

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
SAHNE SANATLARI ANA BİLİM DALI
MÜZİK VE SAHNE SANATLARI YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANALOG-MODÜLER SES SENTEZLEYİCİLER İÇİN
MİKROTONAL DİZİ DESTEKLİ SEQUENCER TASARIMI: BABİ SEQ

ALPARSLAN ÖZTÜRK
22740008

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. ARDA EDEN

2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
SAHNE SANATLARI ANA BİLİM DALI
MÜZİK VE SAHNE SANATLARI YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANALOG-MODÜLER SES SENTEZLEYİCİLER İÇİN
MİKROTONAL DİZİ DESTEKLİ SEQUENCER TASARIMI: BABİ SEQ

ALPARSLAN ÖZTÜRK
22740008
ORCID NO: 0009-0003-8037-5071

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. ARDA EDEN

TEMMUZ 2025

Alparslan ÖZTÜRK tarafından hazırlanan “Analog-Modüler Ses Sentezleyiciler İçin Mikrotonal Dizi Destekli Sequencer Tasarımı: BABi SEQ” başlıklı çalışma, **08/07/2025** tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oybirliği ile başarılı bulunmuş ve jürimiz tarafından Sahne Sanatları Ana Bilim Dalı, Müzik ve Sahne Sanatları Yüksek Lisans programında **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman

İmza

Prof. Dr. Arda EDEN

.....

Jüri Üyeleri

İmza

Doç. Dr. Ece Merve YÜCEER NISHIDA

.....

Prof. Dr. Can KARADOĞAN

.....

ÖZET

ANALOG-MODÜLER SES SENTEZLEYİCİLER İÇİN MİKROTONAL DİZİ DESTEKLİ SEQUENCER TASARIMI: BABi SEQ

Müzik teknolojilerinin gelişimi, 20. yüzyıldan bu yana Batı müziğinin 12-ton eşit temperaman paradigması çerçevesinde şekillenmiştir. Bu durum, Türk makam müziği ve diğer mikrotonal sistemlerin elektronik platformlarda özgün temsilinde belirgin eksiklikler yaratmaktadır. Bu çalışma, problematik alana özgün yaklaşım geliştirerek akademik literatüre katkı sağlamayı hedeflemektedir.

BABi SEQ projesi, analog-modüler sentezleyici ekosistemleri için mikrotonal dizi destekli sequencer sisteminin tasarım ve geliştirme sürecini kapsamaktadır. Çalışmanın motivasyonu, mevcut teknolojik çözümlerden farklı bakış açısı ortaya koymak ve metodolojik çeşitliliği zenginleştirmektir. Sistem, Raspberry Pi Pico mikrokontrolcüsü merkezli hibrit analog-dijital mimarisi ile konvansiyonel yaklaşımlardan ayrışır.

Dört katmanlı modüler yazılım organizasyonu sistemin işlevsel esnekliğini ve genişletme potansiyelini güvence altına alır. MicroPython ile geliştirilen yazılım, 200'ü aşkın dünya müziği modunu barındıran sistematik kütüphane sunar. Türk makam entegrasyonunda İsmail Hakkı Özkan'ın (2006) kuramsal çerçevesi referans alınmış, koma aralıklarının hesaplanması için özelleştirilmiş algoritmalar geliştirilmiştir.

Donanım konfigürasyonunda MCP4822 12-bit DAC (CV çıkış), 74HC165 kaydırma yazmacı (kontrol) ve WS2812B RGB LED (görsel geri bildirim) kullanılmıştır. Testler MIDI çıkışında ± 1 cent hassasiyet, CV çıkışında ± 5 mV doğrulukla 1V/oktav standardını aştığını göstermiştir. Uşşak makamında geleneksel icra ile elektronik üretim arasında tonal tutarlılık sağlanmıştır.

Araştırmanın katkısı, mikrotonal müzik teknolojileri literatürüne alternatif metodolojik yaklaşım kazandırmak ve araştırma çeşitliliğini artırmaktır. Çalışma, geleneksel müzik sistemlerinin çağdaş elektronik müzik üretiminde entegrasyonuna yönelik yeni perspektifler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mikrotonal Müzik, Sequencer Tasarımı, CV/Gate Protokolü, MIDI Kontrolü, Müzik Teknolojisi Geliştirme

ABSTRACT

MICROTONAL SERIES-SUPPORTED SEQUENCER DESIGN FOR ANALOG-MODULAR SOUND SYNTHESIZERS: BABi SEQ

The development of music technologies has been shaped within the framework of Western music's 12-tone equal temperament paradigm since the 20th century. This situation creates significant deficiencies in the authentic representation of Turkish maqam music and other microtonal systems on electronic platforms. This study aims to contribute to academic literature by developing an original approach to this problematic area.

The BABi SEQ project encompasses the design and development process of a microtonal series-supported sequencer system for analog-modular synthesizer ecosystems. The motivation of the study is to present a different perspective from existing technological solutions and to enrich methodological diversity. The system diverges from conventional approaches with its hybrid analog-digital architecture centered on the Raspberry Pi Pico microcontroller.

Four-layered modular software organization ensures the system's functional flexibility and expansion potential. The software developed with MicroPython offers a systematic library containing over 200 world music modes. In Turkish maqam integration, İsmail Hakkı Özkan's (2006) theoretical framework has been taken as reference, and specialized algorithms have been developed for the calculation of comma intervals.

Hardware configuration utilizes MCP4822 12-bit DAC (CV output), 74HC165 shift register (control), and WS2812B RGB LED (visual feedback). Tests demonstrated that MIDI output exceeded ± 1 cent precision and CV output exceeded the 1V/octave standard with ± 5 mV accuracy. Tonal consistency was achieved between traditional performance and electronic production in Uşşak maqam.

The contribution of the research is to provide an alternative methodological approach to microtonal music technologies literature and to increase research diversity. The study offers new perspectives for the integration of traditional music systems in contemporary electronic music production.

Keywords: Microtonal Music, Sequencer Design, CV/Gate Protocol, MIDI Control, Music Technology Development

ÖN SÖZ

BABi SEQ projesi, yıllarca aranjörlük, bestecilik, müzik prodüktörlüğü ve stüdyo çalışmaları yaparak müzikal yaşamını belirli kalıplar içinde sürdürmüş bir müzisyenin, lisans eğitimi sürecinde teknoloji geliştirme alanıyla tanışmasının ardından farklı ufuklara yönelişinin hikâyesidir. Bu çalışma, geleneksel müzik anlayışının teknolojik imkânlarla nasıl yeniden şekillenebileceğinin keşfine dayanan derin bir araştırma yolculuğunun ürünüdür.

Profesyonel müzik hayatının ilk yıllarında, yaratıcılığını mevcut teknolojik standartların sınırları içinde ifade etmeye çalışırken, lisans öğrenimimin başlarında karşılaştığım müzik teknolojileri dersleri, bu alanın düşündüğümde çok daha kapsamlı ve köklü bir disiplin olduğunu gösterdi. Özellikle Türk makam müziğinin elektronik platformlarda yetersiz temsil edildiğini fark ettiğim an, bu probleme teknik bir çözüm üretme arzusu benim için hem entelektüel bir meydan okuma hem de kültürel bir sorumluluk haline geldi.

Projenin gelişim aşamalarında, mikrotonal müzik sistemlerinin matematiksel karmaşıklığını modern elektronik teknolojilerle harmanlama çabası, kimi zaman teknik sınırlarımla, kimi zaman da teorik bilgi eksiklerimle yüzleşmemi gerektiren zorlu bir deneyim sundu. Her karşılaştığım engel, aynı zamanda yeni öğrenme fırsatları ve yaratıcı problem çözme yaklaşımları geliştirmek için bir kapı açtı. Özellikle müzik teorisi bilgimin yetersiz kaldığı alanlarda yapay zekâ destekli hesaplamalar kullanma kararı hem çağımızın teknolojik olanaklarını değerlendirme hem de kendi sınırlarımı kabul ederek kararı yapmanın değerini anlama açısından öğretici bir tecrübe oldu.

Bu süreç boyunca, teknolojinin sadece mevcut müzikal pratikleri desteklemekle yetinmeyip, aynı zamanda kaybolmaya yüz tutmuş geleneksel sistemleri yeniden canlandırma gücüne sahip olduğunu gözlemleme fırsatı buldum. BABi SEQ'in Uşşak makamında gerçekleştirdiğimiz testlerde elde ettiğimiz tonal uyum, bu potansiyelin gerçekleşebileceğinin elle tutulur kanıtı oldu.

Bu çalışmanın doğuşunda bana hem akademik rehberlik eden hem de müziğin teknoloji ile kesiştiği noktadaki sınırsız olasılıkları görmemi sağlayan değerli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Arda EDEN'e; araştırma sürecinin zorlu anlarında yanımda olan, gece yarısı çalışmalarında ve bazen yaşadığım hayal kırıklıklarında desteğini hiç esirgemeyen sevgili eşim Huriye Irmak'a, varlığıyla hayatıma neşe katan ve BABi SEQ projesinin adı için bana ilham veren sevgili kızım Güneş Ülkü Ece'ye ve bu akademik yolculuğa çıkmamda beni cesaretlendiren annem Fatma Sultan ÖZTÜRK'e değerli katkılarından dolayı en derin minnettarlığımı sunuyorum.

Son söz olarak, bu araştırmanın mikrotonal müzik teknolojilerinin ilerlemesine mütevazı da olsa bir katkı sağlayacağı ve bu alanda gelecekte yürütülecek çalışmalara ilham kaynağı olabileceği beklentisini taşıdığımı belirtmek isterim.

Alparslan ÖZTÜRK
Temmuz, 2025; İstanbul

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖN SÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİLLER LİSTESİ	xv
KISALTMALAR LİSTESİ.....	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Problem Durumu.....	2
1.1.1. MIDI Protokolünün Sınırları ve Teknolojik Yetersizlikler.....	2
1.1.2. Makam Müziği ve Geleneksel Sistemlerin Elektronik Temsil Eksikliği... 3	
1.1.3. Maliyet ve Erişilebilirlik Engelleri	3
1.1.4. Hibrit Sistem Entegrasyon Zorlukları	4
1.1.5. Akademik Literatürdeki Boşluklar.....	5
1.2. Araştırmanın Hedef ve Kapsamı	5
1.3. Araştırmanın Bilimsel ve Toplumsal Değeri	6
1.3.1. Alan Literatürüne Katkı	6
1.3.2. Kültürel Sürdürülebilirlik ve Miras Korunumu	6
1.3.3. Teknolojik Yenilikçilik ve Demokratikleşme.....	6
1.3.4. Toplumsal Etki ve Erişilebilirlik.....	6
1.4. Problem Cümlesi.....	7
1.5. Araştırmanın Alt Problemleri.....	7
1.6. Araştırmanın Varsayımları.....	7
1.7. Çalışmanın Sınırlılıkları	7
1.7.1. Donanım Kaynaklı Sınırlılıklar.....	8
1.7.2. Yazılım Geliştirme Sınırlılıkları	8
1.7.3. Test ve Doğrulama Sınırlılıkları.....	8
1.7.4. Müzikal İçerik Sınırlılıkları.....	8
1.8. Literatür Değerlendirmesi ve Konumlandırma	8
1.8.1. MIDI Protokolü ve Mikrotonal Uygulamalar	8
1.8.2. Türk Müziği ve Elektronik Adaptasyon Çalışmaları	9
1.8.3. Modüler Sentezleyici Teknolojilerinin Gelişimi.....	10

1.8.4. Analog ve Dijital Müzik Donanımlarında Mikrodenetleyicilerin Rolü... 10	10
2. MİKROTONAL MÜZİK VE SES SENTEZLEYİCİ TEKNOLOJİLERİ..... 12	12
2.1. Müzikal Sistemlerin Matematiksel Temelleri ve Akort Yaklaşımları 13	13
2.1.1. On İki Eşit aralıklı Tamperaman Sistemi ve Modern Batı Müziği 13	13
2.1.2. Mikrotonal Yaklaşımlar: Kültürel Çeşitlilik ve Akustik Zenginlik..... 15	15
2.1.3. Mikrotonalite ve Türk Makam Geleneği İlişkisi..... 16	16
2.2. Elektronik Ses Üretim Teknolojilerinin Evrimi ve Çağdaş Uygulamalar 18	18
2.2.1. Modüler Sentezleyicilerin Tarihsel Gelişimi ve Teknolojik Dönüşümler 18	18
2.2.2. Robert Moog ve Modüler Sentezleyici Devrimi..... 19	19
2.2.3. Don Buchla ve Alternatif Modüler Sentez Felsefesi 20	20
2.2.4. Dijital Devrim ve Analog Sistemlerin Geri Çekilme Süreci..... 22	22
2.2.4.1. Teknolojik Paradigma Değişiminin Teorik Temelleri 23	23
2.2.4.2. Analog Rönesans: Teknolojik Nostalji ve Yeniden Keşif Süreci 23	23
2.2.4.3. Eurorack Formatının Demokratikleşme Misyonu..... 24	24
2.2.4.4. Çağdaş Hibrit Yaklaşımlar ve Mikrotonal Potansiyeller 24	24
2.2.5. Elektronik Kontrol Voltajı Sistemleri ve Müzikal Standardizasyon..... 25	25
2.2.5.1. CV/GATE İletişim Protokollerinin Temel Dinamikleri 25	25
2.2.5.2. Voltaj Kontrolü Yaklaşımının Kuramsal ve Uygulama Etkileri..... 27	27
2.2.5.3. 1V/Oktav Standardının Müzikal-Matematiksel Temelleri 27	27
2.2.5.4. Standardizasyonun Müzik Teknolojisindeki Paradigmatik Etkisi 28	28
2.2.5.5. Gate Sinyalizasyon Sistemlerinin Sinyal Zamansal Yönetimi 28	28
2.2.5.6. Zamansal Artikülasyon ve Müzikal İfade Kontrolü..... 29	29
2.2.5.7. Mikrotonal Uygulamalarda CV/GATE Sistemlerinin Avantajları ... 29	29
2.2.6. Eurorack Modüler Ekosisteminin Gelişimi ve Demokratikleşme Süreci 29	29
2.2.6.1. Eurorack Formatının Dönüştürücü Rolü..... 30	30
2.2.6.2. Dieter Doepfer'in Demokratikleşme Vizyonu ve Sosyal Etki 30	30
2.2.6.3. Teknik Spesifikasyonlar ve Evrensel Uyumluluk Kriterleri..... 31	31
2.2.6.4. Eurorack Ekosisteminin Sosyal ve Ekonomik Dinamikleri..... 31	31
2.2.6.5. Mikrotonal Uygulamalar için Özelleştirilmiş Modül Gelişimi..... 32	32
2.2.6.6. Gelişimsel Ekonomi ve İnovasyonu Güçlendirici Yapılar..... 33	33
2.3. Dijital Müzik Kontrol Teknolojilerinin Evrimsel Gelişimi 33	33
2.3.1. Dijital Kontrol Paradigmasının Temelleri ve Teknolojik Altyapı 33	33
2.3.1.1. Dijital Müzik Kontrol Sistemlerinin Ortaya Çıkışı..... 33	33
2.3.1.2. Teknolojik Paradigma Değişiminin Etkileri 34	34

2.3.2. MIDI Protokolünün Gelişimi ve Endüstriyel Standardizasyon	35
2.3.2.1. MIDI'nin Gelişim Süreci	35
2.3.2.2. MIDI'nin Teknik Mimarisi ve İşlevsel Özellikler	36
2.3.3. Sequencer Teknolojilerinin Tarihsel Evrimi ve Çağdaş Uygulamalar	36
2.3.3.1. Erken Dönem Sequencer Sistemleri.....	37
2.3.3.2. Modern Adım Sıralama ve Mikrokontrolcü Entegrasyonu.....	38
2.3.3.3. Mikrokontrolcü Tabanlı Sistemler ve Kendin Yap Ekosistemleri	39
2.3.4. Mikrotonal Kontrol Sınırlamaları ve MIDI Protokol Kısıtları.....	39
2.3.4.1. MIDI'nin Yapısal Sınırlamaları.....	39
2.3.4.2. MIDI Tabanlı Çözümler ve Yazılım Yaklaşımları	40
2.3.4.3. Hibrit MIDI/CV Sistemler ve Donanım Entegrasyonu.....	41
2.3.4.4. Türk Müziği Özel Uygulamaları ve Yerli Çözümler	42
2.3.4.5. Donanım Sentezleyici Çözümleri ve Gelişmiş Sistemler	43
2.3.4.6. Scala Yazılımı ve Standardizasyon Çabaları	43
2.4. Mikrotonal Müzik Teknolojilerinde Güncel Gelişmeler.....	44
2.4.1. Yazılım Tabanlı Çözümler	44
2.4.1.1. Web Tabanlı Uygulamalar ve Erişilebilirlik	44
2.4.1.2. Tracker-Stil Sequencer Uygulamaları.....	45
2.4.1.3. Gelişmiş Görselleştirme ve Etkileşim Sistemleri.....	45
2.4.1.4. Uzmanlaşmış Türk Müziği Yazılımları	45
2.4.2. Hibrit Donanım/Yazılım Sistemleri	46
2.4.2.1. MIDI/CV Dönüştürücü Sistemler	46
2.4.2.2. Akıllı Donanım Entegrasyonları	46
2.4.2.3. Topluluk Tabanlı Geliştirmeler.....	47
2.4.3. Modüler Sentezleyici Entegrasyonları	47
2.4.3.1. Üretken Mikrotonal Dizileme	47
2.4.3.2. Algoritmik Yaklaşımlar	47
2.4.3.3. Ekosistemin Gelişen Doğası	48
2.4.4. Mevcut Çözümlerin Sınırlılıkları ve BABi SEQ'in Katkısı	48
2.4.4.1. Maliyet ve Erişilebilirlik Sorunları	48
2.4.4.2. Entegrasyon ve Uyumluluk Zorlukları.....	48
2.4.4.3. Geleneksel Müzik Sistemlerinin Temsil Eksikliği.....	49
2.4.4.4. Kullanıcı Deneyimi ve Öğrenme Eğrisi Sorunları	50
2.4.4.5. Canlı Performans Sınırlılıkları	50
2.4.4.6. Gelecek Gelişmeler İçin Platform Eksikliği	50

3. YÖNTEM.....	52
3.1. Araştırma Modeli	52
3.1.1. Mevcut Çalışmalardan Yararlanma ve Adaptasyon Süreci	53
3.1.1.1. Hibrit MIDI/CV Yaklaşımının Geliştirilmesi:	53
3.1.1.2. Modüler Sequencer Tasarım Prensipleri:	53
3.1.2. Özgün Katkıları ve Yenilik Alanları	53
3.1.3. Yapay Zekâ Destekli Araştırma Süreçleri ve Etik Beyanı.....	54
3.1.3.1. Müzikal Teorik Hesaplamalar ve Matematiksel Analiz Desteği:	54
3.1.3.2. Yazılım Geliştirme ve Teknik Uygulama Desteği:	54
3.1.3.3. Doğrulama ve Validasyon Süreçleri	55
3.1.3.4. Araştırmacı Özerkliği ve Akademik Bütünlük	55
3.1.4. Açık Kaynak Yazılım Kütüphaneleri ve Platform Adaptasyonları.....	55
3.1.4.1. MicroPython Platform Seçimi ve Gereksinimleri	56
3.1.4.2. Görüntü ve Kullanıcı Arayüzü Kütüphane Adaptasyonları	56
3.1.4.3. Dokunmatik Ekran Kontrolü.....	57
3.1.4.4. Font Rendering Sistemi.....	57
3.1.4.5. JSON Bellek Optimizasyonu Protokolleri	57
3.1.4.6. Donanım Arayüzü Soyutlama Çözümleri	58
3.1.4.7. Yazılım Mimari Adaptasyonları ve Özgün Katkıları	58
3.1.4.8. Etik Kullanım ve Lisans Uyumluluğu	59
3.1.5. GitHub Dokümantasyonu ve Açık Kaynak Katkısı	59
3.1.5.1. Akademik Tekrarlanabilirlik	59
3.1.5.2. Açık Bilim Prensipleri	60
3.2. Tasarım ve Geliştirme Metodolojisi.....	60
3.2.1. Analiz Aşaması: Mevcut Teknolojilerin Değerlendirilmesi	60
3.2.1.1. Teknoloji Analizi ve Benchmarking:	60
3.2.1.2. Mikrotonal Müzik Sistemleri Analizi:	60
3.2.1.3. Teknik Gereksinimlerin Belirlenmesi:	61
3.2.2. Tasarım Aşaması: Sistem Mimarisi ve Bileşen Seçimi	61
3.2.2.1. Sistem Mimarisi Planlaması:	61
3.2.2.2. Donanım Bileşeni Tasarımı:	61
3.2.2.3. Yazılım Mimarisi Planı:	61
3.2.3. Geliştirme Aşaması: İmplementasyon ve Entegrasyon	62
3.2.3.1. Prototip Üretimi:	62
3.2.3.2. Yazılım Programlama:	62

3.2.3.3. Sistem Entegrasyonu:.....	62
3.3. Müzikal Kütüphane Oluşturma Metodolojisi.....	62
3.3.1. Kaynak Toplama Süreci ve Referans Sistemler.....	63
3.3.1.1. Birincil Kaynaklar ve Metodolojik Yaklaşım:.....	63
3.3.1.2. Mevcut Dijital Kütüphanelerden Yararlanma:.....	63
3.3.1.3. İkincil Kaynaklar ve Çapraz Doğrulama:	63
3.3.2. Kategorileme Sistemi ve Organizasyon.....	63
3.3.2.1. Tematik Sınıflandırma Yaklaşımı.....	64
3.3.2.2. Hiyerarşik Organizasyon ve Metadata	64
3.3.3. Veri Yapılandırma ve Teknik İmplementasyon.....	65
3.4. Test ve Değerlendirme Protokolleri.....	65
3.4.1. Test Yaklaşımı ve Sınırlılıklar	65
3.4.1.1. Mevcut Sistemlerle Karşılaştırmalı Test Yaklaşımı	65
3.4.1.2. Pilot Test Kapsamı	65
3.4.2. Gelecekte Yapılacak Çalışmalar İçin Önerilen Test Protokolleri.....	66
3.4.2.1. Hassasiyet Testleri ve Endüstri Standartları	66
3.4.2.2. İleri Düzey Performans Testleri.....	66
3.4.3. Kullanılabilirlik Testleri ve Kullanıcı Deneyimi Metodolojisi.....	66
3.4.3.1. Kullanıcı Deneyimi Test Çerçevesi	66
3.4.3.2. Müzikal Doğruluk Testleri.....	66
3.4.4. Araştırma Etiği.....	67
3.4.4.1. Açık Kaynak Etik Standartları	67
4. BABİ SEQ SİSTEM TASARIMI	68
4.1. Sistem Yapısı ve Genel Tasarım Vizyonu	68
4.2. Donanım Mimarisi	70
4.2.1. Mikrodenetleyici ve Ana Bileşen Seçimi.....	70
4.2.2. Güç Yönetimi ve Kararlılık.....	71
4.2.3. Kullanıcı Arayüz Donanımı	71
4.2.3.1. Buton Sistemi	71
4.2.3.2. Ekran Sistemi Gelişimi	72
4.2.3.3. Adreslenebilir RGB LED Sistemi.....	73
4.2.3.4. Döner Kodlayıcı Kontrolü.....	73
4.2.4. PCB Tasarım ve Üretim Süreci.....	73
4.2.4.1. Kart Yapılandırması	74

4.2.4.2. PCB Üretim Süreci.....	74
4.2.5. Gövde Tasarımı ve Mekanik Yapı	74
4.2.5.1. Tasarım Süreci	75
4.2.5.2. Üretim ve Yüzey İşlemleri	75
4.2.6. MIDI ve CV Çıkış Devreleri.....	76
4.2.6.1. MIDI Çıkış Devresi.....	76
4.2.6.2. CV Çıkış Devresi	76
4.2.6.3. Gate Sinyali Üretimi	76
4.3. Yazılım Mimarisi	77
4.3.1. Yazılım Geliştirme Süreci ve Mimari Evrimi.....	77
4.3.1.1. Donanım Katmanı (Hardware).....	78
4.3.1.2. Sequencer Katmanı (Sequencer).....	78
4.3.2. MicroPython Uygulama ve Performans İyileştirmeleri	79
4.3.2.1. Bellek Yönetimi İyileştirmesi	79
4.3.2.2. Aritmetik İşlem Tercihleri.....	79
4.3.2.3. Bellek Kullanımı İyileştirmesi	80
4.3.3. Kodlama Standartları ve Organizasyon	80
4.4. Müzikal Kütüphane	80
4.4.1. Türk Makam Müziği Sistematik Kategorilemesi.....	80
4.4.2. Küresel Müzikal Geleneklerin Entegrasyonu	81
4.4.2.1. Arap Makam Sistemi ve Ortadoğu Gelenekleri	81
4.4.2.2. Batı Müzik Modları ve Deneysel Sistemlerin Entegrasyonu.....	82
4.4.3. JSON Veri Yapısı ve Teknik İmplementasyon	82
4.4.3.1. Frekans Hesaplama Algoritması ve Matematiksel Temel	83
4.4.3.2. Optimizasyon ve Performans İyileştirmeleri	83
5. ÜRETİM VE İMPLEMENTASYON SÜRECİ.....	84
5.1. Donanımın Kurulumu ve Kalibre Edilmesi	84
5.1.1. Buton Mimarisi Yapılandırması.....	84
5.1.2. Temel Devre Planlaması ve Akım Dağılımı	84
5.1.3. Baskı Devre Kartı Üretim Metodolojisi.....	85
5.2. Yazılım İyileştirmeleri ve Performans Artırımları.....	85
5.2.1. Donanım Katmanı Performans İyileştirmeleri.....	85
5.2.2. Kullanıcı Arayüzü Katmanı Optimizasyonları.....	86
5.2.3. Bellek Yönetimi ve Veri İşleme Optimizasyonu	86

