.wikimedia.org/wikibooks/en/thumb/7/77/BipolarUnipolar.png/600px-BipolarUnipolar.png> (Erişim Tarihi:22.12.2015)

<http://jsantell.github.io/dsp-with-web-audio-presentation/images/am.jpg> (Erişim Tarihi:03.01.2016)

<http://4.bp.blogspot.com/8f0PqWcvwig/T9SPsRaQ0DI/AAAAAAAAABj8/T8NkCCVY2eI/s1600/Untitled.png> (Erişim Tarihi:06.01.2016)

<https://upload.wikimedia.org/wikibooks/en/thumb/9/92/RMSpectra.png/600px-RMSpectra.png> (Erişim Tarihi:11.01.2016)

[http://instrument.statensmusikverk.se/bilder/samlingar/M4055\\_portrait\\_01b.jpg](http://instrument.statensmusikverk.se/bilder/samlingar/M4055_portrait_01b.jpg) (Erişim Tarihi:13.01.2016)

[http://static-content.springer.com/image/art%3A10.1186%2F1471-2377-13-12/MediaObjects/12883\\_2012\\_742\\_Fig1\\_HTML.jpg](http://static-content.springer.com/image/art%3A10.1186%2F1471-2377-13-12/MediaObjects/12883_2012_742_Fig1_HTML.jpg) (Erişim Tarihi:22.01.2016)

<http://www.sfu.ca/~truax/FMI.jpg> (Erişim Tarihi : 16.02.2016)

<https://ccrma.stanford.edu/software/snd/snd/fm.html> (Erişim Tarihi:23.02.2016)

[http://www.mathipedia.com/FunctionTransformations-PowerModel\\_files/image001.gif](http://www.mathipedia.com/FunctionTransformations-PowerModel_files/image001.gif) (Erişim Tarihi:13.03.2016)

<http://www.vintagesynth.com/forum/viewtopic.php?f=1&t=74549> (Erişim Tarihi:17.03.2016)

<http://madtheory.com/site/?p=320> (Erişim Tarihi:13.04.2016)

<http://en.audiofanzine.com/sound-synthesis/editorial/articles/pulsar-and-phase-distortion-synthesis.html> (Erişim Tarihi:17.04.2016)

<http://www.oocities.org/ernestwu/networking/gifs/phamod.gif> (Erişim Tarihi:19.04.2016)

<http://www.webclasses.net/Courses/WANs/6.1/Demo/units/unit02/sec04b.html> (Erişim Tarihi:25.04.2016)

<http://www.music.mcgill.ca/~gary/courses/2015/307/week4/wavetables.html#SECTION000250000000000000> (Erişim Tarihi:26.04.2016)

<http://media.soundonsound.com/sos/feb06/images/qaa3prophetvs.l.jpg> (Erişim Tarihi:01.05.2016)

<http://granularsynthesis.com> (Erişim Tarihi:11.05.2016)

<http://granularsynthesis.com/hthesis/grain.html#21> (Erişim Tarihi:13..05.2016)

<http://granularsynthesis.com/hthesis/envelope.html> (Erişim Tarihi:15.05.2016)

<http://stackoverflow.com/questions/13153078/web-audio-karplus-strong-string-synthesis> (Erişim Tarihi:17.05.2016)

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı :** RAMAZAN BATORALP ÇETİN

**Sürekli Adresi :** Sümbül efendi mahallesi kadın nine sokak yunus emre apt. No:3  
Kocamustafapaşa / Fatih

**Doğum Yeri ve Yılı :** Isparta 1991

**Yabancı Dili :** İngilizce

**İlk Öğretim :** Özel Altınbaşak Çakın İlköğretim Okulu

**Orta Öğretim :** Ülkü İlköğretim Okulu

**Lisans :** Gaziantep Üniversitesi Fizik Mühendisliği 2014

**Yüksek Lisans :** Bahçeşehir Üniversitesi 2016

**Enstitü Adı :** Fen Bilimleri Enstitüsü

**Program Adı :** Ses Teknolojileri

**Çalışma Hayatı :**

Ses Post Prodüksiyon Freelance Ses Mühendisi 02.2016 - Halen

Melodika Ses Prodüksiyon 10.2015 – 02.2016

Kılçık Prodüksiyon 05.2015- 10.2015

Benart Ses Işık Sahne Ve Görüntü Sistemleri Ltd. Şti. 09.2014- 03.2015

Ela Quality Resort Hotel 05.2014- 09.2014