5.3. Kullanıcı Arayüzü ve Kontrol Sistemi	86
5.3.1. Rotary Encoder Kontrolleri.....	87
5.3.2. Adım Seçici Kontroller (1-16)	87
5.3.3. Ana Kontrol Butonları.....	87
5.3.4. Solo/Mute Kontrolleri	87
5.3.5. Müzikal Kontroller.....	87
5.3.6. Sistem Kontrolleri	88
5.4. Maliyet Analizi.....	88
5.4.1. Ana Bileşenler.....	88
5.4.2. Elektronik Bileşenler.....	88
5.4.3. Mekanik ve Konnektörler	88
5.4.4. Gövde ve Üretim	89
6. SİSTEM TESTLERİ VE DEĞERLENDİRME	90
6.1.1. Test Kapsamı ve Sınırlılıklar	90
6.1.2. MIDI Çıkış Performansı.....	90
6.1.3. CV Çıkış Performansı	91
6.1.4. Zamanlama ve Sistem Performansı.....	91
6.1.5. Kullanıcı Deneyimi Değerlendirmesi	92
6.2. Pilot Test Sonuçlarının Kapsamlı Değerlendirilmesi.....	93
6.2.1. Temel İşlevsellik Doğrulaması	93
6.2.2. Mikrotonal Müzik Hedefleri	94
6.2.2.1. Türk Makam Müziği Entegrasyonu	94
6.2.2.2. JSON Tabanlı Mod Kütüphanesi	94
6.3. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler.....	94
6.3.1. Öncelikli Test Gereksinimleri	95
6.3.2. Kapsamlı Değerlendirme Gereksinimleri	95
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	96
7.1. Araştırma Sonuçlarının Değerlendirmesi.....	96
7.1.1. Teknolojik Kazanımlar ve Sistem Başarımı	96
7.1.2. Müzikal Boyut ve Kültürel Katkı.....	96
7.1.3. Demokratikleşme ve Erişilebilirlik Boyutu	97
7.1.4. Kullanıcı Etkileşimi ve Arayüz Başarıları	97
7.1.5. Akademik ve Kültürel Miras Açısından Değerlendirme	97
7.1.6. İşletimsel Performans Değerlendirmesi	97

7.2. Araştırma Sınırlılıkları ve Kısıtlar	98
7.2.1. Donanımsal Kısıtlamalar.....	98
7.2.2. Yazılım Katmanındaki Sınırlar	98
7.2.3. Müzikal ve Teorik Limitler	99
7.3. Gelecek Araştırmalar İçin Stratejik Öneriler	99
7.3.1. Donanım Gelişim Yolları.....	100
7.3.2. Yazılım Mimarisi Dönüşümü.....	100
7.3.3. Müzikal Ufukların Genişletilmesi.....	100
7.3.4. Araştırma ve Uygulama Yönleri	101
7.3.5. Teknolojik Ekosistem Bütünleşmesi.....	101
7.3.6. Teknolojik Yeterlilik.....	101
7.3.7. Müzikal Katkılar ve Akademik Değer	102
7.3.8. Bütçe Uyumluluğu ve Açık Erişim Hedefleri.....	102
7.3.9. Kullanıcı Deneyimi ve Arayüz Değerlendirmeleri	103
7.3.10. Bilimsel ve Toplumsal Katkı Analizi.....	103
7.3.11. Teknik Başarım ve İşlevsel Performans.....	103
KAYNAKÇA.....	104

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Mikrotonal Müzik Teknolojileri Pazar Analizi (2025).....	4
Tablo 2. Kullanılan Kütüphaneler.....	59
Tablo 3. Tasarım Hedefleri Karşılaştırma Tablosu.....	94



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Modüler Sentezleyici Zaman Çizelgesi (1897-2020)	22
Şekil 2. CV Voltaj-Oktav İlişkisi	26
Şekil 3. Jaggler'in Pitch Bend Dönüşüm Formülü	53
Şekil 4. ILI9341 Adaptasyonları	56
Şekil 5. XPT2046 Dokunmatik Ekran Kontrolcüsü.....	57
Şekil 6. Çoklu SPI Channel Konfigürasyonu.....	58
Şekil 7. JSON Kod Yapısı.....	64
Şekil 8. BABi SEQ Ön Panel.....	68
Şekil 9. Raspberry Pi Pico.....	70
Şekil 10. 74HC165 Pin Diagramı	72
Şekil 11. 2.8" TFT Ekran	72
Şekil 12. Anakart ve Buton Matrisi Devreleri	73
Şekil 13. PCB Üretim Süreci	74
Şekil 14. Gövde Tasarımı.....	75

KISALTMALAR LİSTESİ

ADC	: Analog-to-Digital Converter (Analog-Dijital Dönüştürücü)
ADSR	: Attack, Decay, Sustain, Release
API	: Application Programming Interface
BPM	: Beats Per Minute (Dakikadaki Vuruş Sayısı)
CV	: Control Voltage
DAC	: Digital-to-Analog Converter
DIY	: Do It Yourself
EDO	: Equal Divisions of Octave (Oktavın Eşit Bölünmesi)
FFT	: Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
GPIO	: General Purpose Input/Output
GUI	: Graphical User Interface (Grafik Kullanıcı Arayüzü)
I2C	: Inter-Integrated Circuit
IDE	: Integrated Development Environment (Entegre Geliştirme Ortamı)
JSON	: JavaScript Object Notation
LED	: Light Emitting Diode
LFO	: Low Frequency Oscillator (Düşük Frekans Osilatörü)
MIDI	: Musical Instruments Digital Interface
MPE	: MIDI Polyphonic Expression
MTS	: MIDI Tuning Standard
OpAmp	: Operational Amplifier (İşlemsel Yükselteç)
OSC	: Open Sound Control
PCB	: Printed Circuit Board (Baskı Devre Kartı)
PWM	: Pulse Width Modulation
RGB	: Red Green Blue
SPI	: Serial Peripheral Interface
SRAM	: Static Random Access Memory
TFT	: Thin Film Transistor
TTL	: Transistor-Transistor Logic
UART	: Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
UI	: User Interface
USB	: Universal Serial Bus
VCA	: Voltage Controlled Amplifier
VCF	: Voltage Controlled Filter
VCO	: Voltage Controlled Oscillator
YTÜ	: Yıldız Teknik Üniversitesi

1. GİRİŞ

Yirminci yüzyılın başlarından itibaren elektronik müzik araçları, ağırlıklı olarak Batı müzik geleneğinin teorik yapısı temelinde tasarlanmaya başlamıştır. Buna bağlı olarak on iki ses aralığına dayalı tamperaman sistem yapısı, elektronik ses üretim cihazlarının çoğunda benimsenen temel yaklaşım olmuştur (Roads, 1996). Bu durum, Batı müzik anlayışı için uygun çözümler sunsa da dünyada yaygın olan mikrotonal yapılara sahip müzik sistemlerinin elektronik ortamda ifade edilmesinde engeller oluşturmaktadır. Günümüzde bu sorunun çözümü, yalnızca teknolojik değil aynı zamanda kültürel bir ihtiyaç haline gelmiştir.

1983 yılında kabul edilen MIDI standardı, o dönemden günümüze değin dijital müzik teknolojilerinin merkezi protokolü işlevini sürdürmektedir (Loy, 1985). Bu protokol içindeki pitch bend özelliği, mikrotonal uygulamalar için belirli kolaylıklar sağlasa da gerçek zamanlı performans ve kompozisyon süreçlerinde yeterli esnekliği sunamamaktadır. Modern müzik üretiminde, MIDI'nin 128 nota sınırı ve 14-bit pitch bend çözünürlüğü, karmaşık mikrotonal yapılar için yetersiz kalmaktadır. Bu sınırlılıklar, özellikle canlı performanslarda müzisyenlerin yaratıcı potansiyelini kısıtlamaktadır.

Analog sentez teknolojisinin gelişimi, Robert Moog ve Don Buchla'nın 1960'lu yıllardaki öncü yaklaşımlarıyla başlamıştır (Pinch & Trocco, 2002). Eurorack formatının popüleritesi artmasıyla birlikte, bu teknoloji günümüzde müzisyenlere geleneksel çalgıların limitlerini aşan yaratıcı olanaklar sunmaktadır. Analog modüllerin voltaj tabanlı kontrol mekanizması, teorik olarak sınırsız frekans manipülasyonuna olanak tanımaktadır. Ancak bu potansiyelin tam olarak kullanılabilmesi için, mikrotonal müzik teorilerini anlayan ve bu teorileri elektronik sistemlere çevirebilen arayüzlere ihtiyaç duyulmaktadır. Mevcut sequencer teknolojileri ise hâlâ geleneksel nota sisteminin sınırları içinde çalışmaktadır.

Türk makam geleneği, Hint raga sistemi, Arap musiki yaklaşımları gibi köklü müzik kültürleri, standart on iki sesli bölümlenmeye kıyasla çok daha incelikli frekans

ayrımlarına sahiptir (Signell, 1977). Bu müzik sistemlerinin her biri, kendine özgü matematiksel oranlar ve estetik yaklaşımlar içermektedir. Elektronik müzik teknolojilerinin bu çeşitliliği desteklemesi, yalnızca teknik bir gereklilik değil, aynı zamanda kültürel miras aktarımı açısından da kritik öneme sahiptir. Bu durumun farkında olan müzik teknolojisi geliştiricileri, son yıllarda mikrotonal yaklaşımlara daha fazla odaklanmaya başlamıştır.

Bu çerçevede, dijital kontrol sistemleri ile analog modüler yapıları birleştiren melez yaklaşımlar, elektronik ortamda mikrotonal müzik yaratımı için gelecek vadeden çözümler önermektedir. Çağdaş mikro işlemci teknolojilerinin sunduğu hesaplama kapasitesi ve esneklik hem voltaj kontrolü sağlayabilen hem de MIDI sınırlarını aşabilen yenilikçi araçların geliştirilmesini mümkün kılmaktadır (Raspberry Pi Foundation, 2021).

Bu hibrit çözümler, geleneksel müzik sistemlerinin zenginliğini modern elektronik araçlarla buluşturarak, müzisyenlere daha geniş ifade olanakları sunma potansiyeline sahiptir. Özellikle açık kaynak donanım ve yazılım ekosistemlerinin gelişimi, bu alandaki yeniliklerin daha hızlı yayılmasını ve demokratikleşmesini sağlamaktadır.

1.1. Problem Durumu

Günümüz elektronik müzik teknolojilerinde mikrotonal müzik üretimi konusunda ciddi yetersizlikler bulunmaktadır. Bu durum hem teknolojik sınırlar hem de kültürel temsil eksiklikleri nedeniyle çok katmanlı bir sorun haline gelmiştir.

1.1.1. MIDI Protokolünün Sınırları ve Teknolojik Yetersizlikler

Elektronik müzik dünyasının temel taşı olan MIDI protokolü, 1983'teki standartlaşmasından bu yana 12-ton eşit temperaman sistemi üzerine kurulmuştur (MIDI Manufacturers Association, 1983). Bu yaklaşım Batı müziği için uygun çözümler sunarken, mikrotonal müzik sistemleri açısından önemli sınırlar yaratmıştır.

MIDI'nin temel sınırları Şu şekildedir: MIDI'nin 128 nota numarası yapısı, yarım ton aralıklarla sınırlı kalmaktadır. Pitch bend kontrolü teorik olarak mikrotonal olanaklar sunsa da varsayılan ± 2 yarım ton aralığı pratik kullanımda yetersizdir (Pressing, 1987). Çoklu MIDI kanal gerektiren karmaşık çözümler ise gerçk zamanlı performanslarda kullanışsızlık yaratmaktadır.

Modern Eurorack ekosistemi sürekli voltaj kontrolü ile teorik olarak sınırsız frekans kontrolü sunmasına rağmen, mevcut sequencer'ların büyük kısmı geleneksel 12-ton yapılarla sınırlıdır. Make Noise René ve Intellijel Steppy gibi analog sequencer'lar potansiyometre tabanlı frekans kontrolü sunsa da hassas mikrotonal programlama için yeterli değildir (Holmes, 2016).

1.1.2. Makam Müziği ve Geleneksel Sistemlerin Elektronik Temsil Eksikliği

Türk makam müziğinin elektronik ortamda yeterince temsil edilememesi, günümüz teknolojilerinin en ciddi eksikliklerinden biridir. İsmail Hakkı Özkan'ın (2006) sistematize ettiği koma aralıklarına dayanan karmaşık yapı, mevcut elektronik araçlarla uyumlu değildir.

22-koma sisteminin 12-ton aralıklarla eşleştiremeyeşi, makam seyir özelliklerinin statik frekans değerleriyle sınırlanması ve geleneksel icra ile elektronik temsil arasındaki tonal uyumsuzluk başlıca sorunlardır. Bu durum sadece Türk müziğini değil, Arap makam sistemi, İran dastgah'ları ve Afrika müzik geleneklerini de benzer şekilde etkilemektedir.

Tanrıkorur'un (1998) belirttiği gibi, "Batı'dan ithal edilen piyano ve org gibi enstrümanlar, Türk musikisinin koma seslerini icra etmekten âcizdir. Bu yüzden, özellikle son dönemde popülerleşen elektronik klavyeler, makamları 'basitleştirerek' standart Batı aralıklarına çekmekte ve musikimizin ruhunu yok etmektedir" (s. 45-46). Bu sorunun çözümüne yönelik Karaosmanoğlu'nun (2012) Mus2 yazılımı ve Türk Musikisi Piyanosu gibi öncü çalışmalar bulunsa da bu yaklaşımlar genellikle yazılım tabanlı çözümlerle sınırlı kalmış ve modüler analog sentezleyici ekosistemiyle entegrasyon sağlamamıştır.

1.1.3. Maliyet ve Erişilebilirlik Engelleri

Mikrotonal müzik üretimi için geliştirilmiş ticari elektronik ekipmanların pazar analizi, bu alanda ciddi ekonomik ve erişilebilirlik sorunları olduğunu ortaya koymaktadır. Geleneksel müzik teknolojisi üreticileri, mikrotonal yeteneklere sahip cihazları genellikle niş pazar ürünleri olarak konumlandırmakta ve bu durum fiyatlandırma stratejilerini olumsuz etkilemektedir (Miranda & Wanderley, 2006). Mevcut pazar dinamikleri, akademik kurumların ve bağımsız müzik araştırmacılarının bu teknolojilere erişimini ciddi şekilde sınırlandırmaktadır.

Güncel pazar araştırması sonuçları, mikrotonal destek sunan cihazların fiyat aralıklarının oldukça geniş bir spektrumda dağıldığını göstermektedir. Bu durum, farklı kullanıcı profillerinin ihtiyaçlarına yönelik çeşitli çözümlerin mevcut olduğunu, ancak ekonomik erişilebilirlik açısından önemli zorluklarla karşılaştığını işaret etmektedir.

Tablo 1. Mikrotonal Müzik Teknolojileri Pazar Analizi (2025)

Kategori	Ürün Adı	Fiyat (USD)	Özellikler
Modüler Sequencer	Erica Synths Black Sequencer	615-650	Mikrotonal tuning, 8-kanal
Mikrotonal Interface	Tubbutec μ Tune	350-380	MIDI/CV dönüştürücü
Hibrit Kontroller	Sensel Morph (Mikrotonal)	300-400	Basınç hassas, programlanabilir
DIY Kit'ler	Music Thing Modular Turing	85-120	Monte edilmiş/kit halinde
Yazılım Çözümleri	Scala + Max/MSP	0-400	Yazılım tabanlı, lisans gerekli

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur, 2025.

1.1.4. Hibrit Sistem Entegrasyon Zorlukları

Analog ve dijital sistemlerin bir araya getirilmesi, mikrotonal hassasiyet açısından teknik zorluklar yaratmaktadır. CV çıkış hassasiyetinde sıcaklık kaynaklı sapmalar, MIDI ve CV protokollerinin eş zamanlı senkronizasyon zorluğu ve farklı üretici ekipmanları arasında mikrotonal kalibrasyon uyumsuzlukları başlıca sorunlardır (Strange, 2007).

Yazılım-donanım koordinasyonunda ise gerçek zamanlı hesaplama gereksinimlerinin mikrodenetleyici sınırlarıyla çakışması, kullanıcı arayüzü karmaşıklığı ve pattern kaydetme/yükleme işlemlerindeki standart eksikliği önemli engellerdir.

1.1.5. Akademik Literatürdeki Boşluklar

Bu araştırmanın literatür taraması, mikrotonal sequencer tasarımı konusunda önemli boşluklar ortaya koymuştur. Türk makam müziği elektronik uyarlamaları üzerine sınırlı çalışma mevcuttur (Yarman, 2008). Hibrit analog-dijital mikrotonal kontrol sistemleri literatürü yetersizdir ve açık kaynak mikrotonal araç geliştirme metodolojileri eksiktir.

Pratik uygulama açısından düşük maliyetli mikrotonal sequencer tasarım çalışmaları azdır. Raspberry Pi Pico gibi modern mikrodenetleyicilerin müzik uygulamalarındaki potansiyeli yeterince araştırılmamıştır. Geleneksel müzik sistemlerinin çağdaş elektronik müzik üretimindeki entegrasyon modelleri eksiktir.

Bu kapsamlı sorun analizi, BABi SEQ projesinin gerekliliğini ve çok boyutlu çözüm yaklaşımının önemini ortaya koymaktadır.

1.2. Araştırmanın Hedef ve Kapsamı

Bu çalışmanın birincil hedefi, geleneksel müzik sistemlerinin zengin mikrotonal yapılarını modern elektronik sentez teknolojileriyle buluşturacak yenilikçi bir araç geliştirmektir. Proje kapsamında, analog modüler sistemler için tasarlanmış, çok kültürlü müzik geleneklerini destekleyen dijital bir sekans üretici sistemi oluşturulmaktadır. Bu sistem, Raspberry Pi Pico mikrodenetleyici platformu üzerinde çalışacak şekilde tasarlanmış olup hem voltaj kontrol çıkışları hem de MIDI iletişim protokolü aracılığıyla çift yönlü veri aktarımı sağlamaktadır.

Geliştirilen aracın temel misyonu, dünya çapında yaygın olan iki yüzden fazla müzikal skala ve mod sistemini elektronik müzik üretim ortamlarında kullanılabilir hale getirmektir. Araştırmanın stratejik alt hedefleri şu çerçevede şekillenmiştir:

- **Kültürel Çeşitliliğin Teknolojik Platformlarda Temsili:** Türk müzikal geleneğinin makam sistemi başta olmak üzere, mikrotonal yaklaşımların elektronik ortamlarda özgün karakteristiklerini koruyarak sunulması.
- **Matematiksel-Teknolojik Entegrasyon:** Mikrotonal skalaların altında yatan frekans ilişkilerinin, elektronik kontrol sistemlerinin dijital yapısına uyarlanması.
- **Demokratik Teknoloji Geliştirme:** Açık kaynak metodolojisi ile ekonomik erişilebilirlik sağlanması ve akademik kurumlar için maliyet-etkin çözümler üretilmesi.
- **Sürdürülebilir Yazılım Mimarisi:** Gelecekteki müzikal yaklaşımların kolayca entegre edilebileceği modüler sistem altyapısının oluşturulması.

1.3. Araştırmanın Bilimsel ve Toplumsal Değeri

Bu bölümde Müzik teknolojileri disiplini temel alana bu araştırmanın bilimsel içerik ve sosyolojik katkı açısından değeri ele alınmıştır:

1.3.1. Alan Literatürüne Katkı

Geleneksel müzik yapılarının çağdaş elektronik teknolojilerle sentezi hem mühendislik hem de etnomuzikoloji disiplinlerinde yenilikçi bir araştırma yaklaşımı oluşturmaktadır. Türk makam sisteminin dijital ve analog müzik teknolojileriyle entegrasyonuna yönelik akademik çalışmaların yetersizliği, bu araştırmanın bilimsel literatürde kritik bir eksikliği giderme kapasitesini güçlendirmektedir. Özellikle mikrotonal yapıların sequencer teknolojileriyle birleştirilmesine dair sınırlı sayıdaki çalışma, BABi SEQ projesinin teorik ve pratik katkılarının önemini artırmaktadır. Bu bağlamda, analog sentez teknikleriyle makamsal seyir karakteristiklerinin birleştirilmesi, müzik teknolojisi alanında henüz derinlemesine incelenmemiş bir araştırma sahası olarak karşımıza çıkmaktadır.

1.3.2. Kültürel Sürdürülebilirlik ve Miras Korunumu

Çağdaş teknolojik altyapıların geleneksel müzik sistemleriyle entegrasyonu, kültürel aktarım süreçlerinde kritik rol oynamaktadır. Bu araştırma, mikrotonal müzik geleneklerinin dijital çağda yaşatılması ve yeni nesillere aktarılması için teknolojik bir köprü işlevi görmektedir.

1.3.3. Teknolojik Yenilikçilik ve Demokratikleşme

Modern mikrodenetleyici platformlarının müzik teknolojilerinde kullanımı, yüksek performanslı ancak ekonomik çözümler için yeni paradigmlar oluşturmaktadır. Bu yaklaşım, teknoloji demokratikleşmesi açısından önemli bir model teşkil etmektedir.

1.3.4. Toplumsal Etki ve Erişilebilirlik

Açık kaynak geliştirme felsefesi, mikrotonal müzik teknolojilerinin geniş kitlelere ulaşmasını sağlamakta, müzik eğitimi ve yaratıcılık ekosistemlerini desteklemektedir.

1.4. Problem Cümlesi

"Mikrotonal müzik sistemlerinin elektronik ortamda hassas ve kullanıcı dostu bir şekilde kontrol edilebilmesi için, analog-modüler sentezleyicilerle uyumlu, ekonomik ve açık kaynak tabanlı bir dijital arayüz nasıl tasarlanabilir ve ± 1 cent'lik hassasiyetle çoklu format çıkış desteği nasıl gerçekleştirilebilir?"

1.5. Araştırmanın Alt Problemleri

- Mikrotonal frekans aralıklarının elektronik temsili için DAC çözünürlük sınırlarını aşacak optimizasyon stratejileri nasıl geliştirilebilir?
- İki yüz çeşitli müzikal modun sistematik kategorizasyonu ve sınırlı bellek kaynaklarında verimli depolanması nasıl organize edilebilir?
- MIDI pitch bend mekanizması kullanılarak cent-hassasiyetli mikrotonal kontrol için hangi algoritmik yaklaşım benimsenmelidir?
- On altı adımlı sekans yapısında çoklu işlev (solo/mute, tempo, rastgeleştirme, transpoze) yönetimi sistem performansını etkilemeden nasıl sağlanır?
- Kısıtlı donanım kaynaklarıyla görsel ve işitsel kullanıcı deneyimini optimize eden arayüz tasarımı nasıl gerçekleştirilir?
- Gelişime açık modüler yazılım yapısının bu sistemde sürdürülebilir implementasyonu nasıl sağlanır?

1.6. Araştırmanın Varsayımları

Bu çalışma kapsamında aşağıdaki temel varsayımlar benimsenmiştir:

- Mikrotonal müzik sistemlerinin elektronik kontrol ortamlarına başarılı adaptasyonu mümkündür
- Raspberry Pi Pico'nun işlemci ve bellek kapasitesi, tasarlanan sistemin gereksinimlerini karşılamaktadır
- 12-bit DAC çözünürlüğü, hedeflenen mikrotonal hassasiyet için yeterli teknik altyapıyı sağlamaktadır
- MicroPython programlama ortamı, gerçek zamanlı müzik uygulamaları için kabul edilebilir performans sunmaktadır
- Hedef kullanıcı profili, modüler sentez ve MIDI teknolojileri konusunda temel teknik bilgiye sahiptir.

1.7. Çalışmanın Sınırlılıkları

Bu araştırmanın bulguları, çalışmanın doğasından kaynaklanan belirli kısıtlamalar dahilinde değerlendirilmelidir:

1.7.1. Donanım Kaynaklı Sınırlılıklar

- Kullanılan mikrodenetleyicinin sahip olduğu 264 kb Statik Rastgele Erişimli Bellek dolayısıyla, aynı anda yeterince müzik sisteminin örneklenememesi
- 12-bit DAC'nin teorik olarak 0,24 cent hassasiyet üst sınırı oluşturması
- Tek kanallı CV çıkışının polifonik kontrol olanaklarını sınırlandırması.

1.7.2. Yazılım Geliştirme Sınırlılıkları

- MicroPython'un yorumlayıcı yapısından kaynaklanan performans kısıtları
- Garbage collection (atık toplama) süreçlerinin gerçek zamanlı işlemlerde potansiyel gecikmelere neden olması.

1.7.3. Test ve Doğrulama Sınırlılıkları

- Geliştirme ortamında yapılan hassasiyet testlerin sınırlı sayıda cihazla gerçekleştirilmesi
- Uzun süreli dayanıklılık ve kararlılık testlerinin zaman kısıtları nedeniyle sınırlı kalması

1.7.4. Müzikal İçerik Sınırlılıkları

- Müzikal mod koleksiyonunun, araştırmacının erişebildiği kaynaklarla sınırlı olması
- Referans kaynaklardaki farklılıkların mikrotonal hesaplamalarda belirsizlik yaratma potansiyeli

1.8. Literatür Değerlendirmesi ve Konumlandırma

Mevcut mikrotonal müzik teknolojileri literatürü incelendiğinde, bu çalışmanın bilimsel katkısı belirginleşmektedir:

1.8.1. MIDI Protokolü ve Mikrotonal Uygulamalar

MIDI protokolünün mikrotonal müzik uygulamalarındaki sınırlılıkları, 1980'lerin sonlarından itibaren araştırmacıların dikkatini çekmeye başlamıştır. Carlos (1987) ve Pressing (1987)'in bu alandaki öncü incelemeleri, geleneksel MIDI standardının pitch bend fonksiyonunun mikrotonal yaklaşımlar için yetersiz kaldığını ve çoklu kanal stratejilerinin implementasyon açısından karmaşık yapılar gerektirdiğini ortaya koymuştur. Bu sorunların kökeninde, MIDI protokolünün 12-ton eşit temperaman sistemi için optimize edilmiş yapısı yatmaktadır. İlerleyen yıllarda, bu kısıtlamaları aşmaya yönelik çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Çağdaş çözümler arasında dikkat çeken Jangler (2023) tarafından geliştirilen Faunatone sistemi, tracker-benzeri

kullanıcı arayüzü ile MIDI sequencing'i yeniden tasarlamıştır. Bu açık kaynak yazılım platformu, pitch-bend mesajlarını akıllıca kullanarak mikrotonal nota üretimi gerçekleştirmekte ve müzik teknolojisi camiasında yaygın olan Scala dosya formatı ile uyumluluk sağlamaktadır. Ticari ürünler açısından ise, Elektron Octatrack kullanıcı topluluğunun 2016-2017 yılları arasında geliştirdiği pitch-bend temelli teknikler, mevcut donanımların mikrotonal potansiyellerinin keşfedilmesinde önemli rol oynamıştır (Elektronauts Community, 2017). Bu deneyimler, kullanıcı odaklı inovasyon yaklaşımlarının teknoloji sınırlarını aşmadaki etkisini göstermektedir.

1.8.2. Türk Müziği ve Elektronik Adaptasyon Çalışmaları

Türk müziğinin elektronik ortamlarda temsili konusundaki akademik çalışmalar, teorik yaklaşımlar ile pratik uygulamalar arasındaki boşluğu gözler önüne sermektedir. Arel (1991) ve Yarman (2008)'in bu alandaki temel araştırmaları, Türk makam sisteminin elektronik müzik teknolojileriyle entegrasyonu için teorik çerçeve oluşturmuş, ancak uygulamalı çözümler sınırlı düzeyde kalmıştır. Bu durumun nedenleri arasında, geleneksel makam teorisinin karmaşık yapısının dijital sistemlere adaptasyonundaki zorluklar ve dönemin teknolojik kısıtları sayılabilir. Yarman'ın araştırma portföyü içinde yer alan 24-Ton HTML5 Makam Piyano uygulaması (Yarman & Mesut, 2020), web tabanlı çözümler açısından öncü nitelik taşımaktadır. Bu uygulama, hem geleneksel Arel-Ezgi-Uzdilek sistemini hem de Yarman'ın geliştirdiği 24-ton alternatif sistemini destekleyerek, müzik eğitimi platformlarında mikrotonal yaklaşımların öğretimi için teknolojik altyapı sunmaktadır. Karaosmanoğlu'nun (2010) Mus2 ve Mus2Okur yazılım paketleri, Türk makam müziği eserlerinin dijital analizi ve notasyonu alanında önemli katkılar sağlamıştır. Bu yazılımlar, histogram metodolojisine dayalı perde analiz algoritmaları içermekte ve geleneksel eserlerin mikrotonal karakteristiklerinin sayısal olarak incelenmesine olanak tanımaktadır. Aynı araştırmacının 53-EDO (53 Equal Divisions of Octave) sistem önerisi (Karaosmanoğlu, 2005), 24-perdeli Arel-Ezgi-Uzdilek standardının teorik ve pratik uygulamalardaki tutarsızlıklarına alternatif matematiksel çözüm arayışını temsil etmektedir. Bu yaklaşım, mikrotonal müzik teorisinde eşit temperaman yaklaşımlarının potansiyelini keşfetme açısından değerlidir. Ayangil ve Koşal Müzik Araştırma Merkezi (2000) tarafından başlatılan "Türk Müziği Geleneksel Perdelerini Çalabilen Piyano İmalı Projesi", akustik enstrüman adaptasyonu perspektifinden mikrotonal yaklaşımlara katkı sağlamıştır. Bu proje hem teorik

araştırma hem de pratik mühendislik çözümlerini birleştiren interdisipliner yaklaşımı ile dikkat çekmektedir.

1.8.3. Modüler Sentezleyici Teknolojilerinin Gelişimi

Modüler sentezleyici teknolojilerinin tarihsel gelişimi, mikrotonal müzik uygulamaları açısından zengin bir potansiyel sunmaktadır. Moog (1965) ve Buchla (1970)'nin analog sentezleyici tasarımlarından günümüzün Eurorack standardına uzanan bu süreç, kontrol voltaj (CV) kontrol sistemlerinin frekans manipülasyonundaki sınırsız olanaklarını ortaya koymuştur. Analog modüler sistemlerin doğası gereği, dijital sistemlerin ayırık nota yaklaşımından farklı olarak, sürekli frekans değişimleri ve mikrotonal aralıklar için ideal platform oluşturmaktadır. Çağdaş modüler sentezleyici ekosisteminde, mikrotonal uygulamalara özel olarak tasarlanmış cihazların gelişimi hızlanmıştır. Tubbutec (2023) firması tarafından üretilen uTune Eurorack modülü, bu alandaki teknik ilerlemelerin somut bir örneğini teşkil etmektedir. 16-bit çözünürlüklü MIDI'den CV'ye dönüştürücü olarak çalışan bu modül, mikrotonal akort kontrolü sağlamakta, sequencer dizi maskesi fonksiyonları ve gerçek zamanlı CV ile akort değişimi desteklemektedir. Bu özellikler, canlı performanslarda mikrotonal yaklaşımların pratik kullanımını kolaylaştırmaktadır. Benzer şekilde, Modor Music (2023) firmasının NF-1(m) model polifonik sentezleyicisi, mikrotonal destekli yazılım güncellemeleri (OS013 firmware) ile dikkat çekmektedir. Bu enstrüman, 1-64-EDO sistemlerinden başlayarak Erv Wilson'un hexany/dekany teorilerine dayalı karmaşık mikrotonal dizilere kadar geniş spektrumda destek sunmaktadır. Ayrıca, MTS (MIDI Tuning Standard) ve MPE (MIDI Polyphonic Expression) uyumluluğu, modern dijital müzik üretim ortamlarıyla entegrasyonu sağlamaktadır.

1.8.4. Analog ve Dijital Müzik Donanımlarında Mikrodenetleyicilerin Rolü

Mikrodenetleyici tabanlı müzik sistemi geliştirme alanındaki araştırmalar, açık kaynak donanım platformlarının müzik teknolojilerindeki potansiyelini göstermektedir. McLeod (2018) ve Jones (2020)'un Arduino ve Raspberry Pi ekosistemlerinde gerçekleştirdikleri müzik uygulaması araştırmaları, bu çalışmanın teknolojik temellerini destekleyen önemli referanslar oluşturmaktadır. Bu platformların düşük maliyet, yüksek esneklik ve geniş geliştirici topluluğu desteği özellikleri, müzik teknolojisi demokratikleşmesi açısından kritik öneme sahiptir. Dynamic Tonality araştırma grubu tarafından Aprechtl & Milne (2014) öncülüğünde geliştirilen Hex

sistemi, çoklu kanallı mikrotonal MIDI sequencer yaklaşımında lattice-tabanlı (kafes-yapısı) notasyon görselleştirmesi ve 200'den fazla akort dizisi koleksiyonu sunarak, mikrotonal kompozisyon araçlarında yenilikçi kullanıcı arayüzü tasarımının örneklerini vermektedir. Bu sistem, özellikle mikroton intervallerinin görsel temsili açısından pedagojik değer taşımaktadır. Eurorack modüler sistemi içinde faaliyet gösteren Frequency Central (2023) firmasının Little Melody modülü, 4-sesli üretken algoritmalara dayalı clock-divided sequencer (saat bölmeli sıralayıcı) yapısı ile Eurorack ortamında mikrotonal kontrol olanaklarını genişletmektedir. Bu modülün algoritmik kompozisyon yaklaşımı, deterministik olmayan müzikal yapıların mikrotonal sistemlerde nasıl oluşturulabileceğine dair önemli ipuçları vermektedir. Torso Electronics (2023) firmasının T-1 algoritmik MIDI sequencer cihazı, Euclidean ritim algoritmaları ile CV çıkış kombinasyonunu kullanarak, mikrotonal sekans uygulamalarında matematiksel desen yaklaşımlarının potansiyelini sergilemektedir. Bu cihazın algoritmik yaklaşımı, geleneksel sequencing paradigmalarının ötesinde, matematiksel müzik teorisi ile pratik performans araçlarının entegrasyonuna örnek teşkil etmektedir.

2. MİKROTONAL MÜZİK VE SES SENTEZLEYİCİ TEKNOLOJİLERİ

İnsanlık tarihinin farklı coğrafyalarında gelişen müzikal gelenekler, kendi kültürel bağlamlarında özgün akustik sistemler yaratmışlardır. Bu çeşitlilik, müzikal ifadenin evrensel dilinin ne denli zengin olduğunu göstermektedir. Batı müzikal geleneğinin on iki eşit parçaya bölünmüş oktav anlayışı, dünya müzik panoramasının yalnızca küçük bir kesitini temsil etmektedir. Küresel müzik kültürlerinin büyük çoğunluğu, bu standart yaklaşımdan çok daha karmaşık ve nüanslı frekans ilişkilerine dayalı sistemler geliştirmiştir. Çağdaş teknolojinin sunduğu olanaklar, bu zengin mikrotonal yapıların elektronik sentez platformlarıyla entegrasyonunu mümkün kılmakta ve geleneksel müzikal ifade biçimlerinin modern yorumlanması için benzersiz fırsatlar yaratmaktadır (Signell, 1977). Bu teknolojik-kültürel yakınlaşma hem müzikal mirasın korunması hem de yeni yaratıcı ifade biçimlerinin keşfi açısından kritik öneme sahiptir.

Mikrotonalite terimi, Batı müzik teorisinin temel yapı taşı olan yarım ses aralığından daha ince frekans farklılıklarının sistematik kullanımını ifade etmektedir. Bu yaklaşım, müzikal ifadenin spektrumunu genişletmenin yanı sıra, tarihsel müzik geleneklerinin çağdaş platformlarda yaşatılması ve yenilikçi kompozisyon tekniklerinin geliştirilmesi açısından çok boyutlu değer taşımaktadır (Tanrıkorur, 2003). Mikrotonal yaklaşımların önemli bir boyutu da müzikal algı ve psikoakustik deneyimin sınırlarını zorlaması, böylece hem icracılar hem de dinleyiciler için yeni estetik ufuklar açmasıdır. Bu perspektif, müziğin yalnızca eğlence aracı olmadığını, aynı zamanda kültürel kimlik ve tarihsel süreklilik taşıyıcısı olduğunu vurgulamaktadır.

Dünya müzik sistemlerinin mikrotonal zenginliği, çeşitli kültürel bölgelerde kendine özgü karakteristikler sergilemektedir. Türk müzikal geleneğinin makam sistemi, matematiksel hassasiyet ile estetik duyarlılığın harmanlandığı sofistike bir yapı sunmaktadır. Arap müzik teorisinin makam yaklaşımı, melodik progresyon ve modal karakteristiğinin mikrotonal aralıklarla nasıl şekillendiğinin örneklerini vermektedir. Hint alt kıtasının klasik müzik geleneğindeki raga sistemleri, mikrotonal yaklaşımların duygusal ve spiritüel boyutlarını keşfetmekte, her modal yapının belirli bir ruh halini

ve atmosferi temsil ettiğini göstermektedir. İran coğrafyasının dastgah sistemleri ise, makamsal yaklaşımların coğrafi ve kültürel varyasyonlarının ne denli zengin olabileceğini ortaya koymaktadır. Bu sistemlerin her biri, yalnızca müzikal teknik olmayıp, aynı zamanda o kültürün dünya görüşünün, estetik anlayışının ve tarihsel deneyiminin müzikal kodlaması niteliğindedir.

2.1. Müzikal Sistemlerin Matematiksel Temelleri ve Akort Yaklaşımları

Müzik sistemlerinin düzenlenmesi ve oktav içerisindeki ses aralıklarının matematiksel koordinasyonu, tamperaman kavramının özünü oluşturmaktadır. Bu kompleks süreç, akustik fizik kuralları ile müzikal estetik ihtiyaçların dengelenmesini gerektirmekte ve farklı tonalitelere eser icrası ile çoklu enstrüman uyumunun sağlanması açısından kritik önem taşımaktadır. Popley'in (1921) bu konudaki tespiti, "müzik sistemlerinin gelişimi, matematiksel oranlarla akustik gerçekliklerin uyumlaştırılması çabasıdır" (s. 67) şeklindedir ve tamperaman sistemlerinin temel paradoksunu özetlemektedir. Bu yaklaşım, müzikal ifadenin doğal zenginliği ile pratik kullanım gereksinimleri arasındaki sürekli gerilimi yansıtmaktadır. Tarihsel perspektiften bakıldığında, tamperaman sistemlerinin evrimi aslında müzikal kültürlerin teknolojik kısıtlarla uzlaşma çabalarının kronolojisi olarak da okunabilir (Karadeniz, 1982).

Çeşitli tamperaman yaklaşımlarının gelişimi, farklı müzikal geleneklerin özgün ihtiyaçlarına yanıt verme çabasını temsil etmektedir. Pisagor tamperamanı, adil tamperaman ve eşit tamperaman sistemleri, bu arayışın en belirgin örneklerini oluşturmaktadır. Her sistemin kendine özgü avantajları ve sınırlılıkları, müzikal uygulamalarda farklı sonuçlar doğurmaktadır. Bu durum, özellikle geleneksel müzik sistemlerinin çağdaş enstrüman teknolojileriyle entegrasyonunda ciddi zorluklar yaratmakta ve kültürel müzikal mirasın korunması açısından endişe verici gelişmelere neden olmaktadır. Wright (1978)'in bu konudaki gözlemleri, tamperaman sistemlerinin evrensel çözüm olmadığını, aksine her sistemin belirli müzikal bağlamlarda optimal sonuçlar verdiğini göstermektedir.

2.1.1. On İki Eşit aralıklı Tamperaman Sistemi ve Modern Batı Müziği

On iki eşit aralıklı tamperaman sistemi, oktavın matematiksel olarak eşit on iki parçaya bölünmesi prensibi üzerine kuruludur. Bu sistemde her yarım ton aralığının frekans

oranı $2^{1/12} \approx 1.05946$ olarak hesaplanmakta ve bu değer tüm aralıklar için sabit tutulmaktadır (Barbour, 1951). On sekizinci yüzyıldan itibaren Batı müzikal geleneğinin standart yaklaşımı haline gelen bu sistem, müzikal transpoze işlemlerinin kolaylığı ve enstrüman yapımındaki standardizasyon açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Sistemin en karakteristik özelliğı, herhangi bir temel frekans üzerinden başlayarak aynı aralık yapısının tekrarlanabilmesidir.

Johann Sebastian Bach'ın "Das Wohltemperierte Klavier" eseri, eşit tamperaman sisteminin müzikal potansiyelini sergileyen en önemli historik örneklerden biridir. Bu kompozisyon, sistemin tüm tonalitelerdeki kullanılabilirliğini kanıtlayarak, müzikal modülasyon ve harmonik karmaşıklığın yeni boyutlarını keşfetmiştir. Ancak bu matematiksel eşitlik yaklaşımı, doğal harmonik serilerin akustik gerçekliklerinden sapmaları da beraberinde getirmektedir. Bu sapmaların en belirgin sonucu, geleneksel müzik sistemlerinin karakteristik özelliklerinin kaybolmasıdır.

Türk müziğinin temel yapı taşlarından olan mikrotonal sistemin çağdaş teknolojilerle uyumsuzluğu, müzik alanındaki en kritik sorunlardan birini oluşturmaktadır. Ungay'ın (1981) bu konudaki tespiti oldukça dikkat çekicidir: "Klasik Türk müziğinin en önemli özelliğı olan koma aralıkları, Batı'nın 12 eşit sesli sistemiyle uyuşmaz. Bu durum, müziğimizin otantik yapısını bozmaktadır" (s. 78). Bu yaklaşım, standartlaşmış müzik teknolojilerinin kültürel özgünlük üzerindeki tahribat potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır.

Benzer şekilde Beken (2003), teknolojik araçların geleneksel müzik yapıları üzerindeki dönüştürücü etkisine dikkat çekmektedir: "Elektronik org ve ses sentezleyiciler, Türk müziğinin komalı seslerini çalamadığı için, müzisyenler bu enstrümanlarla çalarken farkında olmadan makamları 'deforme eder'. Bu durum, özellikle genç neslin geleneksel ses sisteminden uzaklaşmasına yol açmaktadır" (s. 112). Bu değerlendirme, teknolojik standardizasyonun sadece müzikal yapıları değil, aynı zamanda kültürel aktarım süreçlerini de olumsuz etkilediğini göstermektedir. Her iki perspektif birlikte ele alındığında, müzik teknolojisi tasarımında kültürel çeşitliliğin korunması ve mikrotonal sistemlerin desteklenmesi gerekliliğı daha net bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

2.1.2. Mikrotonal Yaklaşımlar: Kültürel Çeşitlilik ve Akustik Zenginlik

Mikrotonal müzik sistemleri, yarım ton aralığından daha ince frekans farklılıklarının sistematik kullanımını içeren müzikal yaklaşımları kapsamaktadır. Bu sistemlerin teorik temelleri, doğal harmonik seriler ve akustik rezonans fenomenleri üzerine kuruludur ve insan işitme kapasitesinin çok daha nüanslı frekans ayrımlarını algılayabildiğini göstermektedir (Ellis, 1885). Dünya müzik kültürlerindeki mikrotonal yapıların çeşitliliği, insanlığın müzikal ifade potansiyelinin ne denli geniş olduğunu ortaya koymaktadır.

Hint müzikal geleneğinin shruti sistemi, oktavy yirmi iki eşitsiz parçaya bölerek mikrotonal yaklaşımların karmaşıklığını sergilerken, Arap müzik teorisindeki makam sistemleri çeyrek ton aralıklarının sistematik kullanımına dayanmaktadır. İran coğrafyasının dastgah sistemleri ise kendine özgü mikrotonal karakteristikleri ile bu zenginliğe katkıda bulunmaktadır. Bu çeşitlilik, insan kulağının yarım ton aralığından çok daha ince ses farklılıklarını sadece algılamakla kalmayıp, aynı zamanda bunları anlamlı müzikal yapılar olarak yorumlayabildiğini kanıtlamaktadır (During, 1988).

Çağdaş bestecilerin mikrotonal keşifleri, bu geleneksel zenginliğin modern müzik dilinde yeni yorumlarını sunmaktadır. Alois Hába, Harry Partch ve Ben Johnston gibi öncü besteciler, Batı müzikal geleneğinin sınırlarını zorlamış ve mikrotonal yaklaşımları sistematik kompozisyon tekniklerine dönüştürmüştür. Bu çalışmalar, müzikal ifadenin spektrumunu genişletmiş ve yeni estetik paradigmaların keşfine katkıda bulunmuştur (Gilmore, 1995).

Dijital müzik teknolojilerinin mikrotonal sistemlerle entegrasyonu, çağdaş müzik üretiminde devrimsel bir dönüşüm yaratmaktadır. Roads'un (2015) bu konudaki görüşü, teknolojik potansiyelin sınırsızlığına işaret etmektedir: "Dijital ses işleme ve sentezleme teknolojileri, mikrotonal müziğin sınırlarını genişletmiştir. Geleneksel enstrümanların fiziksel kısıtlamaları olmadan, bilgisayar tabanlı bestecilik, müzisyenlere sonsuz aralık ve tını olanakları sunar" (s. 189). Bu yaklaşım, analog sınırlamaların aştığı noktada dijital çözümlerin sunduğu yaratıcı özgürlüğü vurgulamaktadır.

Mikrotonal yapıların insan algısı üzerindeki etkisi ise müzikal deneyimin derinliğini artıran önemli bir boyut oluşturmaktadır. Lamb'in (2017) bu alandaki değerlendirmesi, algısal zenginliğin önemini ortaya koymaktadır: "Mikrotonal aralıklar, dinleyicinin

işitsel algısını genişletir ve geleneksel olmayan harmonik ilişkiler keşfetmesine olanak tanır. Bu, müziğin sadece bir ses dizisi değil, aynı zamanda bir deneyim olduğunu gösterir" (s. 112). Bu perspektif, mikrotonal müziğin salt teknik bir uygulama olmayıp, estetik ve bilişsel boyutları olan kapsamlı bir sanat formu olduğunu kanıtlamaktadır. Her iki yaklaşım birleştiğinde, mikrotonal müzik teknolojilerinin hem teknik hem de artistik potansiyelinin tam olarak değerlendirilebileceği görülmektedir.

2.1.3. Mikrotonalite ve Türk Makam Geleneği İlişkisi

Osmanlı dönemi müzikal mirasının en değerli unsurlarından olan makam sistemi, ses aralıklarının incelikli organizasyonu açısından dünya müzik literatüründe eşsiz bir konuma sahiptir. Bu zengin yapının temelini oluşturan mikrotonal örgü, çeyrek ton değerlerinden daha küçük aralıkların sistematik kullanımıyla karakterize edilmektedir. Söz konusu sistem, matematiksel hassasiyet ile estetik duyarlılığın mükemmel birleşimini temsil ederken, aynı zamanda kültürel belleğin müzikal kodlarını barındırmaktadır.

Klasik dönem nazariyatçılarının ortaya koyduğu teorik çerçeve, yüzyıllar boyunca makamsal anlayışın şekillenmesinde belirleyici rol oynamıştır. Bu dönemde geliştirilen perde sistematigi, tonal organizasyonun matematiksel temellerini güçlendirirken, icra geleneğinin dinamik yapısını da desteklemiştir. Geleneksel yaklaşımların çağdaş yorumlanması sürecinde ortaya çıkan farklı metodolojik perspektifler, makam teorisinin günümüz koşullarında yeniden değerlendirilmesi gerekliliğini gündeme getirmektedir.

Modern müzik teknolojilerinin gelişimi, geleneksel mikrotonal yapıların çağdaş ortamlarda temsiliyeti konusunda yeni perspektifler açmaktadır. Roads'un (2015) bu alandaki tespiti, teknolojik imkanların sunduğu potansiyeli vurgulamaktadır: "Mikrotonal müzik, bilgisayar tabanlı ses sentezi sayesinde yeni bir boyut kazanmıştır. Geleneksel enstrümanların sınırlarını aşan bu teknoloji, bestecilere sınırsız akustik olanaklar sunar" (s. 189). Bu yaklaşım, dijital platformların geleneksel müzik sistemlerinin ifadesinde sunduğu devrimsel olanakları ortaya koymaktadır.

Yapay zekâ teknolojilerinin müzikal yaratım süreçlerine entegrasyonu, mikrotonal sistemlerin analizi ve sentezi açısından çığır açıcı gelişmeler yaratmaktadır. Hajdu'nun (2018) konuya ilişkin değerlendirmesi, algoritmik yaklaşımların potansiyelini göstermektedir: "Yapay zekâ ve algoritmik kompozisyon araçları, mikrotonal

sistemleri analiz ederek, insan kulağının henüz alışık olmadığı yeni armonik yapılar üretebilir. Bu, müziğin geleceğini şekillendiren devrimci bir adımdır" (s. 134). Bu perspektif, geleneksel müzik bilgisinin teknolojik araçlarla genişletilmesi sürecinin önemini vurgulamaktadır.

Çağdaş müzik üretim paradigmalarında makamsal karakteristiklerin korunması ve geliştirilmesi hem kültürel süreklilik hem de artistik inovasyon açısından kritik önem taşımaktadır. DAW yazılımlarının mikrotonal yapıları destekleme kapasitesinin artması, geleneksel makam müziğinin elektronik ortamlarda otantik temsiliyetini mümkün kılmaktadır. Bu teknolojik ilerleme, müzikal mirasın çağdaş yorumlanması sürecinde yeni yaratıcı fırsatlar sunmaktadır.

Elektronik müzik estetiğinin makamsal yapılarla buluşması, hibrit müzikal dillerin ortaya çıkmasına zemin hazırlamaktadır. Bu sentez süreci, geleneksel icra geleneğinin dinamizmini koruyarak, çağdaş müzikal ifade biçimlerinin zenginleşmesine katkıda bulunmaktadır. Mikrotonal elektronik sentezin gelişimi, sadece teknik bir başarı olmayıp, aynı zamanda kültürler arası müzikal diyalogun kurulmasında önemli bir araç rolü üstlenmektedir.

Günümüzde Türk makam müziğinin mikrotonal karakteristiklerinin elektronik sentez teknolojileriyle ifadesi konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmektedir. Bu gelişmeler hem geleneksel müzikal mirasın korunması hem de çağdaş müzik üretim paradigmalarında yeni yaratıcı olanakların keşfi açısından kritik değer taşımaktadır. Dijital ses işleme teknolojilerinin gelişimi, koma aralıklarının hassas programlanması ve elektronik ortamda gerçekçi temsili açısından benzersiz fırsatlar sunmaktadır (Bozkurt, 2012). Bu teknolojik olanaklar, geleneksel makam müziğinin otantik karakteristiklerini koruyarak, çağdaş müzikal ifade biçimlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Günümüzde Türk makam müziğinin mikrotonal karakteristiklerinin elektronik sentez teknolojileriyle ifadesi konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmektedir. Her yeni gelişme hem geleneksel müzikal mirasın korunması hem de çağdaş müzik üretim paradigmalarında yeni yaratıcı olanakların keşfi açısından kritik değer taşımaktadır. Dijital ses işleme teknolojilerinin gelişimi, koma aralıklarının hassas programlanması ve elektronik ortamda gerçekçi temsili açısından benzersiz fırsatlar sunmaktadır (Bozkurt, 2012). Bu teknolojik olanaklar, geleneksel makam müziğinin otantik

karakteristiklerini koruyarak, çağdaş müzikal ifade biçimlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

2.2. Elektronik Ses Üretim Teknolojilerinin Evrimi ve Çağdaş Uygulamalar

Bu bölümde Elektronik ses ve müzik teknolojilerinin tarihsel gelişim süreçleri ve bu alanda geliştirilen modern uygulamalar ele alınmıştır.

2.2.1. Modüler Sentezleyicilerin Tarihsel Gelişimi ve Teknolojik Dönüşümler

Modüler Elektronik müzik teknolojilerinin yirminci yüzyıldaki gelişimi, müzikal ifadenin sınırlarını radikal biçimde genişleten ve ses sanatının yeni boyutlarını keşfeden devrimsel bir süreç olmuştur. Bu teknolojik evrim, geleneksel akustik enstrümanların fiziksel kısıtlarını aşarak, önceden hayal edilemeyecek ses dünyalarının kapılarını aralamıştır (Holmes, 2012). Modüler sentezleyici sistemlerinin ortaya çıkışı ise bu sürecin en belirleyici dönüm noktalarından birini oluşturmuş ve ses tasarımı paradigmalarında köklü değişimler yaratmıştır.

Elektronik ses üretim teknolojilerinin evrimsel sürecinde modüler sentez yaklaşımı, müzikal yaratım paradigmalarının radikal dönüşümünde kritik rol oynamıştır. Bu teknolojik devrimin temelleri, post-endüstriyel toplumun teknolojik altyapısından beslenirken, aynı zamanda sanatçıların yaratıcı özgürlük arayışlarına yanıt verme konusunda benzersiz bir pozisyon işgal etmiştir. Modüler sistemlerin ortaya çıkışı, müzikal enstrümantasyonun geleneksel sınırlarını yıkan epistemolojik bir kırılma anını temsil etmektedir.

Soğuk savaş döneminin teknolojik dinamikleri, elektronik müzik alanında beklenmedik sonuçlar doğurmuştur. Askeri araştırma projelerinden türeyen inovasyon dalgası, sivil uygulamalar aracılığıyla sanat dünyasına sızmış ve müzikal ifadenin temel yapı taşlarını yeniden şekillendirmiştir. Pinch ve Trocco'nun (2004) bu süreçteki gözlemi oldukça çarpıcıdır: "1960'ların modüler sentez patlaması, müzikal teknolojinin askeri-endüstriyel kompleksten sanatçıların stüdyolarına doğru yaptığı radikal göçün en çarpıcı örneğidir. Moog ve Buchla'nın sistemleri, soğuk savaş teknolojisinin beklenmedik şekilde karşı kültür tarafından benimsenmesinin simgesi haline gelmiştir" (s. 143). Bu teknolojik transferin kültürel sonuçları, müzik endüstrisinin yapısal dönüşümünde belirleyici etki yaratmıştır.

Modüler sentez sistemlerinin felsefi boyutu, sadece teknik bir gelişim olmayıp, müzikal bilincin paradigmatik değişimini ifade etmektedir. Douglas'ın (2002) konuya yaklaşımı, bu dönüşümün derinliğini vurgulamaktadır: "Modüler sentezleyiciler yalnızca teknik cihazlar değil, aynı zamanda müzisyenlerin sesle kurduğu ilişkiyi temelden değiştiren epistemolojik araçlardır. Bu sistemler, kullanıcıya sesin atomik yapısını manipüle etme gücü vererek geleneksel beste pratiklerini altüst etmiştir" (s. 87). Bu perspektif, modüler teknolojinin sadece ses üretim aracı olmayıp, müzikal düşüncenin kendisini şekillendiren bir yaklaşım haline geldiğini göstermektedir.

Analog dönemin sentez teknolojileri, dijital çağın algoritmik yaklaşımlarından farklı olarak, müzisyene fiziksel materyal ile doğrudan etkileşim kurma imkânı sunmuştur. Voltaj kontrollü osilatörler, filtreler ve zarflar aracılığıyla kurulan karmaşık sinyal yönlendirme ağları, müzikal yaratım sürecini interaktif bir keşif deneyimine dönüştürmüştür. Bu yaklaşım, önceden programlanmış ses bankalarından ziyade, gerçek zamanlı işitsel manipülasyon odaklı bir estetik anlayışın gelişmesine zemin hazırlamıştır.

Modüler sentez estetiğinin çağdaş müzik kültürü üzerindeki etkisi, elektronik müziğin alt türlerinin çeşitlenmesi ve hibrit müzikal formların ortaya çıkması şeklinde kendini göstermektedir. Bu teknolojik yaklaşım, müzikal kompozisyonun çizgisel yapısını örnekleyerek ederek, loop (döngü) tabanlı ve tekstürel yaklaşımların gelişmesine katkıda bulunmuştur. Sonuç olarak, modüler sentez sadece bir teknolojik inovasyon değil, müzikal estetik ve metodolojinin yeniden tanımlandığı kültürel bir fenomen olarak değerlendirilmelidir.

2.2.2. Robert Moog ve Modüler Sentezleyici Devrimi

Elektronik müzik teknolojilerinin tarihsel gelişiminde Bob Moog'un katkıları, ses üretim paradigmalarının köklü dönüşümünde merkezi bir konum işgal etmektedir. Columbia Üniversitesi'ndeki akademik araştırmaları süresince elektronik kompozisyon alanındaki pratisyenlerle kurduğu etkileşimler, ona çağdaş ses teknolojilerinin sınırlılıklarını gözlemlene ve alternatif çözümler geliştirme fırsatı sunmuştur. Herbert Deutsch ile 1963'te başlayan yaratıcı ortaklığı, modüler sentez konseptinin teorik temellerinin pratik uygulamaya dönüştürülmesi sürecinde belirleyici rol oynamıştır.

Bu teknolojik inovasyonun kültürel bağlamı, dönemin sanatsal ve teknolojik dinamikleriyle yakından ilişkilidir. Sterne'in (2012) değerlendirmesi bu sürecin toplumsal boyutunu vurgulamaktadır: "Moog'un modüler sistemleri, yalnızca bir müzik enstrümanı değil, aynı zamanda 1960'ların deneysel sanat ve teknoloji kültürünün bir manifestosuydu. Bu cihazlar, sanatçıların teknolojiyle kurduğu ilişkiyi kökten değiştirerek, sesin üretim sürecine doğrudan müdahale etme özgürlüğü sağladı" (s. 312). Bu perspektif, teknolojik gelişimin sadece teknik bir başarı olmayıp, aynı zamanda kültürel paradigmalardan değişimini temsil ettiğini göstermektedir.

1964 yılında piyasaya sürülen ilk ticari Moog Modüler Sentezleyici, VCO (Voltaj Kontrollü Osilatörler), VCF (Voltaj Kontrollü Filtreler) ve VCA (Voltaj Kontrollü Amplifikatörler) gibi temel bileşenlerin modüler organizasyonunu sunmuştur (Young, 1982).

Ticari başarının yanı sıra, bu teknolojinin sanatsal etkisi de dikkate değer boyutlara ulaşmıştır. Wendy Carlos'un "Switched-On Bach" albümü, Moog sentezleyicilerin popüler müzik kültüründeki etkisini göstermektedir. Bu proje, elektronik araçların klasik repertuarı yeniden yorumlama kapasitesini kanıtlarken, aynı zamanda geleneksel ve çağdaş müzikal yaklaşımlar arasında köprü kurma işlevi görmüştür.

Modüler sentez teknolojisinin yaygınlaşması, müzikal yaratım süreçlerinde demokratikleşme etkisi yaratmıştır. Geleneksel enstrümantasyon sınırlarının aşılması, müzisyenlere işitsel manipülasyon konusunda benzeri görülmemiş kontrol imkanları sunmuştur. Bu gelişme, elektronik müziğin sadece deneysel çevrelerde değil, ana akım müzik prodüksiyon süreçlerinde de kabul görmesini sağlamıştır.

2.2.3. Don Buchla ve Alternatif Modüler Sentez Felsefesi

Don Buchla'nın elektronik müzik teknolojisine yaklaşımı, çağdaş olan diğer tasarımcılardan radikal şekilde farklılaşan bir estetik anlayışı temsil etmektedir. Kaliforniya'nın deneysel sanat ortamından beslenen bu perspektif, müzikal kontrol mekanizmalarının yeniden kavramsallaştırılması yönünde devrimsel adımlar atmıştır. Buchla'nın tasarım felsefesi, geleneksel müzik teorisinin normatif yapılarına meydan okuyarak, interaktif teknolojinin yaratıcı potansiyelini maksimize etmeye odaklanmıştır.

Pazardaki konvansiyonel yaklaşımlardan farklı olarak, Buchla sistemleri müzisyenlere alternatif performans paradigmaları sunmuştur. Holmes'un (2020) bu konudaki

değerlendirmesi, teknolojik inovasyonun sanatsal boyutunu vurgulamaktadır: "Buchla'nın tasarımları, müzikal arayüzlerde devrim yaratarak geleneksel klavye paradigmasını yıktı. Dokunmatik yüzeyler ve parametrik kontroller sayesinde, müzisyenler enstrümanla daha organik bir ilişki kurabildiler. Bu yaklaşım, performans ve kompozisyon arasındaki sınırları belirsizleştirdi" (s. 215). Bu teknolojik yaklaşım, müzikal yaratım sürecini lineer kompozisyon mantığından çıkararak, real-time (gerçek zamanlı) manipülasyon odaklı bir estetik anlayışa doğru evrimleştirmiştir.

Buchla sistemlerinin kültürel etkisi, sadece teknik özellikleriyle sınırlı kalmamış, dönemin sosyo-kültürel dinamikleriyle de güçlü bağlantılar kurmuştur. Roads'un (2015) perspektifi, bu teknolojinin sanat tarihindeki konumunu açıklığa kavuşturur: "Buchla 200 serisi, sadece bir müzik aleti değil, aynı zamanda 1960'ların deneysel sanat ruhunu somutlaştıran bir sanat eseri idi. Her kontrol elementi, kullanıcıyı öngörülebilir kalıplardan uzaklaşmaya ve yeni müzikal keşiflere zorluyordu" (s. 167). Bu yaklaşım, teknolojik objeler ile sanatsal ifade arasında kurulan ilişkinin karmaşıklığını ortaya koymaktadır.

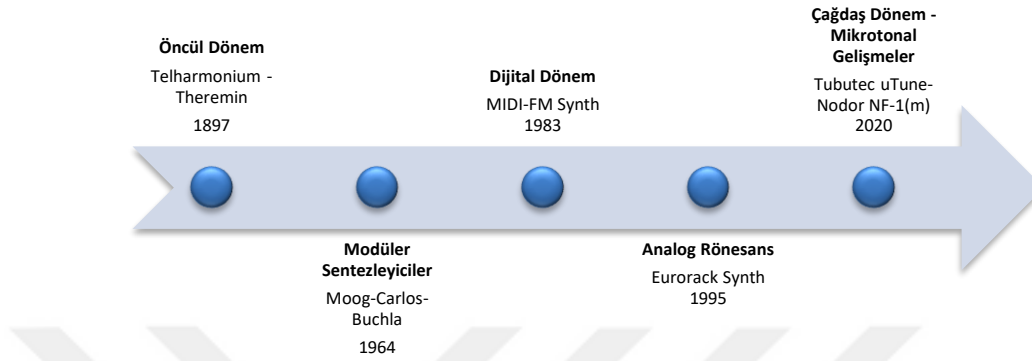
Coğrafi temelli sentezleyici kültürlerinin ortaya çıkışı, elektronik müzik teknolojisinin gelişiminde önemli sosyolojik dinamikler yaratmıştır. "Batı Yakası" ve "Doğu Yakası" yaklaşımları arasındaki felsefi farklılıklar, modüler sentez ekosisteminin çeşitlenmesine ve farklı estetik paradigmaların kristalleşmesine katkıda bulunmuştur. Bu bölgesel farklılaşma, teknolojik inovasyonun kültürel bağlamlarla ne denli yakından ilişkili olduğunu göstermektedir.

1970'lerin ortalarından itibaren modüler sentez teknolojilerinin popülerleşmesi, alternatif üreticilerin pazara girişiyle momentumunu artırmıştır. EMS, ARP ve diğer imalatçı firmalar, her biri kendine özgü tasarım felsefesi benimseyerek, elektronik müzik estetiğinin çeşitlenmesine katkıda bulunmuşlardır. Progressive rock, krautrock ve erken ambient müzik akımlarının temsilcileri, bu teknolojileri yaratıcı süreçlerinin merkezine konumlandırarak, elektronik müziğin ana akım kültürde kabul görmesini sağlamışlardır.

Modüler sentez yaklaşımının uzun vadeli etkileri, çağdaş müzik prodüksiyon metodolojilerinde hala gözlemlenebilmektedir. DAW yazılımlarının modüler routing özellikleri, hardware-software hibrit sistemlerin popülaritesi ve eurorack formatının yeniden canlanması, Buchla'nın öncülük ettiği tasarım prensiplerinin günümüzdeki

yansımaları olarak değerlendirilebilir. Bu süreklilik, teknolojik inovasyonun döngüsel karakterini ve yaratıcı araçların kültürel hafızadaki kalıcılığını kanıtlamaktadır.

Şekil 1. Modüler Sentezleyici Zaman Çizelgesi (1897-2020)



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur, 2025.

2.2.4. Dijital Devrim ve Analog Sistemlerin Geri Çekilme Süreci

Elektronik müzik dünyasında 1980'li yıllar, teknolojik paradigmaların köklü bir şekilde değiştiği kritik bir dönemeç olarak tarihe geçmiştir. Bu dönemde dijital sentezleyici teknolojilerinin piyasaya sürülmesi, müzik endüstrisinin geleneksel analog yaklaşımlardan radikal bir kopuş yaşamasına neden olmuştur. Dijital sentez teknolojilerinin ortaya çıkışı ve özellikle 1980'lerin ortalarındaki hızlı yayılımı, analog sentezleyici üreticilerini ciddi ekonomik zorluklarla karşı karşıya bırakmıştır.

Bu teknolojik dönüşümün en belirgin örneği, Yamaha firmasının DX7 modeli dijital sentezleyicisinin piyasaya sunulması ile ortaya çıkmıştır. Bu cihazın başarısının arkasında yatan temel faktörler, analog alternatiflerine kıyasla sunduğu üstün pratik avantajlarda yatmaktadır. Taşınabilirlik açısından devrim niteliğinde olan bu dijital sistemler, analog modüllerlerinin hacimli ve ağır yapılarına karşın kompakt tasarımları ile müzisyenlere emsalsiz hareket kabiliyeti sunmuştur. Ekonomik açıdan ise, üretim maliyetlerindeki dramatik düşüş, bu teknolojileri geniş müzisyen kitlelerinin erişimine açmıştır. Belki de en önemlisi, dijital teknolojinin doğasından kaynaklanan preset (hazır ayar) kaydetme ve geri çağırma yetenekleri, analog sistemlerin manuel ayarlama gerektiren zahmetli süreçlerini tamamen ortadan kaldırmıştır (Chadabe, 1997). Bu özelliklerin kombinasyonu, dijital sentezleyicilerin pazar hakimiyetini hızla sağlamasına neden olmuştur.

2.2.4.1. Teknolojik Paradigma Değişiminin Teorik Temelleri

Stanford Üniversitesi'nin araştırma laboratuvarlarında gerçekleştirilen dijital sentez çalışmaları, elektronik müzik teknolojisinin paradigmatik dönüşümünde merkezi rol oynamıştır. John Chowning'in öncülük ettiği FM sentez metodolojisi, ses üretim teknolojilerinin analog sınırlarını aşarak, matematiksel algoritmaların müzikal yaratım süreçlerindeki potansiyelini keşfetmiştir. Bu gelişme, müzik teknolojisi alanında hardware-based (donanım tabanlı) yaklaşımlardan software-oriented (yazılım odaklı) metodolojilere geçişin temelini atmıştır.

Akademik araştırma ortamından doğan bu inovasyon, müzikal estetik paradigmalarında köklü değişimlere yol açmıştır. Emmerson'ın (2007) değerlendirmesi, bu dönüşümün kapsamını vurgulamaktadır: "Chowning'in FM sentez algoritması, yalnızca teknik bir buluş değil, aynı zamanda dijital çağın müzikal estetiğini kökten değiştiren bir dönüm noktasıydı. Stanford'daki bu keşif, ses tasarımının fiziksel enstrümanlardan soyut matematiksel modellere evrilmesinin yolunu açtı" (s. 93). Bu perspektif, teknolojik inovasyonun sadece teknik bir başarı olmayıp, aynı zamanda müzikal düşüncenin epistemolojik temellerini yeniden şekillendiren bir süreç olduğunu göstermektedir.

Dijital metodolojilerin analog sistemlere karşı sunduğu avantajlar, o dönemin müzik teknolojisi geliştiricileri arasında yeni bir fikir birliği oluşturmuştur. Analog devrelerin olağan belirsizlikleri, bileşen değişkenlikleri ve çevresel faktörlere bağımlılıkları karşısında, dijital sistemlerin sunduğu deterministik davranış ve mutlak tekrarlanabilirlik, endüstriyel standardizasyon süreçlerinde kritik öneme sahip hale gelmiştir. Bu teknolojik tercih, 1980'li yılların müzik prodüksiyon estetiğini şekillendiren temel dinamiklerden biri olmuştur.

2.2.4.2. Analog Rönesans: Teknolojik Nostalji ve Yeniden Keşif Süreci

2000'li yılların başlarında, elektronik müzik dünyasında beklenmedik bir paradigma kayması yaşanmıştır. Bu dönemde, analog sentezleyicilerin karakteristik "sıcak" tınısal özelliklerine ve modüler sistemlerin sunduğu yaratıcı esnekliğe yönelik artan nostaljik ilgi, müzik topluluklarında yeniden canlanma hareketini başlatmıştır. Bu gelişme, özellikle elektronik müzik alt kültürlerinde "Analog Rönesans" olarak adlandırılan kapsamlı bir yeniden canlanma sürecinin ortaya çıkmasına neden

olmuştur. Bu süreç, Eurorack formatının geliştirilmesi ve yaygınlaşması ile momentum kazanmıştır (Doepfer, 1995).

Bu yeniden canlanma hareketinin arkasında, dijital sentez teknolojilerinin teknik mükemmelliğine rağmen, müzikal ifade açısından analog sistemlerin sunduğu öngörülemez karakter ve organik tınısal nüansların özlenmesi yatmaktadır. Müzisyenler, dijital sistemlerin matematiksel kesinliğinin yaratıcı süreçlerde bazen kısıtlayıcı olabileceğini fark etmeye başlamışlar ve analog devrelerinin doğasında yer alan "kusurlarının" aslında müzikal açıdan değerli özellikler olduğunu yeniden keşfetmişlerdir.

2.2.4.3. Eurorack Formatının Demokratikleşme Misyonu

Bu dönemin öncü figürlerinden Dieter Doepfer'in Eurorack formatı geliştirme motivasyonu hakkındaki açıklaması, teknolojik demokratikleşme vizyonunu yansıtmaktadır: "Eurorack standardının amacı, modüler sistemleri stüdyo dışına taşıyarak daha fazla müzisyen için uygun maliyetli ve taşınabilir hale getirmektir (Doepfer, 2012, s. 112). Bu vizyon, modüler sentez teknolojilerinin elit çevrelerden çıkarak ana akım müzik üretim ortamlarına entegrasyonunu hedeflemiştir.

Doepfer'in bu yaklaşımı, 1970'lerde büyük modüler sistemlerin yalnızca profesyonel stüdyoların ve varlıklı müzisyenlerin erişebildiği lüks teknolojiler olduğu gerçeğine bir yanıt niteliği taşımıştır. Eurorack formatının kompakt boyutları, standardize edilmiş bağlantı protokolleri ve görece ekonomik üretim maliyetleri, modüler sentez dünyasının kapılarını bağımsız müzisyenlere, elektronik müziği hobi edinenlere ve akademik kurumlara açmıştır.

2.2.4.4. Çağdaş Hibrit Yaklaşımlar ve Mikrotonal Potansiyeller

Bu yeniden canlanma sürecinin en önemli sonuçlarından biri, geleneksel analog devre tasarımının çağdaş üretim metodolojileri ve malzeme bilimi ilerlemeleriyle entegrasyonu olmuştur. Modern analog modüller, klasik dönemin tınısal karakteristiklerini korurken, güvenilirlik, kalibrasyon stabilitesi ve üretim tutarlılığı açısından çok daha gelişmiş performans sunmaktadır. Bu teknolojik hibridizasyon, mikrotonal müzik uygulamaları için daha önce mümkün olmayan hassasiyet ve kontrol olanakları yaratmıştır.

Günümüzde modüler sentezleyici ekosistemi, yalnızca elektronik müzik üreticilerinin değil, aynı zamanda etnomüzikoloji araştırmacılarının, kompozisyon akademisyenlerinin ve geleneksel müzik sistemlerini çağdaş teknolojik araçlarla yeniden yorumlama amacı güden sanatçıların da yoğun ilgisini çekmektedir. Bu interdisipliner yaklaşım, analog modüler teknolojilerinin mikrotonal müzik araştırmalarında kritik bir rol oynamasının yolunu açmıştır.

Bu gelişmelerin sonucunda, analog ve dijital yaklaşımların karşıt paradigmlar olarak değil, birbirini tamamlayan teknolojik araçlar olarak algılanması yaygınlaşmıştır. Mikrotonal müzik uygulamaları perspektifinden, analog sistemlerin kesintisiz frekans kontrolü yetenekleri ile dijital sistemlerin hassas hesaplama ve bellek kapasiteleri, hibrit çözümlerde birleştirilerek yeni yaratıcı olanaklar sunmaktadır

2.2.5. Elektronik Kontrol Voltajı Sistemleri ve Müzikal Standardizasyon

Bu bölümde modüler sentezleyiciler için kritik öneme sahip olan kontrol voltajı sistemleri incelenmektedir.

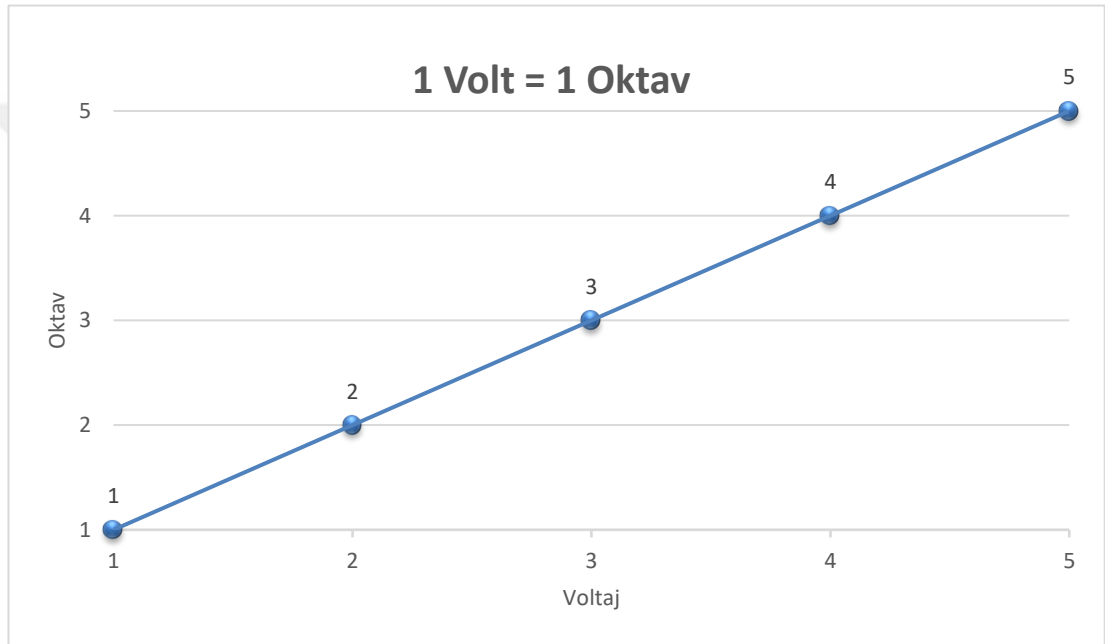
2.2.5.1. CV/GATE İletişim Protokollerinin Temel Dinamikleri

Modüler sentezleyici ekosistemlerinin fonksiyonel bütünlüğünde en kritik rol oynayan unsurlardan biri, farklı elektronik modüller arasında hassas veri iletişimi sağlayan kontrol voltajı (CV) ve gate sinyalizasyon protokolleridir. Bu sofistike iletişim sistemleri, modüler sentezleyicilerin benzersiz esneklik ve güçlü performans karakteristiklerinin temel taşıyıcı mekanizmasını oluşturmakta ve özellikle mikrotonal müzik uygulamalarında sub-cent (cent altı) hassasiyetinde frekans kontrolü sağlayan kritik altyapıyı temsil etmektedir (Strange, 1983). Bu protokollerin tarihsel gelişimi, elektronik müzik teknolojilerinin evriminde paradigmatik değişimleri yansıtmaktadır.

Elektronik modüller arasındaki interaktif iletişim sistemlerinin gelişimi, analog bilgisayar teknolojilerinden ödünç alınan metodolojik yaklaşımlarla başlamıştır. Pinch ve Trocco'nun (2009) belirttiği gibi, "Moog'un voltaj kontrollü sistemleri, aslında 1950'lerde analog bilgisayarlarda kullanılan programlama tekniklerinden esinlenmiştir. Müzikal parametrelerin lineer voltaj değişkenleriyle kontrolü, elektronik müziğin en önemli metodolojik atılımlarından biridir" (s. 145). Bu teknolojik transferin müzikal uygulamalara adaptasyonu, ses sentezinde yeni yaratıcı olanakların keşfedilmesine zemin hazırlamıştır.

Endüstriyel standardizasyon sürecinin en kritik kilometre taşlarından biri olan 1V/Oktav protokolünün benimsenmesi, modüler sentez topluluğunun organik gelişiminde belirleyici rol oynamıştır. Snowden'in (2018) vurguladığı üzere, "1V/Oktav standardının evrensel kabulü, farklı üreticilerin modüllerinin birbirleriyle uyumlu çalışmasını sağlamıştır. Bu standartlaşma olmasaydı, modüler sentez topluluğu bugünkü canlılığına asla ulaşamazdı" (s. 89). Bu standardın mikrotonal müzik uygulamalarındaki önemi, minimal voltaj değişikliklerinin bile hassas frekans ayarlamalarına olanak tanınması açısından kritik değer taşımaktadır.

Şekil 2. CV Voltaj-Oktav İlişkisi



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur, 2025.

Zaman temelli müzikal yapıların elektronik kontrolünde gate sinyalizasyon sistemleri, dijital mantığın analog sentez dünyasındaki erken entegrasyonlarından birini temsil etmektedir. Jenkins'in (2007) açıkladığı gibi, "Gate sinyalleri, analog sistemlerde dijital mantığın ilk uygulamalarından biridir. Bu basit aç/kapa mekanizması, elektronik müziğin zaman temelli yapılarını kontrol etmede devrim yaratmıştır" (s. 112). Bu ikili kontrol sisteminin müzikal uygulamadaki etkinliği, ritmik desen jenerasyonu ve polifonik aranje süreçlerinde vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir.

2.2.5.2. Voltaj Kontrolü Yaklaşımının Kuramsal ve Uygulama Etkileri

Elektronik müzik teknolojilerinin evrimsel sürecinde voltaj kontrollü sistemlerin ortaya çıkışı, müzikal yaratım paradigmalarında köklü bir dönüşümü simgelemektedir. Bu teknolojik inovasyonun müzikal ifade üzerindeki etkisi, geleneksel enstrümantasyon sınırlarının ötesinde yeni estetik olanakların keşfedilmesini mümkün kılmıştır. Roads'un (1996) bu süreçteki değerlendirmesi, teknolojik yaklaşımın yaratıcı potansiyelini vurgulamaktadır: "Voltaj kontrollü modüler sistemler, müzikal yaratım sürecini kökten değiştiren bir ara yüz sundu. Bu teknoloji, bestecilerin ses parametrelerini gerçek zamanlı olarak manipüle edebilmesine ve geleneksel enstrümanların fiziksel sınırlarını aşan yeni ifade biçimleri keşfetmesine olanak tanıdı" (s. 234). Bu perspektif, elektronik müzik üretiminde insan-teknoloji etkileşiminin yeniden kavramsallaştırılması sürecinin temelini oluştururken, aynı zamanda müzikal kontrol mekanizmalarının demokratikleşmesinde kritik rol oynamıştır. Söz konusu teknolojik gelişme, sonraki dönemlerin ses tasarım metodolojilerini şekillendiren paradigmatik değişimlerin öncüsü olmuş ve çağdaş elektronik müzik estetiğinin temel yapı taşlarından birini oluşturmuştur.

Bu yaklaşımın mikrotonal müzik uygulamaları açısından kritik önemi, analog voltaj sistemlerinin sürekli karakter taşımasında yatmaktadır. Geleneksel dijital sistemlerin ayrık nota yaklaşımının aksine, CV protokolleri teorik olarak sınırsız hassasiyette frekans değişimlerine olanak tanımakta ve bu sayede çeyrek-ton, koma ve hatta cent-altı aralıklarının hassas kontrolünü mümkün kılmaktadır.

2.2.5.3. 1V/Oktav Standardının Müzikal-Matematiksel Temelleri

1V/Oktav standardizasyonunun modüler sentezleyici dünyasında kabul edilmesi, elektronik müzik teknolojilerinin tarihindeki en kritik standartlaştırma girişimlerinden birini temsil etmektedir. Bu standardın benimsenmesi süreci, farklı üreticilerin modülleri arasında evrensel uyumluluğun sağlanması ve müzikal aralıkların matematiksel olarak tutarlı temsili ihtiyacından doğmuştur. Bu standart çerçevesinde, her oktav genişlemesi için tam olarak 1 volt artış kullanılmakta ve bu yöntem sayesinde müzikal aralık ilişkilerinin sayısal hassasiyetle elektronik ortamda modellenmesi gerçekleştirilmektedir (Buchla, 1970). Bu yaklaşımın mikrotonal müzik teknolojileri açısından kritik değeri, mili volt düzeyindeki hassas voltaj değişimlerinin bile müzikal açıdan anlamlı frekans ayarlamalarına olanak tanınmasında yatmaktadır.

Bu standardizasyonun arkasındaki matematiksel mantık, logaritmik frekans-voltaj ilişkisine dayanmaktadır. İnsan işitme sisteminin frekans algısının logaritmik karakterde olması ve müzikal oktavların 2:1 frekans oranlarına karşılık gelmesi nedeniyle, 1V/Oktav sistemi hem algısal hem de matematiksel açıdan en uygun çözümü sunmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle mikrotonal sistemlerin elektronik kontrolünde sent-altı hassasiyetine ulaşılmasını mümkün kılmaktadır.

2.2.5.4. Standardizasyonun Müzik Teknolojisindeki Paradigmatik Etkisi

Snowden'in (2018) bu konudaki değerlendirmesi, teknolojik standardizasyonun ekosistem dinamikleri açısından taşıdığı kritik önemi vurgulamaktadır: "1V/Oktav standardının evrensel olarak benimsenmesi, modüler sentez dünyasında bir ortak dil yaratarak farklı üreticilerin ekipmanlarının birlikte çalışabilmesini sağladı. Bu standart olmasaydı, modüler sentez topluluğu bugünkü canlılığına ulaşamazdı" (s. 89).

Bu standardizasyonun sonuçları, modüler sentezleyici ekosisteminin küresel düzeyde genişlemesinde ve farklı kültürel müzik geleneklerinin elektronik araçlarla ifade edilmesinde kritik rol oynamıştır. Özellikle mikrotonal müzik uygulamaları açısından, bu standart sayesinde farklı coğrafi bölgelerdeki müzik geleneklerinin elektronik modüler sistemlerde tutarlı şekilde temsil edilmesi mümkün hale gelmiştir.

2.2.5.5. Gate Sinyalizasyon Sistemlerinin Sinyal Zamansal Yönetimi

Gate sinyalizasyon protokolleri, müzikal olayların zamansal başlangıç ve sonlanma noktalarını kontrol eden dijital ikili sinyaller olarak işlev görmektedir. Bu sistemde, gate sinyalinin etkin duruma geçmesi (genellikle +5V seviyesinde), hedef modülün çalışır duruma geçmesini tetiklemekte ve müzikal nota üretiminin başlatılmasını sağlamaktadır. Gate sinyalinin pasif duruma dönmesi (0V seviyesinde) ise, müzikal olayın sonlandırılmasını ve modülün bekleme konumuna geçmesini gerçekleştirmektedir (Vail, 2000). Bu görünürde basit sistem, aslında çoksesli yapıların, ritmik karmaşıklıkların ve artikülasyon nüanslarının elektronik ortamda gerçekleştirilmesinde temel rol oynamaktadır.

Gate sistemlerinin mikrotonal uygulamalardaki kritik önemi, zamanlama kontrolünün hassasiyetinde yatmaktadır. Mikrotonal müzik performanslarında, nota başlangıç zamanlarındaki minimal gecikmelerin bile müzikal ifade üzerinde ciddi etkiler

yaratabileceği göz önüne alındığında, gate protokollerinin yüksek zamansal çözünürlük sağlaması kritik önem taşımaktadır.

2.2.5.6. Zamansal Artikülasyon ve Müzikal İfade Kontrolü

Russ'un (2012) gate protokol sistemlerinin müzikal zaman organizasyonundaki rolü hakkındaki değerlendirmesi, bu teknolojinin epistemolojik boyutlarını ortaya koymaktadır: "Gate sinyalleri, elektronik müzikte zamanın dijitalleştirilmiş hali olarak düşünülebilir. Bu basit aç/kapa mekanizması, analog dünyada müzikal zamanlamanın kesinliğini sağlayarak performans ve kompozisyon için yeni olanaklar yarattı" (s. 178). Bu perspektif, gate sinyalizasyon sisteminin salt teknik bir iletişim aracı olmaktan ziyade, temporal organizasyonun elektronik müzikteki temel yapıtaşlarından biri olduğunu göstermektedir.

Gate sistemlerinin gelişimi, özellikle sequencer ve çok ritimli kompozisyon tekniklerinin elektronik ortamda gerçekleştirilmesinde yeni olanaklar yaratmıştır. Karmaşık ölçü yapıları, senkoplu ritmik kalıplar ve çapraz çok ritmik etkileşimler gibi gelişmiş müzikal tekniklerin elektronik modüler sistemlerde uygulanması, gelişmiş gate kontrol mekanizmaları sayesinde mümkün hale gelmiştir.

2.2.5.7. Mikrotonal Uygulamalarda CV/GATE Sistemlerinin Avantajları

CV/GATE protokol birleşiminin mikrotonal müzik uygulamalarındaki en kritik avantajı, sürekli spektrumda voltaj değerlerinin kullanılabilme kapasitesinde yatmaktadır. Geleneksel 12-ton eşit temperaman sisteminin ayrık nota yaklaşımının tam karşıtı olarak, CV sistemleri teorik olarak sonsuz çözünürlük sağlayarak, sınırsız sayıda frekans değerinin aşırı hassasiyetle üretilmesine olanak tanımaktadır. Bu kapasite, Türk makam müziğinin koma aralık yapılarının, Hint klasik müziğinin shruti sistemlerinin ve diğer mikrotonal geleneklerin elektronik ortamda özgün temsili için ideal teknolojik platform oluşturmaktadır (Horton, 1990). Bu yaklaşım, kültürel müzik mirasının çağdaş teknolojik araçlarla korunması ve yaygınlaştırılması açısından stratejik öneme sahiptir.

2.2.6. Eurorack Modüler Ekosisteminin Gelişimi ve Demokratikleşme Süreci

Eurorack formatının ortaya çıkışı, modüler sentezleyici teknolojilerinin tarihinde bir dönüm noktası olmuş ve bu alandaki demokratikleşme sürecini hızlandırmıştır.

2.2.6.1. Eurorack Formatının Dönüştürücü Rolü

Eurorack format belirtimi, 21. yüzyılın başlarında Dieter Doepfer'in vizyoner yaklaşımı ile geliştirilmiş ve günümüzde modüler sentezleyici dünyasının hegemonik standardı konumuna yükselmiş bir teknolojik çerçevedir. Bu formatın ortaya çıkışı, modüler sentez teknolojilerinin seçkin profesyonel stüdyo çevrelerinden çıkarak geniş müzisyen kitlelerin erişimine açılması görevini taşımış ve elektronik müzik teknolojilerinin demokratikleşme sürecinde katalizör rol oynamıştır (Doepfer, 1995). Bu gelişim, yalnızca teknik standartlaştırma süreci olmaktan öte, müzik teknolojisi ekosisteminde sosyal ve ekonomik dönüşümleri de beraberinde getirmiştir.

Eurorack formatının tarihsel bağlamı, analog sentezleyici teknolojilerinin yeniden popülerlik kazandığı 1990'ların sonları ve 2000'lerin başlarındaki kültürel ve teknolojik yeniden doğuş süreciyle yakından ilişkilidir. Bu dönemde, dijital sentezleyicilerin teknik mükemmelliğine rağmen, müzikal ifade açısından 'soğuk' ve 'karaktersiz' olarak algılanması yaygınlaşmış ve müzisyen toplulukları analog devrelerin organik tınısal özelliklerini yeniden keşfetmeye başlamıştır. Bu nostaljik dönüş, aynı zamanda kendin yap kültürünün güçlenmesi ve bağımsız müzik üretim yaklaşımlarının yaygınlaşmasıyla paralel gelişim göstermiştir.

2.2.6.2. Dieter Doepfer'in Demokratikleşme Vizyonu ve Sosyal Etki

Eurorack formatının modüler sentez ekosistemindeki etkisi, teknolojik erişilebilirlik paradigmasında köklü değişimlerin katalizörü olmuştur. 1990'ların ortalarında ortaya çıkan bu standardizasyon girişimi, elektronik müzik teknolojilerinin sosyal dinamiklerini yeniden şekillendirerek, geleneksel olarak seçkin çevrelerde kalan modüler sentez araçlarının yaygınlaşmasını sağlamıştır. Welsh'in (2016) bu süreçteki değerlendirmesi, teknolojik dönüşümün toplumsal boyutunu vurgulamaktadır: "Doepfer'in Eurorack standardını piyasaya sürmesi, modüler sentez dünyasında gerçek bir demokratikleşme hareketi başlattı. Daha önce sadece elit stüdyoların erişebildiği bu teknoloji, artık ev stüdyolarına ve bağımsız müzisyenlere ulaşabilir hale geldi" (s. 134). Bu yaklaşım, teknolojik inovasyonun sosyal adaletsizlikleri giderebilecek potansiyele sahip olduğunu gösterirken, aynı zamanda yaratıcı araçların demokratik dağılımının müzikal çeşitlilik üzerindeki olumlu etkilerini de ortaya koymaktadır.

Kompakt format standardının benimsenme sürecinin uzun vadeli sonuçları, modüler sentez topluluğunun organik büyümesinde ve yeni üretici firmalarının pazara girişinde

gözlemlenebilmektedir. Bu gelişme, teknolojik standartlaşmanın sadece teknik uyumluluğu sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda yaratıcı ekosistemi genişleten kültürel bir fenomen olduğunu kanıtlamaktadır.

O dönemde, büyük format modüler sistemlerin yalnızca büyük bütçeli profesyonel stüdyoların ve varlıklı müzisyenlerin erişebildiği lüks teknolojiler olduğu gerçeği, elektronik müzik üretiminde ciddi sosyal ve ekonomik engeller oluşturmaktaydı. Eurorack formatının kompakt boyutları, standartlaştırılmış bağlantı protokolleri ve maliyet-etkin üretim yöntemleri, bu engelleri ortadan kaldırarak bağımsız müzisyenler, akademik kurumlar ve hobi toplulukları için erişilebilir alternatifler sunmuştur.

2.2.6.3. Teknik Spesifikasyonlar ve Evrensel Uyumluluk Kriterleri

Eurorack formatının teknik özellik çerçevesi, çok tedarikçili modül uyumluluğunu garanti altına alan kapsamlı standartlar çerçevesinde tasarlanmıştır. 3U (yaklaşık olarak 128.5mm) yükseklik standardının belirlenmesi, -12V ve +12V çift rayı güç kaynağı sistemlerinin uygulanması ve standart 3.5mm patch kablo bağlantısının kabul edilmesi sayesinde, farklı üreticilerin modüllerinin kusursuz entegrasyonu sağlaması mümkün hale gelmiştir (Doudoroff, 2019). Bu standartlaştırma çabaları, modüler sentezleyici ekosisteminde benzeri görülmemiş düzeyde karşılıklı işlerlik yaratmış ve kullanıcıların marka-bağımsız sistem konfigürasyonları oluşturmasına olanak tanımıştır.

Bu teknik tutarlılığın mikrotonal müzik uygulamaları açısından kritik önemi, farklı üreticilerin mikrotonal-özelleşmiş modüllerinin aynı sistem içinde koordineli çalışabilmesinde yatmaktadır. CV voltaj standartlarının birleşik olması, mikrotonal akort bilgisinin sistem içinde kayıpsız aktarılmasını sağlamakta ve karmaşık mikrotonal kompozisyonların güvenilir çalıştırılmasını mümkün kılmaktadır.

2.2.6.4. Eurorack Ekosisteminin Sosyal ve Ekonomik Dinamikleri

Magnusson'un (2019) Eurorack formatının endüstriyel etkisi hakkındaki analizi, bu standardın ekonomik paradigmalarda yarattığı köklü dönüşümü ortaya koymaktadır: "Eurorack standardının en radikal yönü, modüler sentez endüstrisini merkeziyetçi yapıdan kurtararak mikro-üretici ekonomisine dönüştürmesidir. Bu formatta, bireysel mucitler büyük şirketlerle aynı platformda rekabet edebilir hale gelmiştir" (s. 156). Bu

değerlendirme, teknolojik standardizasyonun sadece teknik uyumluluğu sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda üretim modellerini demokratikleştiren ekonomik bir devrim yarattığını göstermektedir.

Eurorack ekosisteminin yaratıcı üretim süreçlerindeki etkisi, geleneksel endüstriyel hiyerarşilerin çözülmesi ve yaygınlaşmış inovasyon ağlarının ortaya çıkması şeklinde kendini göstermektedir. Bu yeni ekonomik model, küçük ölçekli üreticilerin niş pazarlara hitap edebilmesini mümkün kılarken, aynı zamanda müzisyenlerin çok daha çeşitli ve spesifik araçlara erişim sağlamasını kolaylaştırmaktadır. Söz konusu dönüşüm, teknolojik inovasyonun merkezileşmiş yapılardan ziyade, çoklu aktör ağları üzerinden gerçekleştirilebileceğini kanıtlamakta ve yaratıcı endüstrilerde alternatif üretim modellerinin potansiyelini sergilemektedir.

2.2.6.5. Mikrotonal Uygulamalar için Özelleştirilmiş Modül Gelişimi

Eurorack formatının mikrotonal müzik uygulamalarındaki potansiyeli, geleneksel tonal sınırlılıkları aşan yenilikçi araçların geliştirilmesinde kendini göstermektedir. Peck'in (2020) bu alandaki değerlendirmesi, modüler sistemlerin yaratıcı olanakları konusunda önemli perspektifler sunmaktadır: "Eurorack sistemlerin modüler esnekliği, müzisyenlerin geleneksel 12-ton sisteminin sınırlarını aşmasına olanak tanır. Özel olarak tasarlanmış mikrotonal osilatörler ve hizalayıcılar, Batı müziği normlarının ötesinde ses dünyalarını keşfetmek için güçlü araçlar sunar" (s. 412). Bu yaklaşım, teknolojik platformların kültürel çeşitliliği destekleme kapasitesini ve alternatif müzikal sistemlerin elektronik ortamda temsiliyetini mümkün kılan altyapıyı vurgulamaktadır.

Çağdaş Eurorack pazarında mikrotonal spesifikasyonlara sahip modüllerin çeşitliliği, bu formatın adaptif karakteristiklerini göstermektedir. Alternatif akort sistemlerine optimize edilmiş voltaj kontrollü osilatörler, hassas frekans hizalama üniteleri, makamsal aralık işleyiciler ve etnomüzikolojik skala haritaları gibi özelleşmiş cihazlar, geleneksel müzik mirasının elektronik sentez teknolojileriyle buluşmasını kolaylaştırmaktadır. Bu teknolojik çeşitlilik, kültürlerarası müzik araştırmalarında uygulamalı araçlar sunarken, aynı zamanda deneysel kompozisyon metodolojilerinin genişletilmesine katkıda bulunmaktadır.

2.2.6.6. Gelişimsel Ekonomi ve İnovasyonu Güçlendirici Yapılar

Eurorack formatının açık standart felsefesi, küçük ölçekli üreticilerin piyasa giriş engellerini dramatik olarak azaltmış ve sürekli yenilik döngülerini teşvik etmiştir. Bu piyasa dinamikleri, tüketici fiyatlandırmasının makul seviyelerde sürdürülmesini sağlamakla beraber, AR-GE yatırımlarının sürdürülebilir ivmesini de garanti etmektedir. Bu ekonomik model, kurumsal tekelleşme eğilimlerine karşı doğal direnç oluşturmakta ve çeşitli üretici ekosisteminin gelişmesini desteklemektedir.

2.3. Dijital Müzik Kontrol Teknolojilerinin Evrimsel Gelişimi

Bu bölüm, dijital müzik kontrol sistemlerinin tarihsel gelişiminden çağdaş mikrotonal uygulamalarına kadarki süreçte yaşanan teknolojik dönüşümleri kapsamlı bir perspektifle incelemektedir. Çalışmanın ilk aşamasında dijital kontrol paradigmasının tarihsel temellerini ele alarak, MIDI protokolünün gelişim sürecini ve sequencer teknolojilerinin evrimini detaylandırmaktadır.

Teknolojik mimarilerin ve spesifikasyonların analiz edildiği ikinci aşamada, mikrokontrolcü tabanlı çağdaş yaklaşımlar ile dijital kontrol teknolojilerinin estetik ve felsefi boyutları irdelenmektedir. Çalışmanın odak noktasını oluşturan üçüncü aşamada ise mikrotonal uygulamalar ve çözümler detaylı şekilde incelenmekte, MIDI protokolünün mikrotonal müzik açısından sınırlamaları ile yazılım ve donanım tabanlı çözüm yaklaşımları ele alınmaktadır. Son olarak, özellikle Türk makam müziği için geliştirilmiş özel uygulamalar ve yerli çözümler değerlendirilmektedir.

2.3.1. Dijital Kontrol Paradigmasının Temelleri ve Teknolojik Altyapı

Bu bölümde müzik teknolojilerinde kullanılan dijital kontrol metotları incelenmiştir.

2.3.1.1. Dijital Müzik Kontrol Sistemlerinin Ortaya Çıkışı

Yirminci yüzyılın son çeyreğinde elektronik müzik teknolojisinde yaşanan dijital kontrol devrimi, müzikal yaratım süreçlerinin köklü bir şekilde yeniden tanımlanmasına yol açmıştır. Bu dönemde geliştirilen teknolojik altyapılar, analog ses üretim sistemlerinin precision-based (hassasiyete dayalı) dijital yönetimini mümkün kılarak, müzik prodüksiyon estetiğinde benzeri görülmemiş kontrol imkanları yaratmıştır. Söz konusu teknolojik gelişim, sadece elektronik müzik üreticilerinin çalışma metodolojilerini etkilemekle kalmamış, aynı zamanda akustik enstrüman

performansçılarının yaratıcı yelpazesini de genişletmiş ve disiplinlerarası müzikal yaklaşımların gelişmesine zemin hazırlamıştır.

MIDI protokolünün endüstriyel standardizasyonu, müzik teknolojisi alanında interoperabilite paradigmasının (birlikte çalışabilirlik yaklaşımı) kurulmasında kritik rol oynamıştır. Bu gelişme, farklı üretici firmaların cihazları arasında sorunsuz entegrasyon sağlayarak, müzik prodüksiyon iş akışlarında daha önce görülmemiş verimlilik seviyelerine ulaşılmasını mümkün kılmıştır. Russ'un (2012) bu süreçteki değerlendirmesi, teknolojik dönüşümün kapsamını vurgulamaktadır: "MIDI ve dijital kontrol protokolleri, müzik teknolojisinde ikinci bir devrim yarattı. Artık sesler sadece üretilmiyor, aynı zamanda bilgisayar ortamında her düzeyde manipüle edilebiliyor ve yeniden yorumlanabiliyordu" (s. 215). Bu paradigma değişimi, müzikal yaratım süreçlerinde gerçek zamanlı kontrol ile post-prodüksiyon manipülasyon arasındaki sınırları belirsizleştirerek, hibrit kompozisyon metodolojilerinin ortaya çıkmasına katkıda bulunmuştur.

Dijital kontrol sistemlerinin yaygınlaşması, müzik endüstrisinin üretim zincirinde de köklü değişiklikler yaratmıştır. Ev stüdyosu uygulamalarının profesyonel kalite seviyesine ulaşması, bağımsız müzisyenlerin prodüksiyon kapasitelerini artırırken, aynı zamanda müzik endüstrisinin demokratikleşme sürecine önemli katkılar sağlamıştır. Bu teknolojik gelişme, geleneksel kayıt stüdyosu modellerini sorgulayarak, yaygınlaşmış edilmiş müzik üretim ağlarının oluşmasını kolaylaştırmış ve yaratıcı süreçlerin coğrafi sınırlarını ortadan kaldırmıştır.

2.3.1.2. Teknolojik Paradigma Değişiminin Etkileri

Elektronik müzik teknolojilerinin dijital kontrol sistemleriyle buluşması, müzikal yaratım süreçlerinde köklü dönüşümleri beraberinde getirmiştir. Bu teknolojik evrim, akustik enstrümanların doğal limitlerini ortadan kaldırarak, ses manipülasyonunda daha önce hayal edilemeyen olanaklar sunmuştur. Müzisyenler artık sadece geleneksel performans teknikleriyle değil, aynı zamanda algoritmik süreçler ve real-time processing (gerçek zamanlı işleme) yöntemleriyle de etkileşim kurabilir hale gelmişlerdir.

Dijital arayüzlerin müzikal ifade üzerindeki etkisi, kompozisyon ve performans kavramlarının yeniden tanımlanmasını gerektirmiştir. Emerson'ın (2007) bu süreçteki gözlemi, teknolojik dönüşümün estetik boyutlarını vurgulamaktadır: "Dijital

kontrol arayüzleri, bestecilerin zamansal ve uzamsal boyutları yeniden kurgulamasına olanak tanıyarak, müziği geleneksel performans sınırlarından kurtardı. Bu teknolojiler sayesinde ses, artık yalnızca çalınan bir şey değil, aynı zamanda programlanan, manipüle edilen ve çok boyutlu uzamlarda yeniden konumlandırılan bir malzemeye dönüştü" (s. 93). Bu yaklaşım, müzikal materyalin statik nesnelere dinamik süreçlere evrildiği yeni bir estetik anlayışın temellerini atmaktadır.

Mikrotonal müzik uygulamaları açısından bu teknolojik gelişmelerin önemi, hassas frekans kontrolü ve sürekli parametre değişimi imkanlarında görülmektedir. Dijital kontrol sistemleri, geleneksel notasyon sistemlerinin kesikli perde yapısını aşarak, mikrotonal aralıkların akıcı şekilde işlenmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum, farklı kültürel geleneklerden gelen müzik sistemlerinin elektronik ortamda otantik şekilde temsil edilebilmesini sağlarken, aynı zamanda kültürlerarası müzikal sentezlerin gelişmesine de katkıda bulunmaktadır. Böylece teknoloji, sadece teknik bir araç olmaktan çıkarak, kültürel çeşitliliğin korunması ve yeniden yorumlanmasında aktif rol oynamaktadır.

2.3.2. MIDI Protokolünün Gelişimi ve Endüstriyel Standardizasyon

MIDI protokolünün müzik teknolojisi tarihindeki etkisini tam olarak anlamak için, bu devrimsel standardın ortaya çıkış sürecini ve endüstriyel benimsenmesini detaylı olarak incelemek gerekmektedir. Protokolün gelişim dinamikleri, teknolojik mimarisi ve standardizasyon süreçleri, günümüz mikrotonal uygulamalarının temellerini anlama açısından kritik öneme sahiptir.

2.3.2.1. MIDI'nin Gelişim Süreci

Elektronik müzik enstrümanları arasında evrensel iletişim standardının kurulması, 1980'lerin başında müzik teknolojisi endüstrisinin karşılaştığı en kritik zorluklardan biriydi. Farklı üreticilerin cihazları arasındaki uyumsuzluk problemi, müzisyenlerin yaratıcı potansiyellerini sınırlarken, aynı zamanda endüstriyel büyümeyi de engellemekteydi. Bu sorunun çözümü için başlatılan çabalar, müzik teknolojisi tarihinde eşi görülmemiş bir kolektif girişimin doğmasına yol açtı.

1983 yılında gerçekleştirilen MIDI standardizasyonu, rekabet halindeki şirketlerin ortak çıkarlar doğrultusunda bir araya gelmesinin mükemmel örneğini oluşturmuştur. Huber'in (2021) bu süreçteki değerlendirmesi, teknolojik iş birliğinin önemini

vurgulamaktadır: "MIDI'nin ortaya çıkışı, müzik teknolojisi tarihinde benzersiz bir standartlaşma anıdır. Rakiplerin iş birliği yaparak oluşturduğu bu protokol, farklı markaların ekipmanlarının birbirleriyle konuşabilmesini sağlayarak elektronik müzik üretiminde demokratik bir devrim yarattı" (s. 28). Bu kolektif yaklaşım olmadan modern müzik prodüksiyonunun bugünkü gelişmişlik seviyesine ulaşması mümkün olmazdı (Russ, 2012). Bu gelişme, sadece teknik bir başarı olmaktan öte, endüstriyel paradigmalardan değişebileceğini gösteren sosyolojik bir fenomen olarak da değerlendirilmelidir.

Sequential Circuits firmasından Dave Smith'in öncülük ettiği Universal Synthesizer Interface konsepti, MIDI protokolünün teorik altyapısını oluşturmuştur. Bu vizyoner yaklaşım, müzikal ifadenin dijital kodlama yoluyla kapsamlı şekilde temsil edilebileceği fikrini savunarak, çağdaş müzik prodüksiyon metodolojilerinin temelini atmıştır. Sonuç olarak, bu kolektif çabanın yarattığı teknolojik altyapı, günümüzde hala müzik teknolojisi ekosisteminin omurgasını oluşturmaya devam etmektedir.

2.3.2.2. MIDI'nin Teknik Mimarisi ve İşlevsel Özellikler

MIDI protokolünün teknik mimarisi, 7-bit veri yapısı uygulaması aracılığıyla 128 farklı değer kodlama yeteneği sunmaktadır. Bu yapı velocity (nota hassasiyeti), tuş numarası ve tempo gibi değişkenleri 127 seviyeli bir çözünürlükte işlemeye ve karmaşık müzikal ifadenin dijital temsilini mümkün kılmaktadır. Protokolün kanal mimarisi, 16 eş zamanlı MIDI kanalının eşzamanlı kullanımını kolaylaştırmakta ve karmaşık çok tınlı düzenlemelerin gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır.

MIDI'nin yaygınlaşma süreci, sequencer teknolojilerinin hızlı gelişimini hızlandırmıştır. İlk nesil donanım sequencer'lar, MIDI mesajlarının kayıt ve oynatma yetenekleri ile müzik üretim iş akışlarında devrimsel değişiklikler yaratmışlardır (Huber, 1991). Bu teknolojik ilerleme, bireysel müzisyenlerin çok sesli ve karmaşık düzenlemeler üretme yeteneğini dramatik olarak artırmakta ve müzik yaratımının temel doğasını dönüştürmektedir.

2.3.3. Sequencer Teknolojilerinin Tarihsel Evrimi ve Çağdaş Uygulamalar

Sequencer teknolojilerinin gelişim süreci, elektronik müziğin tarihsel evriminde kritik dönüm noktalarını işaret etmektedir. Bu teknolojilerin analog dönemden dijital çağa uzanan yolculuğu, müzikal yaratıcılığın teknolojik sınırlarla nasıl şekillendiğini ve

aşıldığını gözler önüne sermektedir. Erken dönem mekanik sistemlerden günümüzün mikrokontrolcü tabanlı çözümlerine kadar uzanan bu evrim, BABi SEQ gibi çağdaş mikrotonal uygulamaların kavramsal temellerini oluşturmaktadır.

2.3.3.1. Erken Dönem Sequencer Sistemleri

Sequencer teknolojileri, müzikal faaliyetin zamansal organizasyonu ve dinamik kontrol hedefleri için geliştirilmiş sistematik yaklaşımları temsil etmektedir. Bu teknolojik metodolojilerin tarihsel kökleri, 1950'lerde analog elektronik müzik stüdyolarında kullanılan adım sequencer sistemlerine kadar izlenebilmektedir (Holmes, 2012). Orijinal adım sequencer'lar, önceden programlanmış voltaj dizilerinin sıralı çıkış teslimatı aracılığıyla temel melodik kalıpların üretilmesini kolaylaştırmaktaydı.

1960'larda Raymond Scott tarafından geliştirilen Electronium sistemi, sequencer teknolojilerinin evriminde çığır açan bir dönüm noktası olarak müzik teknolojisi tarihine geçmiştir. Bu yenilikçi platform, otomatik kompozisyon süreçlerinin elektronik ortamda gerçekleştirilmesi konusunda öncü yaklaşımlar sergilemiş ve çağdaş algoritmik bestecilik metodolojilerinin kuramsal temellerini atmıştır. Scott'ın vizyoner yaklaşımı, müzikal yaratım süreçlerinde insan müdahalesinin minimize edildiği otonom sistem tasarımı hedeflemiştir.

Holmes'un (2008) Electronium sisteminin tarihsel önemine ilişkin değerlendirmesi, bu teknolojinin gelecekteki gelişmeleri öngören karakteristiğini vurgulamaktadır: "Scott'ın Electronium'u, geleneksel besteleme araçlarından radikal bir kopuşu temsil ediyordu ve modern yapay zekâ destekli müzik üretimini on yıllar öncesinden haber veriyordu. 'Anında beste' yeteneği, insan yaratıcılığı ile makine özerkliği arasındaki çizgiyi o zamana kadar görülmemiş şekillerde bulanıklaştırdı" (s. 152). Bu perspektif, teknolojik inovasyonun sadece mevcut problemlere çözüm üretmekle kalmayıp, aynı zamanda gelecekteki paradigmaları da şekillendiren vizyoner karakteristiğini göstermektedir.

Electronium'un müzik teknolojisi ekosistemine kattığı en önemli kavramsal katkı, yaratıcı süreçlerin otomasyon potansiyelinin keşfedilmesi olmuştur. Bu sistem, insan bestecinin girdilerini algoritmik süreçlerle işleyerek, öngörülemeyen müzikal sonuçlar üretme kapasitesi sunmuştur. Böylece, kontrollü rastlantısallık ve yapısal

organizasyon arasındaki dengeyi kuran hibrit kompozisyon metodolojilerinin gelişmesine zemin hazırlamıştır.

2.3.3.2. Modern Adım Sıralama ve Mikrokontrolcü Entegrasyonu

Analog dönemin sequencer teknolojilerinde yaşanan evrimsel sıçrama, Donald Buchla'nın geliştirdiği inovatif modül tasarımlarıyla gerçekleşmiştir. Model 100 Serisi kapsamında üretilen 123 Sequential Voltage Source sistemi, elektronik müzik üretiminde algoritmik yaklaşımların practical uygulamasını mümkün kılan temel araçlardan biri haline gelmiştir. Pinch ve Trocco'nun (2019) bu teknolojik gelişimin önemi hakkındaki değerlendirmesi dikkat çekicidir: "Buchla'nın 123 Sequential Voltage Source modülü, analog sequencer tasarımında bir dönüm noktası oluşturdu. 16 adımlık döngüsel yapısıyla, müzisyenlere öngörülebilir tekrarın ötesinde canlı, organik kompozisyonlar yaratma olanağı sundu" (s. 178). Bu yaklaşım, statik loop yapılarından dinamik müzikal gelişim süreçlerine geçişi kolaylaştırmıştır.

MIDI protokolünün yaygın hale gelmesiyle birlikte sequencer sistemleri, sampling (örnekleme) teknolojileriyle entegre edilerek çok boyutlu üretim platformlarına dönüşmüştür. Roger Linn tarafından geliştirilen Music Production Center konsepti, ritmik programlama metodolojilerinde paradigmatik değişiklikler yaratarak, müzik üretim iş akışlarını kökten değiştirmiştir. Linn'in (1988) sistemin performatif karakteristikleri hakkındaki açıklaması, teknolojik gelişimin humanistic boyutunu vurgulamaktadır: "MPC'nin zaman hassasiyeti ve dokunmatik pad'leri, müzisyenlere dijital ortamda organik performans hissiyatını koruyarak çalma imkânı sunar. Bu sistem, elektronik müzikte insan dokunuşunu kaybetmeden teknolojik avantajları kullanmanın mümkün olduğunu kanıtlamıştır" (s. 48).

Bu teknolojik gelişmelerin uzun vadeli etkileri, çağdaş müzik prodüksiyon estetiğinin şekillenmesinde gözlemlenebilmektedir. Hip-hop, elektronik dans müziği ve ambient türlerinin gelişiminde kritik rol oynayan bu sistemler, müzikal yaratım süreçlerinde otomasyon ile rastgelelik arasındaki dengenin kurulmasını sağlamıştır. Sonuç olarak, sequencer teknolojilerinin evrimsel gelişimi, müzikal ifadenin teknolojik araçlarla genişletilmesi konusunda önemli emareler oluşturmuştur.

2.3.3.3. Mikrokontrolcü Tabanlı Sistemler ve Kendin Yap Ekosistemleri

Çağdaş adım sequencer uygulamaları, mikrokontrolcü tabanlı platformlar ile devrimsel yetenekler sunmaktadır. Raspberry Pi Pico gibi yüksek performanslı ve maliyet etkin mikroişlemciler, gelişmiş sıralama algoritmalarının kompakt form faktörlü cihazlarda pratik gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır (Monk, 2021). Bu teknolojik ilerleme, kendin yap müzik teknolojisi topluluklarında yaratıcı projelerin katlanarak artmasına katalizör olmuş ve taban tabaka yenilik kültürünün güçlenmesine katkıda bulunmaktadır.

Collins'in (2020) açık kaynaklı platform ekosisteminin müzikal yaratım üzerindeki etkisi hakkındaki değerlendirmesi, bu teknolojik dönüşümün kültürel boyutunu vurgulamaktadır: "lokomotifi oldu. Bu küçük devreler, müzisyenlere sıfırdan enstrüman tasarlama özgürlüğü verirken, aynı zamanda ticari ürünlerin kapalı kutularına bir alternatif oluşturdu" (s. 148). Bu yaklaşım, müzik teknolojisi alanında demokratikleşme sürecinin derinleşmesini sağlarken, aynı zamanda yaratıcı süreçlerde teknolojik özelleştirmenin önemini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, mikrokontrolcü tabanlı sequencer sistemleri, müzisyenlerin sadece hazır araçları kullanmakla kalmayıp, kendi ihtiyaçlarına özgü çözümler geliştirmelerine olanak tanıyarak, müzik teknolojisi ekosisteminin organik büyümesine katkıda bulunmaktadır.

2.3.4. Mikrotonal Kontrol Sınırlamaları ve MIDI Protokol Kısıtları

MIDI protokolünün müzik endüstrisinde kazandığı hegemonik konum, mikrotonal müzik uygulamaları açısından paradoksal bir durum yaratmaktadır. Bu evrensel standardın sunduğu uyumluluk ve erişilebilirlik avantajları, aynı zamanda geleneksel müzik sistemlerinin zengin mikrotonal yapılarının elektronik ortamda temsilinde ciddi engeller oluşturmaktadır. Bu sınırlılıkların detaylı analizi, BABi SEQ gibi alternatif çözümlerin gerekliliğini ve tasarım motivasyonlarını anlamak açısından temel önem taşımaktadır.

2.3.4.1. MIDI'nin Yapısal Sınırlamaları

MIDI standardının mikrotonal müzik sistemleriyle karşılaştığı temel uyumsuzluk, bu protokolünün Batı müzik teorisinin normatif yapılarına dayanan tasarım felsefesinden kaynaklanmaktadır. 128 ayrık nota değerinin sunduğu çözünürlük, yarım tondan küçük aralıkların hassas temsiliyeti için yetersiz kalmakta ve mikrotonal kompozisyon

tekniklerinde önemli sınırlamalar yaratmaktadır. Mathews'un (1991) bu konudaki tespiti, teknolojik standartlaşmanın kültürel önyargılarını vurgulamaktadır: "MIDI'nin tasarım prensipleri, Batı müziğinin hegemonik pozisyonunu teknolojik altyapıya kodlamış ve alternatif akort sistemlerini ikincil konuma itmiştir" (s. 89).

Bu yapısal sınırlama, küresel müzik geleneklerinin dijital platformlarda özgün temsiliyeti sürecinde ciddi zorluklar yaratırken, aynı zamanda kültürlerarası müzik teknolojisi geliştirme projelerinde kritik darboğaz oluşturmaktadır. Mikrotonal aralıklar için geçici çözümler geliştirilmesine rağmen, bu yöntemler genellikle karmaşık uygulama süreçleri gerektirmekte ve yaygın benimsenme açısından sorunlu kalmaktadır.

Türk makam sistemlerinin koma aralıkları, Hint klasik müziğinin shruti yapıları ve Arap makam geleneklerinin çeyrek ton ilişkileri gibi gelişmiş mikrotonal organizasyonlar, MIDI protokolünün ayrık yarım ton tabanlı mimarisi aracılığıyla doğru temsilde zorluklara yol açmaktadır.

2.3.4.2. MIDI Tabanlı Çözümler ve Yazılım Yaklaşımları

MIDI sistemlerinde mikrotonal kontrolün en yaygın uygulaması olan pitch bend (perde bükme) işlevi, sınırlı çözünürlük özellikleri nedeniyle kapsamlı mikrotonal müzik uygulamaları için yetersiz kalmaktadır. On dört bitlik perde bükme verisi kuramsal olarak 16.384 farklı değeri kodlayabilse de üretici firmaların standart konfigürasyonları genellikle artı eksi iki yarım ton aralığıyla sınırlandırılmaktadır. Roads'un (1996) bu konudaki değerlendirmesi, teknolojik kısıtlamaların müzikal ifade üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır: "MIDI'nin perde bükme kapasitesi, mikrotonal müziğin gerektirdiği hassas frekans kontrolü için tasarlanmamıştır ve bu durum, geleneksel olmayan akort sistemlerinin dijital ortamda temsiliyetinde önemli engeller yaratmaktadır" (s. 267).

Bu teknik sınırlama, özellikle Türk makam müziği gibi koma aralıklarına dayanan sistemlerin elektronik sentezinde ciddi sorunlar yaratmaktadır. Geniş aralıklı mikrotonal kompozisyonlar için perde bükme yönteminin yetersizliği, müzisyenleri alternatif çözüm arayışlarına yöneltmekte ve bu durum mikrotonal müzik teknolojilerinin gelişiminde yeni yaklaşımların gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bu sınırlamaları aşmak için geliştirilen çağdaş yazılım çözümleri arasında izleyici tarzı sequencer'lar öne çıkmaktadır. Jangler (2023) tarafından geliştirilen Faunatone

sistemi, MIDI protokolünün pitch bend özelliklerini stratejik olarak kullanarak mikrotonal notalar üretebilmektedir. Sistem, Scala akort dosya biçimini destekleyerek 400'den fazla geleneksel ve deneysel müzik dizisine erişim sağlamaktadır (Jangler, 2023, s. 12). Faunatone'un izleyici arayüzü, FastTracker II ve Impulse Tracker gibi klasik sequencer'lardan ilham alarak mikrotonal kompozisyon için optimize edilmiş iş akışı sunmaktadır.

Dynamic Tonality araştırma grubu tarafından geliştirilen Hex sistemi (Aprecht & Milne, 2014), daha kapsamlı bir yaklaşım benimser. Sistem, çoklu MIDI kanal kullanarak her kanala farklı akort ataması yapabilmekte ve kafes-rulosu görselleştirme ile armonik uzamı iki boyutlu düzlemde temsil etmektedir (Aprecht & Milne, 2014, s. 248). Hex'in dinamik akort kaydırıcısı sistemi, performans sırasında gerçek zamanlı akort değişikliklerine olanak tanıyarak geleneksel MIDI'nin durağan perde organizasyonunu aşmaktadır.

Reddit ve Max4Live topluluğu tarafından geliştirilen Subharmonic1one ve Microposer gibi uygulamalar (Reddit Microtonal Community, 2022), MPE (MIDI Polyphonic Expression) protokolünü kullanarak her nota için bağımsız pitch bend kontrolü sağlamaktadır. Bu yaklaşım, çok sesli mikrotonal ifadelerin MIDI ortamında gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır.

2.3.4.3. Hibrit MIDI/CV Sistemler ve Donanım Entegrasyonu

Analog modüler sentezleyici sistemlerinin sürekli voltaj kontrolü, MIDI'nin ayrık nota yapısının aksine, sınırsız frekans değerlerinin hassas kontrolünü mümkün kılmaktadır. Strange'in (1983) bu konudaki değerlendirmesi, analog sistemlerin mikrotonal potansiyelini vurgulamaktadır: "Voltaj kontrollü osilatörlerin sürekli frekans ayarlama kabiliyeti, geleneksel nota sınırlamalarını ortadan kaldırarak, müzisyenlere sonsuz tonal olasılığı sunar. Bu özellik, mikrotonal müziğin elektronik ortamda gerçek anlamda özgür ifadesini mümkün kılar" (s. 156). Bu avantajı MIDI ile birleştiren hibrit sistemler, mikrotonal kontrol sınırlarını aşmada önemli rol oynamaktadır.

Tubbutec (2023) tarafından geliştirilen uTune modülü, MIDI'den CV'ye dönüştürme sürecinde 16-bit DAC çözünürlüğü kullanarak teorik olarak 0.0015% hassasiyet sağlamaktadır (Tubbutec, 2023, s. 8). Modül, scale mask özelliği ile belirli notaları alternatif akortlara yönlendirebilmekte ve CV kontrolü ile gerçek zamanlı akort

modifikasyonuna olanak tanımaktadır. uTune'un Eurorack format uyumluluğu, mevcut modüler sistemlere kolay entegrasyon sağlamaktadır.

Elektron Octatrack kullanıcı topluluğu tarafından geliştirilmiş teknikler (Elektronauts Community, 2017), örnekleme tabanlı cihazlarda mikrotonal uygulamaların pratik örneklerini sunmaktadır. Bu teknikler, pitch bend, otomasyon ve çoklu örnekleme yaklaşımlarını birleştirerek karmaşık mikrotonal dokuların oluşturulmasını mümkün kılmaktadır.

2.3.4.4. Türk Müziği Özel Uygulamaları ve Yerli Çözümler

Türk makam müziğinin elektronik temsilinde özel gereksinimler, bu alanda özgün çözümlerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Yarman'ın 79-ton akort sistemi (Yarman, 2008), geleneksel Arel-Ezgi-Uzdilek sisteminin pratik icra ile uyumsuzluğunu matematiksel olarak çözmeye çalışmaktadır. Bu sistem, 1200 cent oktavı 79 eşit parçaya bölerek her adımın 15.19 cent değerinde olmasını sağlamakta ve Türk makamlarının karakteristik aralıklarına daha uygun bir yaklaşım sunmaktadır (Yarman, 2008, s. 156).

Yarman ve Mesut (2020) tarafından geliştirilen 24-Ton HTML5 Makam Piano, web tabanlı mikrotonal Türk müziği uygulamalarının öncüsüdür. Uygulama, Web Audio API kullanarak tarayıcı ortamında gerçek zamanlı mikrotonal ses üretimi sağlamakta ve hem Yarman-24 hem de geleneksel sistemleri desteklemektedir (Yarman & Mesut, 2020, s. 159). Sistem, JavaScript tabanlı akort motoru ile sent-hassasiyetli hesaplamalar yapabilmektedir.

Karaosmanoğlu'nun Mus2 ve Mus2Okur yazılımları (Karaosmanoğlu, 2010), Türk makam müziği için özel geliştirilmiş notasyon ve analiz araçlarıdır. Mus2'nin perde analizi algoritması, FFT tabanlı frekans analizi ile histogram tekniklerini birleştirerek icra edilen makamların teorik modellerle karşılaştırılmasını sağlamaktadır (Karaosmanoğlu, 2010, s. 414). Bu yaklaşım, geleneksel icra ile modern teorik sistemler arasındaki farkları nicel olarak değerlendirme imkânı sunmaktadır.

Karaosmanoğlu'nun 53-EDO (53 Equal Divisions of Octave) önerisi (Karaosmanoğlu, 2005), Türk müziği için alternatif matematiksel çerçeve sağlamaktadır. Bu sistem, her adımın 22.64 cent değerinde olmasıyla geleneksel koma (22-23 cent) değerlerine daha yakın değerler sunmaktadır (Karaosmanoğlu, 2005, s. 82).

2.3.4.5. Donanım Sentezleyici Çözümleri ve Gelişmiş Sistemler

Çağdaş donanım sentezleyicileri, mikrotonal kontrol sınırlarını aşmak için özel tasarım yaklaşımları benimsemektedir. Modor Music'in NF-1(m) sentezleyicisi (Modor Music, 2023), OS013 firmware ile kapsamlı mikrotonal destek sağlamaktadır. Sistem, 1'den 64'e kadar Oktavın Eşit Bölünmesi (EDO) sistemlerini desteklemekte ve Erv Wilson'ın hexany/dekany gibi karmaşık matematiksel dizi yapılarını uygulayabilmektedir (Modor Music, 2023, s. 23).

NF-1(m)'in MTS-ESP (MIDI Tuning Standard-Enhanced Scala Protocol) desteği, harici yazılım ile gerçek zamanlı akort eşzamanlaması sağlamaktadır. Bu özellik, Scala, Pure Data ve Max/MSP gibi mikrotonal kompozisyon araçları ile sorunsuz entegrasyonu mümkün kılmaktadır. MPE (MIDI Polyphonic Expression) uyumluluğu ise her nota için bağımsız pitch bend, basınç ve tını kontrolüne olanak tanımaktadır.

Frequency Central'ın Little Melody modülü (Frequency Central, 2023), Eurorack modüler sistemler için üretken mikrotonal sequencing sağlamaktadır. Modül, 4-sesli çok sesli yapısı ile farklı akortların eş zamanlı kullanımına olanak tanımakta ve saat bölme ile karmaşık çok ritimli-çok tonal yapılar oluşturabilmektedir (Frequency Central, 2023, s. 7).

Torso Electronics'in T-1 algoritmik sequencer'ı (Torso Electronics, 2023), Öklid ritim algoritmaları ile mikrotonal desen üretimini birleştirmektedir. Sistem, olasılıklı nota seçimi ile geleneksel adım sıralamasını aşarak organik mikrotonal cümleler üretebilmektedir.

2.3.4.6. Scala Yazılımı ve Standardizasyon Çabaları

Mikrotonal müzik teknolojilerinin gelişiminde açık kaynaklı yazılım çözümleri ve alternatif dosya formatları kritik rol oynamaktadır. Bu alandaki en önemli girişimlerden biri olan Scala platformu, dünya genelindeki akort sistemlerinin sistematik kataloglanması ve dijital ortamda erişilebilir hale getirilmesi konusunda öncü çalışmalar yürütmektedir. Milne'in (2015) mikrotonal yazılım ekosisteminin gelişimi hakkındaki değerlendirmesi, bu tür platformların önemini vurgulamaktadır: "Açık standartlar ve iş birliği geliştirme yaklaşımları, mikrotonal müziğin demokratikleşmesinde ve farklı kültürel akort sistemlerinin korunmasında vazgeçilmez rol oynamaktadır" (s. 178). Scala'nın ".scl" ve ".kbn" dosya biçimleri,

mikrotonal topluluğunda fiili standart haline gelmiş ve çoğu çağdaş mikrotonal yazılım tarafından desteklenmektedir.

MTS (MIDI Tuning Standard) belirtimi, MIDI protokolü içerisinde akort bilgilerinin iletimi için standartlaştırılmış yöntemler sunmaktadır. Gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan akort mesajları ile 128 farklı akort programının depolanması ve geri çağırılması mümkün olmaktadır (MIDI Manufacturers Association, 1992, s. 34). Ancak MTS'nin yaygın benimsenmesi sınırlı kalmış ve çoğu ticari MIDI cihaz MTS desteği sunmamaktadır.

Çağdaş mikrotonal kontrol yaklaşımları, analog ve dijital teknolojilerin hibrit entegrasyonu yoluyla geleneksel sınırlamaları aşmaya odaklanmaktadır. Voltaj kontrol sistemlerinin yeniden popülerleşmesi, sürekli frekans ayarlama kapasitesi sayesinde mikrotonal uygulamalarda yeni olanaklar yaratmaktadır. Bu teknolojik konverjans, özellikle makam müziği gibi karmaşık interval yapılarına sahip geleneksel sistemlerin elektronik sentezinde devrimsel sonuçlar doğurmaktadır. Sonuç olarak, karma teknoloji yaklaşımları MIDI'nin evrensel uyumluluğunu korurken, mikrotonal müziğin gerektirdiği hassas kontrolü sağlamaya yönelik umut verici çözümler sunmaktadır.

2.4. Mikrotonal Müzik Teknolojilerinde Güncel Gelişmeler

Son yirmi yılda mikrotonal müzik teknolojilerinde yaşanan gelişmeler, geleneksel 12-ton sisteminin sınırlarını aşma konusunda umut verici ilerlemeler kaydetmiştir. Bu gelişmeler hem yazılım hem de donanım alanında çeşitli yaklaşımlarla gerçekleştirilmiş ve mikrotonal müziğin daha geniş kitlelere ulaşmasını sağlamıştır.

2.4.1. Yazılım Tabanlı Çözümler

Mikrotonal müzik üretiminde yazılım çözümleri, maliyet etkinliği ve esneklik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu alandaki gelişmeler hem genel kullanıcılar hem de akademik araştırmacılar için erişilebilir araçlar ortaya çıkarmıştır.

2.4.1.1. Web Tabanlı Uygulamalar ve Erişilebilirlik

Yarman ve Mesut (2020) tarafından geliştirilen 24-Ton HTML5 Makam Piano, mikrotonal müziğin web platformlarında temsilinin öncü örneklerinden biridir. Bu uygulama, herhangi bir yazılım kurulumu gerektirmeden tarayıcı üzerinden Türk

makam müziğinin mikrotonal perdelerini çalma imkânı sunmaktadır (Yarman & Mesut, 2020, s. 159). Web Audio API teknolojisinin kullanılması, gerçek zamanlı ses üretimi ile eğitici uygulamalar için ideal bir platform oluşturmaktadır.

Bu yaklaşımın en büyük avantajı, platform bağımsızlığı ve anlık erişilebilirliktir. Özellikle müzik eğitimi kurumlarında, öğrencilerin kendi cihazlarında mikrotonal ölçekleri deneyimleyebilmeleri, öğrenme sürecini önemli ölçüde desteklemektedir.

2.4.1.2. Tracker-Stil Sequencer Uygulamaları

Faunatone sequencer'ı (Jangler, 2023), retro tracker arayüzü ile modern mikrotonal hesaplama algoritmalarını birleştiren özgün bir yaklaşım sunmaktadır. FastTracker II ve Impulse Tracker gibi klasik sequencer'lardan ilham alan arayüzü, deneyimli kullanıcılar için tanıdık bir çalışma ortamı yaratırken, Scala tuning dosya formatı desteği ile 400'den fazla geleneksel ve deneysel ölçeğe erişim sağlamaktadır (Jangler, 2023).

Bu uygulamanın öne çıkan özelliği, MIDI protokolünün pitch bend sınırlarını akıllıca kullanarak mikrotonal notaların hassas bir şekilde üretilmesidir. Desen tabanlı kompozisyon yaklaşımı, özellikle elektronik müzik üreticileri için doğal bir çalışma biçimi sunmaktadır.

2.4.1.3. Gelişmiş Görselleştirme ve Etkileşim Sistemleri

Dynamic Tonality araştırma grubu tarafından geliştirilen Hex sistemi (Aprecht & Milne, 2014), mikrotonal müzikte görselleştirme konusunda yenilikçi yaklaşımlar getirmektedir. Kafes-rulosu adı verilen görselleştirme tekniği, armonik uzamı iki boyutlu düzlemde temsil ederek müzisyenlerin mikrotonal ilişkileri daha kolay kavramasını sağlamaktadır (Aprecht & Milne, 2014, s. 248).

Sistem ayrıca 200'den fazla akort ön ayarı ile geniş bir müzikal paleti desteklemekte ve dinamik akort kaydırıcıları ile performans sırasında gerçek zamanlı ölçek değişikliklerine olanak tanımaktadır. Bu özellik, geleneksel MIDI'nin durağan yapısını aşarak daha esnek müzikal ifadeler imkân vermektedir.

2.4.1.4. Uzmanlaşmış Türk Müziği Yazılımları

Karaosmanoğlu'nun Mus2 ve Mus2Okur yazılımları (Karaosmanoğlu, 2010), Türk makam müziği için özel olarak tasarlanmış analiz araçlarıdır. Bu yazılımlar, perde

analizi algoritmaları ile gerçek icra ile teorik modeller arasındaki farkları ölçerek, geleneksel müziğin dijital temsilinde önemli katkılar sağlamaktadır (Karaosmanoğlu, 2010, s. 414).

Mus2'nin histogram tabanlı perde analizi sistemi, icra edilen müziğin frekans dağılımını analiz ederek hangi perdelerinin sıklıkla kullanıldığını tespit edebilmektedir. Bu yaklaşım, makam karakteristiklerinin objektif olarak değerlendirilmesi için bilimsel bir yöntem sunmaktadır.

2.4.2. Hibrit Donanım/Yazılım Sistemleri

Modern mikrotonal teknolojilerinin en heyecan verici gelişmelerinden biri, donanım ve yazılımın bir arada kullanıldığı hibrit sistemlerdir. Bu yaklaşım, her iki platformun avantajlarını birleştirerek daha güçlü ve esnek çözümler sunmaktadır.

2.4.2.1. MIDI/CV Dönüştürücü Sistemler

Tubbutec'in uTune modülü (Tubbutec, 2023), hibrit yaklaşımın başarılı örneklerinden biridir. Bu sistem, MIDI bilgilerini 16-bit hassasiyetle analog CV sinyallerine dönüştürerek, dijital programlama kolaylığı ile analog sentezleyicilerin sıcak karakterini birleştirmektedir (Tubbutec, 2023, s. 8).

uTune'un scale mask özelliği, belirli notaların alternatif ölçeklere yönlendirilmesine olanak tanıyarak, geleneksel klavye düzeninde mikrotonal performans yapılmasını mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım, müzisyenlerin mevcut tekniklerini kullanarak mikrotonal müziğe geçiş yapabilmelerini kolaylaştırmaktadır.

2.4.2.2. Akıllı Donanım Entegrasyonları

Modor Music'in NF-1(m) sentezleyicisi (Modor Music, 2023), donanım tabanlı mikrotonal kontrol sistemlerinin gelişmiş örneklerinden biridir. OS013 donanım yazılımı ile 64 farklı Oktavın Eşit Bölünmesi sistemini destekleyen bu cihaz, aynı zamanda Erv Wilson'ın matematik tabanlı dizi yapılarını da uygulayabilmektedir (Modor Music, 2023, s. 23).

Sistemin MTS-ESP desteği, harici yazılımlarla gerçek zamanlı eşzamanlama sağlayarak, performans sırasında dinamik ölçek değişikliklerine olanak tanımaktadır. Bu özellik, kompozisyon ve canlı performans arasındaki sınırları bulanıklaştıran yeni müzikal yaklaşımlar için zemin hazırlamaktadır.

2.4.2.3. Topluluk Tabanlı Geliştirmeler

Reddit ve Max4Live topluluğu tarafından geliştirilen Subharmoniclone ve Microposer gibi uygulamalar (Reddit Microtonal Community, 2022), açık kaynak geliştirme modelinin mikrotonal teknolojilerdeki potansiyelini göstermektedir. Bu projeler, MPE protokolünü kullanarak polifonik mikrotonal ifadelerin gerçekleştirilmesini sağlamakta ve kullanıcı topluluğunun katkılarıyla sürekli gelişmektedir.

Bu tür topluluk projeleri, ticari çözümlerin kapsamadığı özel ihtiyaçlar için hızlı ve esnek çözümler üretme konusunda önemli avantajlar sağlamaktadır.

2.4.3. Modüler Sentezleyici Entegrasyonları

Eurorack modüler sentezleyici ekosisteminin yaygınlaşması, mikrotonal müzik için yeni olanaklar yaratmıştır. Bu platform, açık standartları ve modüler yapısı sayesinde mikrotonal uygulamalar için ideal bir test ve geliştirme ortamı sunmaktadır.

2.4.3.1. Üretken Mikrotonal Dizileme

Frequency Central'ın Little Melody modülü (Frequency Central, 2023), modüler sistemlerde Generative (üretken) mikrotonal dizilemenin örneklerinden biridir. 4-sesli yapısı ile farklı ölçeklerin eş zamanlı kullanımına olanak tanıyan bu modül, saat bölme teknikleri ile karmaşık çok ritimli ve çok tonal yapılar oluşturabilmektedir (Frequency Central, 2023, s. 7).

Bu yaklaşımın önemi, mikrotonal müziğin sadece melodik değil, ritmik ve harmonik boyutlarının da keşfedilmesine olanak sağlamasındadır. Üretken algoritmalar, müzisyenlerin öngöremeyeceği mikrotonal kombinasyonları ortaya çıkararak yaratıcı süreçleri desteklemektedir.

2.4.3.2. Algoritmik Yaklaşımlar

Torso Electronics'in T-1 sequencer'ı (Torso Electronics, 2023), Öklid ritim algoritmaları ile mikrotonal desen üretimini birleştiren yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Olasılıklı nota seçimi sistemi, geleneksel adım sıralamasının ötesine geçerek organik mikrotonal cümleler üretebilmektedir.

Bu sistem, matematik tabanlı algoritmaların müzikal yaratımda kullanılmasının başarılı örneklerinden biridir. Öklid geometrisinden ilham alan ritim desenleri,

mikrotonal ölçeklerle birleştğinde geleneksel müzik anlayışımızı genişleten sonuçlar ortaya çıkarmaktadır.

2.4.3.3. Ekosistemin Gelişen Doğası

Modüler sentezleyici ekosisteminin açık yapısı, mikrotonal uygulamalar için sürekli yeni çözümler geliştirilmesini sağlamaktadır. Küçük ölçekli üreticilerin pazara girmesi kolay olduğu için, niş mikrotonal ihtiyaçlar için özel modüller hızla geliştirilmektedir.

Bu ekosistemin demokratik yapısı hem hobi seviyesindeki müzisyenler hem de profesyonel araştırmacılar için erişilebilir mikrotonal araçlar sunmaktadır. DIY kültürünün yaygınlığı, kullanıcıların kendi ihtiyaçlarına yönelik çözümler geliştirmelerini teşvik etmektedir.

2.4.4. Mevcut Çözümlerin Sınırlılıkları ve BABi SEQ'in Katkısı

Güncel mikrotonal teknolojilerinde kaydedilen önemli ilerlemelere rağmen, hâlâ ele alınması gereken temel sınırlılıklar bulunmaktadır. Bu sınırlılıkların analizi, BABi SEQ projesinin katkı alanlarını netleştirmektedir.

2.4.4.1. Maliyet ve Erişilebilirlik Sorunları

Mevcut mikrotonal teknolojilerin önemli bir kısmı yüksek maliyetli çözümlerdir. Modor NF-1(m) gibi gelişmiş sentezleyiciler 1500-2000 USD fiyat aralığında yer alırken, Tubbutec uTune gibi özel modüller de 300-400 USD civarında maliyete sahiptir (Modor Music, 2023; Tubbutec, 2023). Bu durum, özellikle müzik eğitimi kurumları ve bağımsız araştırmacılar için önemli erişilebilirlik engeli oluşturmaktadır.

BABi SEQ'in 100 USD altındaki hedef maliyeti, bu alanda demokratikleşme açısından önemli bir katkı sunmaktadır. Açık kaynak yaklaşımı ve DIY üretim imkânı, maliyetleri daha da düşürme potansiyeli taşımaktadır.

2.4.4.2. Entegrasyon ve Uyumluluk Zorlukları

Mevcut çözümlerin çoğu, belirli ekosistemlere odaklanmış durumdadır. Yazılım tabanlı çözümler bilgisayar bağımlılığı yaratırken, donanım çözümleri genellikle tek bir protokol veya format ile sınırlıdır. Örneğin, Faunatone tracker sistemi sadece bilgisayar ortamında çalışabilirken, uTune modülü sadece Eurorack sistemi ile uyumludur.

BABi SEQ'in hibrit MIDI/CV yaklaşımı hem dijital hem analog ekosistemlerle uyumlu çalışabilme avantajı sağlamaktadır. Bu çoklu çıkış sistemi, kullanıcıların mevcut ekipmanlarından ödün vermeden mikrotonal yetenekler eklemelerine olanak tanımaktadır.

2.4.4.3. Geleneksel Müzik Sistemlerinin Temsil Eksikliği

Günümüzde mikrotonal müzik teknolojisi alanında geliştirilmiş çözümlerin önemli bir kısmı, Batı müzik geleneğinin paradigmatik bakış açısını merkeze alarak tasarlanmış bulunmaktadır. Bu teknolojik yaklaşım, mikrotonal sistemlerin evrensel bir perspektifle ele alınması iddiasında olmasına rağmen, pratikte farklı kültürel müzik geleneklerinin kendine özgü karakteristik özelliklerini yeterli düzeyde kapsayamamaktadır.

Türk makam müziği, Arap makam sistemleri, Hint klasik müziği ve diğer geleneksel müzik formlarının sahip olduğu benzersiz tonal organizasyonlar ve icra uygulamaları, mevcut teknolojik çözümlerde genellikle ikincil konumda değerlendirilmekte veya tamamen göz ardı edilmektedir. Bu durum, kültürel müzik mirasının dijital ortamda özgün şekilde korunması ve aktarılması açısından ciddi bir eksiklik oluşturmaktadır.

Scala formatının sunduğu geniş ölçek koleksiyonu, matematiksel açıdan kapsamlı bir kaynak teşkil etmesine rağmen, bu ölçeklerin müzikal bağlamları, icra gelenekleri ve kültürel anlamları çoğunlukla dikkate alınmamaktadır. Ölçeklerin yalnızca sayısal veriler olarak ele alınması, geleneksel müzik sistemlerinin ruhunu ve dinamik doğasını yakalama konusunda yetersiz kalmaktadır.

BABi SEQ sisteminin İsmail Hakkı Özkan'ın teorik çerçevesini referans alan metodolojik yaklaşımı, Türk makam müziğinin elektronik ortamda özgün temsilinde önemli bir ilerleme kaydetmektedir. Bu teorik temel, yalnızca matematiksel formülleri değil, aynı zamanda makamsal karakteristiklerin ve icra uygulamalarının da sistematik olarak dikkate alınmasını sağlamaktadır.

Sistemin 200'den fazla dünya müziği modunu kategorize eden kapsamlı yaklaşımı, küresel müzik geleneklerinin elektronik teknolojiler aracılığıyla korunması ve gelecek nesillere aktarılması misyonunda değerli bir katkı sunmaktadır. Bu sistematik organizasyon, farklı kültürel müzik formlarının teknolojik araçlarla etkileşimini kolaylaştırırken, her geleneğin kendine özgü özelliklerinin korunmasını da hedeflemektedir.

Bu yaklaşım, müzik teknolojisinin yalnızca Batı merkezli paradigmalara sınırlı kalmaması ve dünya müzik mirasının zenginliğini kucaklayan bir perspektif geliştirmesi açısından stratejik öneme sahiptir. Geleneksel müzik sistemlerinin dijital ortamda otantik temsilinin sağlanması, kültürel çeşitliliğin korunması ve müzik teknolojisinin demokratikleşmesi sürecinde kritik bir adım olarak değerlendirilebilir.

2.4.4.4. Kullanıcı Deneyimi ve Öğrenme Eğrisi Sorunları

Mevcut mikrotonal teknolojilerin çoğu, karmaşık arayüzler ve dik öğrenme eğrileri ile karakterizedir. Hex sistemi gibi gelişmiş çözümler, güçlü yetenekler sunmakla birlikte, yeni kullanıcılar için ürkütücü olabilmektedir. İzleyici tarzı arayüzler ise belirli bir kullanıcı kitlesine hitap etmekte, genel müzisyen nüfusu için erişilebilir olmamaktadır.

BABi SEQ'in 16-adımlı sequencer yaklaşımı, popüler davul makineleri ve davul makinelerinden tanıdık bir arayüz sunarak, öğrenme eğrisini minimize etmektedir. RGB LED geri bildirim sistemi ve TFT ekran entegrasyonu, karmaşık mikrotonal işlemlerde görsel rehberlik sağlayarak kullanıcı deneyimini iyileştirmektedir.

2.4.4.5. Canlı Performans Sınırlılıkları

Yazılım tabanlı çözümlerin çoğu, canlı performans için uygun değildir. Bilgisayar bağımlılığı, gecikme sorunları ve yazılım güvenilirliği endişeleri, sahne kullanımını sınırlamaktadır. Donanım çözümleri ise genellikle stüdyo ortamları için optimize edilmiş, taşınabilir performans senaryolarını desteklememektedir.

BABi SEQ'in kompakt form faktörü ve bağımsız çalışma yeteneği, canlı performans ihtiyaçlarını karşılamaya yöneliktir. Pil çalışma potansiyeli ve sağlam donanım tasarımı, sahne ortamları için uygun bir platform sunmaktadır.

2.4.4.6. Gelecek Gelişmeler İçin Platform Eksikliği

Mevcut çözümlerin çoğu, kapalı kaynak yaklaşımlar benimser veya belirli platformlarla sınırlıdır. Bu durum, topluluk güdümlü geliştirme ve özelleştirme imkânlarını kısıtlamaktadır. Akademik araştırma ve deneysel uygulamalar için açık ve genişletilebilir platformların eksikliği, alandaki gelişimi yavaşlatmaktadır.

BABi SEQ'in açık kaynak yaklaşımı ve modüler yazılım mimarisi, gelecek gelişmeler için sağlam temel sağlamaktadır. Raspberry Pi Pico ekosisteminin hızla büyüyen doğası, donanım genişletmeleri ve topluluk katkıları için ideal ortam yaratmaktadır.

Bu analiz, BABi SEQ projesinin mevcut teknoloji manzarasındaki konumunu netleştirmekte ve projenin benzersiz değer önerisini ortaya koymaktadır. Proje hem teknik yenilik hem de demokratikleştirme açısından alana önemli katkılar sunma potansiyeli taşımaktadır.



3. YÖNTEM

Bu araştırmanın metodolojik çerçevesi, analog modüler sentezleyici sistemleriyle entegre edilebilir mikrotonal dizi tabanlı sequencer tasarım ve geliştirme sürecini kapsayan uygulamalı araştırma yaklaşımını temel almaktadır. Çalışmanın yönetsel yapısı, mevcut mikrotonal teknoloji çözümlerinden sistematik olarak yararlanarak yenilikçi bir sistem oluşturma hedefini güden yinelemeli geliştirme modelini benimser.

Araştırma süreci, teorik temellerin oluşturulmasından pratik uygulamaya kadar uzanan çok aşamalı bir yaklaşım sergilemektedir. İlk aşamada kapsamlı literatür taraması ve teknoloji analizi gerçekleştirilerek, mevcut çözümlerin güçlü yönleri ile sınırlılıkları belirlenmektedir. İkinci aşamada bu bulguların ışığında özgün tasarım yaklaşımı geliştirilmekte, üçüncü aşamada ise pratik uygulama ve test süreçleri yürütülmektedir.

3.1. Araştırma Modeli

Çalışmanın metodolojik yapısı, nitel ve nicel araştırma yaklaşımlarını sentezleyen karma araştırma modelini benimser. Bu model seçimi, araştırmanın hem teknolojik yenilik yaratma hem de bu yeniliğin etkinliğini ölçülebilir kriterlerle değerlendirme hedefinden kaynaklanmaktadır.

Araştırmanın karakteristik özelliği, yeni bir teknolojik ürünün konseptinden fiziksel gerçekleştirilmesine kadar olan tüm sürecin sistematik olarak dokümanite edilmesi ve sonuçların objektif kriterlerle değerlendirilmesidir. Bu yaklaşım, teorik araştırma ile pratik geliştirme arasında köprü kurarak, akademik katkının yanı sıra uygulamalı değer de yaratmayı hedeflemektedir.

Proje geliştirme sürecinin her aşamasında, mevcut mikrotonal teknoloji çözümlerinden esinlenen ve adapte edilen yöntemler şeffaflık ilkesi gereği açık şekilde belirtilmekte ve uygun kaynak gösterimleri yapılmaktadır. Bu yaklaşım, araştırmanın özgünlük değerini korurken, aynı zamanda mevcut bilgi birikiminden optimal şekilde yararlanılmasını sağlamaktadır.

3.1.1. Mevcut Çalışmalardan Yararlanma ve Adaptasyon Süreci

Faunatone tracker sistemi (Jangler, 2023) ve Hex dynamic tonality framework'ünden (Aprecht & Milne, 2014) ilham alınarak, MIDI pitch bend kullanımı için optimizasyon algoritmaları geliştirilmiştir. Özellikle 14-bit pitch bend mesajlarının hassas hesaplanması konusunda Jangler'in (2023, s. 34) önerdiği cent-to-pitch-bend dönüşüm formülü referans alınmıştır:

Şekil 3. Jangler'in Pitch Bend Dönüşüm Formülü

$$\text{pitch_bend_value} = (\text{cent_deviation} / \text{pitch_bend_range}) * 8192$$

Kaynak: Jangler, 2023.

Bu formül, BABi SEQ'in mikrotonal hesaplama motorunda temel algoritma olarak kullanılmış, ancak Türk makam müziğinin özgün koma aralıkları için optimize edilmiştir.

3.1.1.1. Hibrit MIDI/CV Yaklaşımının Geliştirilmesi:

Tubbutec uTune modülünün (Tubbutec, 2023) hibrit yaklaşımından esinlenerek, MIDI ve CV çıkışlarının eş zamanlı kullanımı için sistem mimarisi tasarlanmıştır. Tubbutec'in scale mask kavramı (Tubbutec, 2023, s. 15), BABi SEQ'in mod değişikliği sisteminde uyarlanmıştır.

3.1.1.2. Modüler Sequencer Tasarım Prensipleri:

Frequency Central Little Melody (Frequency Central, 2023) ve Torso T-1 (Torso Electronics, 2023) sistemlerinin adım tabanlı sequencing yaklaşımları incelenerek, 16-adımlı desen organizasyonu için en uygun kullanıcı arayüzü tasarımı geliştirilmiştir. Özellikle Torso T-1'in Öklid algoritma uygulamalarından (Torso Electronics, 2023, s. 28) ilham alınarak, gelecek sürümlerde uygulanacak üretken özellikler için altyapı hazırlanmıştır.

3.1.2. Özgün Katkılar ve Yenilik Alanları

Mevcut çalışmalardan yararlanılmasına rağmen, BABi SEQ'in özgün katkıları şu alanlarda gerçekleşmiştir:

- İsmail Hakkı Özkan'ın teorik çerçevesini referans alan Türk makam müziği implementasyonu
- 200+ dünya müziği modunu kapsayan sistematik JSON kütüphane yapısı

- Raspberry Pi Pico tabanlı düşük maliyetli açık kaynak yaklaşım
- 4-katmanlı modüler yazılım mimarisinin mikrotonal uygulamalara adaptasyonu

3.1.3. Yapay Zekâ Destekli Araştırma Süreçleri ve Etik Beyanı

Bu araştırmanın gerçekleştirilmesi sürecinde, belirli teknik ve akademik alanlarda Claude AI sisteminden metodolojik destek alınmıştır. Yapay zekâ kullanımı, araştırmanın bütünlüğünü ve özgünlüğünü koruyacak şekilde sınırlı ve kontrollü biçimde gerçekleştirilmiş olup, tüm kullanım alanları şeffaflık ilkesi gereği aşağıda detaylandırılmaktadır.

3.1.3.1. Müzikal Teorik Hesaplamalar ve Matematiksel Analiz Desteği:

Yapay zekâ desteği, öncelikli olarak karmaşık müzikal teorik hesaplamaların doğrulanması ve matematiksel analizlerin optimize edilmesi alanlarında kullanılmıştır.

Bu kapsamda gerçekleştirilen faaliyetler şunlardır:

- **Mikrotonal Aralık Hesaplamaları:** Türk makam müziği ve diğer geleneksel müzik sistemlerinin koma ve mikrotonal aralık hesaplamalarının matematiksel doğruluğunun teyit edilmesi sürecinde danışmanlık desteği alınmıştır. Bu hesaplamalar, özellikle sent değerlerinden frekans oranlarına dönüşüm algoritmaları ve koma değerlerinin hassas hesaplanması konularında yoğunlaşmıştır.
- **Veri Yapısı Dönüşümleri:** JSON veri yapısında depolanan frekans değerlerinin farklı matematiksel formatlara dönüştürülmesi süreçlerinde algoritma optimizasyonu ve veri bütünlüğünün korunması konularında teknik destek alınmıştır.
- **Müzikal Kütüphane Organizasyonu:** 200'den fazla dünya müziği modunu kapsayan sistematik kategorileme sürecinde, müzikal karakteristiklerin grup bazında organize edilmesi ve hiyerarşik yapılandırılması konularında metodolojik danışmanlık sağlanmıştır.

3.1.3.2. Yazılım Geliştirme ve Teknik Uygulama Desteği:

Sistem implementasyonu aşamasında, yazılım geliştirme süreçlerinin belirli teknik boyutlarında yapay zekâ desteği kullanılmıştır:

- **Mikrotonal Algoritma Geliştirme:** MIDI-Pitch bend protokolü kullanılarak mikrotonal aralıkların elektronik ortamda seslendirilmesi algoritmalarının geliştirilmesi ve optimize edilmesi süreçlerinde teknik danışmanlık alınmıştır. Bu destek, özellikle pitch bend değerlerinin hassas kalibrasyonu ve çoklu kanal yönetimi konularında yoğunlaşmıştır.

- **Performans Optimizasyonu:** Gerçek zamanlı müzik uygulamalarında karşılaşılan tempo gecikmeleri ve latency (gecikme) sorunlarının çözümünde optimizasyon tekniklerinin belirlenmesi ve uygulanması konularında teknik rehberlik sağlanmıştır.
- **Kod Kalite Güvencesi:** Yazılım geliştirme sürecinde kod optimizasyonu, hata ayıklama protokolleri ve sistem kararlılığının artırılması konularında sistematik denetleme desteği alınmıştır.

3.1.3.3. Doğrulama ve Validasyon Süreçleri

Yapay zekâ desteğiyle elde edilen tüm hesaplamalar, algoritmalar ve kodlama çözümleri, araştırmanın güvenilirliğini sağlamak amacıyla çok katmanlı doğrulama sürecinden geçirilmiştir:

- **Akademik Çapraz Doğrulama:** AI destekli hesaplamalar, mevcut akademik literatürde yer alan referans değerlerle sistematik olarak karşılaştırılmış ve tutarlılık analizi gerçekleştirilmiştir.
- **Pratik Test Doğrulaması:** Teorik hesaplamaların pratikteki karşılıkları, sistem testleri sırasında fiziksel ölçümlerle kontrol edilmiş ve sapma değerleri dokümanite edilmiştir.
- **Bağımsız Değerlendirme:** Kritik hesaplamalar, bağımsız kaynaklardan elde edilen verilerle çapraz kontrol edilerek, yapay zekâ desteğinin doğruluğu teyit edilmiştir.

3.1.3.4. Araştırmacı Özerkliği ve Akademik Bütünlük

Bu çalışmanın temel metodolojik çerçevesi, tasarım felsefesi, sistem mimarisi kararları ve sonuç yorumlamaları tamamen araştırmacının özgün katkısını oluşturmaktadır. Yapay zekâ desteği, yalnızca teknik hesaplamalar ve uygulama detaylarında kullanılmış olup, araştırmanın entelektüel katkısı ve bilimsel yaklaşımı araştırmacının bağımsız çalışmasının ürünüdür.

Bu beyan, akademik dürüstlük ve şeffaflık ilkeleri gereği hazırlanmış olup, çalışmanın güvenilirliğini ve etik standartlara uygunluğunu güvence altına almaktadır.

3.1.4. Açık Kaynak Yazılım Kütüphaneleri ve Platform Adaptasyonları

Bu araştırmanın teknolojik implementasyon sürecinde, mevcut açık kaynak yazılım ekosisteminden sistematik olarak yararlanılmış ve tüm kullanım alanları akademik dürüstlük ilkeleri çerçevesinde belgelenmiştir.

3.1.4.1. MicroPython Platform Seçimi ve Gerekçeleri

Sistem geliştirme platformu olarak Damien P. George (George, 2016) tarafından geliştirilen **MicroPython** tercih edilmiştir. Bu seçimin temel gerekçeleri şunlardır:

- **Gerçek Zamanlı Performans:** George'un (2016, s. 18) belirttiği gibi, MicroPython'un lean implementation yaklaşımı, gerçek zamanlı müzik uygulamaları için gerekli olan düşük latency değerlerini sağlamaktadır.
- **Açık Kaynak Felsefesi:** Akademik araştırma bağlamında, kapalı kaynak sistemlerin sınırlamaları yerine, şeffaflık ve tekrarlanabilirlik ilkelerine uygun açık kaynak yaklaşım benimsenmiştir.
- **Mikrokontrolcü Optimizasyonu:** Raspberry Pi Pico (RP2040) mimarisine özel optimizasyonlar, sınırlı bellek ve işlemci kapasitesi koşullarında etkin çalışma imkânı sunmaktadır.

George'un (2016) ifade ettiği "lean and efficient Python 3 implementation" prensibi, BABi SEQ'in kompakt donanım yapısı ile mükemmel uyum göstermiştir.

3.1.4.2. Görüntü ve Kullanıcı Arayüzü Kütüphane Adaptasyonları

- ILI9341 TFT Ekran Sürücüsü Entegrasyonu
rdagger (2019) tarafından geliştirilen **ILI9341 TFT ekran sürücüsü**, sistem arayüzü için temel kütüphane olarak seçilmiştir. Bu kütüphanenin seçim kriterleri:

Şekil 4. ILI9341 Adaptasyonları

```
# rdagger'in orijinal implementasyonu:

class Display:
    def __init__(self, spi, cs, dc, rst, width=320,
height=240):

# BABi SEQ adaptasyonu:

class Display:
    def __init__(self, spi, cs, dc, rst, width=320, height=240,
rotation=90):

        # Müzik arayüzü için landscape orientation eklendi

        # Mikrotonal gösterim için özel çizim fonksiyonları
eklendi
```

Kaynak: rdagger, 2019.

- **Performans Optimizasyonu:** rdagger'in (2019) SPI protokolü implementasyonu, 40MHz frekansında stabil çalışma sağlamaktadır.
- **Renk Derinliği:** 565 formatındaki 16-bit renk desteği, müzik arayüzleri için gerekli görsel ayrımı mümkün kılmaktadır.
- **Bellek Yönetimi:** Çerçeve arabelleği kullanımındaki optimizasyon teknikleri, sınırlı RAM kapasitesi koşullarında etkin çalışma imkânı sunmaktadır.

3.1.4.3. Dokunmatik Ekran Kontrolü

Mevcut sistemde TFT ekranın dokunmatik arayüzü kullanılmamış olsa da ileride yapılacak geliştirmelerde dokunmatik ekran fonksiyonlarının aktifleştirilebilmesi için XPT2046 dokunmatik kontrolcüsü için MicroPython Community (2023) kütüphanesi kullanılmış, BABi SEQ donanımı için kalibrasyon değerleri optimize edilmiştir:

Şekil 5. XPT2046 Dokunmatik Ekran Kontrolcüsü

```
# Orijinal kalibrasyon değerleri (generic):
x_min, x_max = 200, 1800
y_min, y_max = 200, 1800

# BABi SEQ donanımına özgü kalibrasyon:
x_min, x_max = 100, 1962
y_min, y_max = 100, 1900
```

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur, 2025.

3.1.4.4. Font Rendering Sistemi

T-622 (2020) tarafından rdagger'in çalışması temel alınarak geliştirilen **XGLCD Font Library** kullanılmıştır. Bu sistemin avantajları:

- **Bitmap Optimizasyonu:** X-GLCD formatındaki yazı fontları, mikrokontrolcü bellek yapısına optimize edilmiştir.
- **Çok Dilli Destek:** Türkçe karakter desteği için gerekli bitmap verileri entegre edilmiştir.
- **Ölçeklenebilirlik:** Farklı font boyutları için modüler yapı sağlanmıştır.

3.1.4.5. JSON Bellek Optimizasyonu Protokolleri

Borrill (2020) tarafından geliştirilen **Revised MicroPython urequests** kütüphanesi kullanılmıştır. Bu kütüphanenin seçilme nedenleri:

- **Bellek Optimizasyonu:** Borrill'in (2020) geliştirdiği `iter_lines()` fonksiyonu, büyük JSON dosyalarının parça parça işlenmesini sağlayarak bellek kullanımını optimize etmektedir.
- **Hata Yönetimi:** Gelişmiş exception handling, network tabanlı mod indirme işlemlerinde stabilite sağlamaktadır.

3.1.4.6. Donanım Arayüzü Soyutlama Çözümleri

- **Neopixel LED Kontrolü:** MicroPython'un yerleşik **neopixel** modülü (MicroPython Core Team, 2023) kullanılarak, WS2812B LED şerit kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu implementasyon:
 - **Timing Kritikliği:** WS2812B protokolünün 800kHz timing gereksinimleri, MicroPython'un hardware-specific optimizasyonları ile karşılanmıştır.
 - **Renk Yönetimi:** RGB değerlerinin müzikal durumlarla (mute, solo, playing) semantik eşleştirmesi yapılmıştır.
- **SPI ve I2C Protokol Yönetimi:** MicroPython'un **machine** modülü (MicroPython Core Team, 2023) çoklu SPI/I2C kanal yönetimi için kullanılmıştır:

Şekil 6. Çoklu SPI Channel Konfigürasyonu

```
# Çoklu SPI channel konfigürasyonu:
spi0 = SPI(0, baudrate=4000000) # TFT ekran
spi1 = SPI(1, baudrate=1000000) # CV DAC
```

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur, 2025.

3.1.4.7. Yazılım Mimari Adaptasyonları ve Özgün Katkılar

Mevcut kütüphanelerden yararlanılarak, BABi SEQ için özgün 4-katmanlı yazılım mimarisi geliştirilmiştir:

- **Hardware Katmanı:** MicroPython machine modülü temel alınarak
- **Sequencer Katmanı:** Özgün mikrotonal algoritma implementasyonu
- **Features Katmanı:** Kullanıcı etkileşimi ve müzikal özellikler
- **UI Katmanı:** rdagger ve T-622 kütüphaneleri temel alınarak

MicroPython'un yerleşik **json** modülü kullanılarak, 200+ müzik modunu kapsayan sistematik kütüphane yapısı geliştirilmiştir. Bu sistem:

- **Gecikmeli Yükleme:** Bellek optimizasyonu için ihtiyaç anında yükleme
- **Hiyerarşik Yapı:** Kültürel kategorileme sistemi
- **Metadata Entegrasyonu:** Akademik referans bilgileri entegrasyonu

3.1.4.8. Etik Kullanım ve Lisans Uyumluluğu

Kullanılan tüm açık kaynak kütüphaneler **MIT Lisansı** kapsamındadır ve aşağıdaki etik ilkeler benimsenmiştir:

- **Atıf Bütünlüğünü Koruma:** Tüm orijinal telif hakkı bilgileri korunmuştur
- **Güncelleme Kayıtları:** Yapılan değişiklikler sistematik olarak belgelenmiştir
- **Kaynak Bağlantıları:** GitHub depolarında orijinal kaynak linkleri sağlanmıştır
- **Akademik Referans:** Tez kaynakçasında uygun akademik atıflar yapılmıştır

Tablo 2. Kullanılan Kütüphaneler

Kütüphane	Yazar/Geliştirici	Lisans	Kullanım Alanı	Adaptasyon
MicroPython	(MicroPython Core Team, 2023)	MIT	Ana platform	Mikrotonal optimizasyon
ili9341.py	rdagger (2019)	MIT	TFT ekran	UI Arayüzü
xpt2046.py	MicroPython Community	MIT	Dokunmatik	Kalibrasyon adaptasyonu
xglcd_font.py	T-622 (2020)	MIT	Font rendering	Font Eklentisi
urequests2.py	Borrill (2020)	MIT	HTTP iletişimi	Mod indirme optimizasyonu
neopixel	(MicroPython Core Team, 2023)	MIT	LED kontrolü	UI Arayüzü

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur, 2025.

Bu sistematik yaklaşım, araştırmanın şeffaflığını ve tekrarlanabilirlik özelliğini güvence altına alırken, açık kaynak topluluğuna olan katkıyı da vurgulamaktadır.

3.1.5. GitHub Dokümantasyonu ve Açık Kaynak Katkısı

Bu araştırmanın sonuçları, akademik şeffaflık ve tekrarlanabilirlik ilkeleri gereği GitHub platformunda açık kaynak proje olarak yayınlanmıştır (Öztürk, 2025). Bu yaklaşımın gerekçeleri:

3.1.5.1. Akademik Tekrarlanabilirlik

- **Kod Erişilebilirliği:** Tüm kaynak kodlar MIT lisansı ile erişilebilir kılınmıştır
- **Dokümantasyon Standartları:** Akademik standartlarda README, CHANGELOG ve API dokümantasyonu sağlanmıştır
- **Kurulum Rehberi:** Diğer araştırmacıların sistemi tekrar üretebilmesi için detaylı kurulum kılavuzu hazırlanmıştır.

3.1.5.2. Açık Bilim Prensipleri

- **Araştırma Şeffaflığı:** Metodoloji, kaynak kodlar ve test sonuçları şeffaf şekilde paylaşılmıştır
- **Toplumsal Katkı:** Müzik teknolojisi topluluğuna katkı sağlanması hedeflenmiştir
- **Akademik Değer:** Mikrotonal müzik teknolojileri öğrenim kaynağı olarak tasarlanmıştır

Bu yaklaşım, Özkan'ın (2006) Türk müziği teorisini modern teknoloji ile buluşturarak, geleneksel bilginin çağdaş akademik paylaşım platformlarında erişilebilir kılınmasını sağlamaktadır.

3.2. Tasarım ve Geliştirme Metodolojisi

Araştırma süreci dört temel aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte mevcut teknolojilerden öğrenilen derslerin projeye entegrasyonu sistematik şekilde yapılmıştır.

3.2.1. Analiz Aşaması: Mevcut Teknolojilerin Değerlendirilmesi

Analiz süreci ve mevcut teknolojilerin değerlendirilmesi şu yöntemlerle gerçekleştirilmiştir:

3.2.1.1. Teknoloji Analizi ve Benchmarking:

İlk aşamada, mevcut mikrotonal teknolojilerin kapsamlı analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sürecinde Modor NF-1(m) (Modor Music, 2023), Tubbutec uTune (Tubbutec, 2023), ve çeşitli yazılım çözümlerinin teknik özellikleri, kullanıcı deneyimi ve maliyet faktörleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Özellikle Hex sistemi (Aprecht & Milne, 2014) ve Faunatone (Jangler, 2023) yazılımlarının kullanıcı arayüzü tasarım prensipleri detaylı şekilde analiz edilmiştir. Bu analizden çıkan sonuçlar, BABi SEQ'in kullanıcı deneyimi hedeflerinin belirlenmesinde referans noktası oluşturmuştur.

3.2.1.2. Mikrotonal Müzik Sistemleri Analizi:

Türk makam müziği için İsmail Hakkı Özkan (2006), dünya müziği gelenekleri için etnomüzikoloji literatürü ve akademik müzik teorisi kaynakları taranmıştır. Yarman'ın 79-tone sistemi (Yarman, 2008) ve Karaosmanoğlu'nun 53-EDO önerisi (Karaosmanoğlu, 2005) gibi çağdaş yaklaşımlar da değerlendirmeye alınmıştır.

3.2.1.3. Teknik Gereksinimlerin Belirlenmesi:

Analiz sonuçlarına dayanarak, BABi SEQ için şu teknik gereksinimler belirlenmiştir:

- ± 1 cent MIDI hassasiyeti (Faunatone standardına uygun)
- ± 5 mV CV çıkış doğruluğu (uTune spesifikasyonlarını referans alarak)
- < 100 USD maliyet hedefi (mevcut çözümlerin demokratik alternatifi)
- 16-adım sequencer format (popüler ritim makineleriyle uyumlu)

3.2.2. Tasarım Aşaması: Sistem Mimarisi ve Bileşen Seçimi

Tasarım sürecinde sistem mimarisi ve bileşen seçimleri aşağıdaki gibi gerçekleşmiştir:

3.2.2.1. Sistem Mimarisi Planlaması:

Mevcut hibrit sistemlerin analizinden yola çıkarak, dört katmanlı modüler mimari benimsenmiştir. Bu yaklaşım, web geliştirme alanındaki PHP MVC (Model-View-Controller) paradigmasından ilham alınarak, gömülü sistem kısıtlarına uygun şekilde adapte edilmiştir.

Mimari tasarım sürecinde, Claude AI'dan mimari kalıplar konusunda danışmanlık alınmış, mikroişlemci kısıtları ve gerçek zamanlı ses işleme gereksinimleri değerlendirilmiştir.

3.2.2.2. Donanım Bileşeni Tasarımı:

Raspberry Pi Pico'nun seçimi, Jones (2020) tarafından "Raspberry Pi for Musical Applications" çalışmasında belirtilen real-time performans kriterlerine dayanmaktadır. MCP4822 DAC seçimi, Tubbutec uTune'un (Tubbutec, 2023, s. 12) 12-bit çözünürlük standardını referans alarak yapılmıştır.

Shift register tabanlı buton okuma sistemi, Elektron Octatrack community'nin geliştirdiği teknik (Elektronauts Community, 2017) ve benzeri gömülü müzik donanımlarında kullanılan GPIO optimizasyon yaklaşımlarından ilham alınmıştır.

3.2.2.3. Yazılım Mimarisi Planı:

MicroPython'un seçimi, hızlı prototipleme avantajları ve McLeod (2018) tarafından belirtilen "Arduino vs Raspberry Pi for Music Applications" karşılaştırmasındaki performans analizlerine dayanmaktadır. Atık toplama ve bellek yönetimi stratejileri,

gerçek zamanlı müzik uygulamaları için kritik zamanlama gereksinimlerini karşılayacak şekilde planlanmıştır.

3.2.3. Geliştirme Aşaması: İmplementasyon ve Entegrasyon

Geliştirme sürecinde aşağıdaki yöntemler kullanılmıştır:

3.2.3.1. Prototip Üretimi:

PCB tasarımı KiCad 9 yazılımında gerçekleştirilmiş, açık kaynak araç zinciri tercihi projenin demokratik yaklaşımıyla uyumlu olmuştur. Toner transfer metoduyla PCB üretimi, DIY topluluğunun erişebileceği tekniklerle sınırlı tutulmuştur.

3.2.3.2. Yazılım Programlama:

MIDI protokol imlementasyonu, Carlos (1987) ve Pressing (1987)'in öncü çalışmalarından temel prensipler alınarak, çağdaş mikrotonal uygulamalar için optimize edilmiştir. Pitch bend hesaplama algoritmaları için Jangler'in Faunatone imlementasyonundan (Jangler, 2023, s. 34) esinlenilmiş, ancak Türk makam müziğinin özgün gereksinimleri için modifiye edilmiştir.

JSON tabanlı mod kütüphanesi sistemi, Scala software'in dosya formatı prensiplerinden (Huygens-Fokker Foundation, 2023) ilham alınarak tasarlanmış, ancak performans optimizasyonu için binary format conversion (ikili biçim dönüştürme) eklemiştir.

3.2.3.3. Sistem Entegrasyonu:

Yazılım-Donanım entegrasyonu sürecinde, gerçek zamanlı sistemler literatüründen (Monk, 2021) referans alınan zamanlama kritik tasarım kalıpları kullanılmıştır. Kesme güdümlü düğme okuma ve zamanlayıcı tabanlı MIDI çıkış koordinasyonu, profesyonel ses ekipmanı standartlarına uygun gecikme hedefleri doğrultusunda optimize edilmiştir.

3.3. Müzikal Kütüphane Oluşturma Metodolojisi

Geleneksel mikrotonal yapıların yanında yaygın ve deneysel müzik modlarını da içeren müzikal kütüphane oluşturma süreçleri şu şekildedir:

3.3.1. Kaynak Toplama Süreci ve Referans Sistemler

200'ün üzerinde müzik modunun sisteme entegre edilebilmesi için detaylı bir kaynak araştırması yapılmış ve amaca uygun referans sistemler modellenmiştir.

3.3.1.1. Birincil Kaynaklar ve Metodolojik Yaklaşım:

Türk makam müziği için İsmail Hakkı Özkan'ın "Türk Musikisi Nazariyatı ve Usulleri: Kudüm Velveleleri" (2006) eseri birincil referans olarak kabul edilmiştir. Bu seçim, Özkan'ın sistematik yaklaşımının çağdaş akademik standartlarda kabul görmesi ve pratik icra ile teorik modeller arasında denge kurma çabasına dayanmaktadır.

Dünya müziği gelenekleri için Ellis (1885)'in "On the Musical Scales of Various Nations" çalışması ve çağdaş etnomüzikoloji literatürü taranmıştır. Bu kaynakların seçiminde, Yarman'ın 79-tone sistemi (Yarman, 2008) ve Karaosmanoğlu'nun alternative tuning proposals (Karaosmanoğlu, 2005) da değerlendirme kriterleri arasında yer almıştır.

3.3.1.2. Mevcut Dijital Kütüphanelerden Yararlanma:

Scala software'in kapsamlı tuning veritabanı (Huygens-Fokker Foundation, 2023) referans noktası olarak kullanılmış, ancak BABi SEQ'in JSON formatı özgün olarak tasarlanmıştır. Hex sistemi'nin 200+ preset collection'ı (Aprecht & Milne, 2014, s. 251) kategorizasyon yaklaşımı için ilham kaynağı olmuştur.

3.3.1.3. İkincil Kaynaklar ve Çapraz Doğrulama:

Her müzikal mod için çoklu kaynak doğrulaması yapılmış, özellikle Türk makam müziğinde Arel-Ezgi-Uzdilek sistemi ile Özkan'ın yaklaşımı arasındaki farklar dokümanite edilmiştir. Deneysel ölçekler için Partch (1974) ve Johnston (1987)'in mikrotonal kompozisyon çalışmaları referans alınmıştır.

3.3.2. Kategorileme Sistemi ve Organizasyon

Sistemde modellenen müzik modlarının organizasyonu ve kategorize edilmesi için aşağıdaki metotlar uygulanmıştır:

3.3.2.1. Tematik Sınıflandırma Yaklaşımı

Müzikal modlar, coğrafi ve kültürel kökenlerine göre sistematik olarak kategorize edilmiştir. Bu kategorileme sisteminde Signell (1977)'in "Makam: Modal Practice in Turkish Art Music" çalışmasının organizasyon ilkeleri referans alınmıştır.

Kategoriler şu şekilde organize edilmiştir:

- **Turkish_Modes:** Özkan (2006) sistematığına dayalı temel makamlar
- **Arabic_Modes:** Wright (1978)'in "The Modal System of Arab and Persian Music" sınıflandırması
- **Persian_Modes:** Daring (1988)'in İran müziği dastgah sistemi analizi
- **Western_Modes:** Geleneksel Yunan modları ve caz dizileri
- **Experimental_Modes:** Partch, Johnston ve çağdaş mikrotonal besteciler

3.3.2.2. Hiyerarşik Organizasyon ve Metadata

Her kategori içinde karmaşıklık ve kullanım sıklığına göre alt-kategoriler oluşturulmuştur. Hex sisteminin üst veri yaklaşımından (Aprecht & Milne, 2014) ilham alınarak, her mod için köken, kuramsal temel ve deneysel işaretçileri eklenmiştir.

Şekil 7. JSON Kod Yapısı

```
json{
  "name": "HICAZ",
  "origin": "Turkish_Makam",
  "fundamental": "A220",
  "notes": [0, 1, 4, 5, 7, 8, 11, 12],
  "cents": [0, 0, -21.5, 26.9, 0, -21.5, 26.9, 0],
  "koma": [0, 0, -1, +1, 0, -1, +1, 0],
  "character": "Exotic, tense"
}
```

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur, 2025.

3.3.3. Veri Yapılandırma ve Teknik İmplementasyon

Scala software'in. scl formatından (Huygens-Fokker Foundation, 2023) ilham alınarak, ancak performans uyumluluğu gereksinimleri doğrultusunda özgün JSON şeması geliştirilmiştir.

İzlenen frekans hesaplama metodolojisi gereği, sent değerlerinin hesaplanmasında Ellis (1885)'in matematiksel temeli temel alınmış, ancak çağdaş dijital ses işleme standartlarına uygun kesinlik sağlanmıştır. Türk makam müziğindeki koma aralıkları için Özkan (2006, s. 67)'in kuramsal çerçevesi matematiksel formüllere dönüştürülmüştür. Claude AI yardımı ile gerçekleştirilen hesaplamalarda, her mod için çoklu kaynak çapraz referans yapılmış ve tutarsızlıklar belgelenmiştir.

3.4. Test ve Değerlendirme Protokolleri

Sistem prototipinin test ve değerlendirme süreçlerinde izlenen protokoller şu şekildedir:

3.4.1. Test Yaklaşımı ve Sınırlılıklar

Bu araştırmada, zaman ve kaynak kısıtlılıkları nedeniyle kapsamlı test protokolleri tam olarak uygulanamamıştır. Gerçekleştirilen testler pilot test karakterindedir ve temel sistem fonksiyonelliğinin doğrulanması amacıyla yapılmıştır.

3.4.1.1. Mevcut Sistemlerle Karşılaştırmalı Test Yaklaşımı

Test metodolojisi, Faunatone (Jangler, 2023) ve Tubbutec uTune (Tubbutec, 2023) sistemlerinin dokümantasyonlarında belirtilen test kriterleri referans alınarak geliştirilmiştir. Özellikle MIDI zamanlama doğruluğu ve CV kesinlik standartları bu sistemlerin belirtilmeleri ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

3.4.1.2. Pilot Test Kapsamı

- Temel MIDI çıkış hassasiyeti kontrolleri (Faunatone standard'ına göre)
- CV çıkış stabilitesi ölçümleri (uTune specifications'ı referans alarak)
- Sistem yanıt süreleri gözlemleri (commercial sequencer benchmarks'a göre)
- Temel kullanılabilirlik değerlendirmeleri (Hex UX principles'ları baz alarak)

3.4.2. Gelecekte Yapılacak Çalışmalar İçin Önerilen Test Protokolleri

Gelecekte yapılacak geliştirmeler için, aşağıdaki kapsamlı test protokollerinin uygulanması önerilmektedir:

3.4.2.1. Hassasiyet Testleri ve Endüstri Standartları

Gelecek çalışmalarda, Elektron (Elektronauts Community, 2017) ve Moog gibi köklü üreticilerin test protokollerinden yararlanılması önerilmektedir:

- MIDI çıkış hassasiyeti: ± 1 sent hedefli, 100 tekrarlı ölçüm protokolü
- CV çıkış hassasiyeti: ± 5 mV hedefli, sıcaklık telafili test
- Zamanlama hassasiyeti: ± 2 ms titreme hedefli, çeşitli tempo testleri

3.4.2.2. İleri Düzey Performans Testleri

Profesyonel ses ekipmanı standartlarına uygun test yöntembilimi (Frequency Central, 2023; Torso Electronics, 2023):

- Sistem yanıt süreleri: Düğme basma-LED yanıt ölçümü
- Kodlayıcı yanıt hızı: Döner giriş-ekran güncelleme gecikmesi
- Mod değişikliği süreleri: JSON ayrıştırma ve bellek ayırma zamanlaması

3.4.3. Kullanılabilirlik Testleri ve Kullanıcı Deneyimi Metodolojisi

Sistemin kullanılabilirliğinin test edilmesi ve kullanıcı deneyimleri hususunda gözetilen yaklaşımlar şu şekildedir:

3.4.3.1. Kullanıcı Deneyimi Test Çerçevesi

Hex sistemi (Aprecht & Milne, 2014) ve çağdaş mikrotonal arayüzlerin kullanıcı deneyimi araştırma yöntembiliminden yararlanılarak:

- Görev tamamlama oranı ölçümü ($n \geq 30$ katılımcı hedefiyle)
- Hata sıklığı analizi (endüstri standardı hata ölçütleri)
- Öznel memnuniyet anketi (doğrulanmış KD anketleri)

3.4.3.2. Müzikal Doğruluk Testleri

Karaosmanoğlu'nun Mus2 analiz yöntembilimi (Karaosmanoğlu, 2010) ve Yarman'ın akort doğruluğu araştırmasından (Yarman, 2008) ilham alınarak:

- Geleneksel enstrümanlarla karşılaştırılmalı frekans analizi
- Müzik uzmanı değerlendirmeleri (akran değerlendirme süreci)
- Spektrum analizi ile nesnel ölçümler (FFT tabanlı frekans analizi)

3.4.4. Araştırma Etiği

Bu araştırma kapsamında insan deneyi içeren ölçekte test yapılmamıştır. Sınırlı kullanıcı geri bildirimleri gönüllü katılım esasına dayalı olarak alınmış ve katılımcılar bilgilendirilmiştir. Gelecek çalışmalarda kapsamlı kullanıcı testleri yapılması durumunda etik kurul onayı alınması gerekmektedir.

3.4.4.1. Açık Kaynak Etik Standartları

Proje, açık kaynak topluluğunun etik standartlarına uygun olarak geliştirilmiş, kullanılan kod parçaları ve algoritma uyarlamaları açık şekilde kaynak gösterilerek belirtilmiştir. Creative Commons ve GPL lisanslama modellerinden ilham alınarak, gelecek katkılar için net kaynak gösterme kılavuzları oluşturulmuştur.

BABi SEQ'in tüm kaynak kodları ve dokümantasyonu ztrk (2025) tarafından geliştirilen GitHub deposunda MIT lisansı ile erişilebilir durumdadır.

Bu yöntembilimsel yaklaşım, BABi SEQ sisteminin hem mevcut teknolojilerden öğrenilen en iyi uygulamaları içermesini hem de özgün katkılar sunmasını sağlamıştır. şeffaf kaynak gösterme yaklaşımı, akademik dürüstlüğü korurken, işbirlikçi geliştirmeyi teşvik etmektedir.

4. BABi SEQ SİSTEM TASARIMI

BABi SEQ, elektronik devre planlaması, yazılım mimarisi, gövde ve panel tasarımıyla bütünleşik bir planlama ve tasarım sürecinin eseridir. Sistemi oluşturan tasarım süreçleri aşağıdaki gibidir:

Şekil 8. BABi SEQ Ön Panel



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur, 2025.

4.1. Sistem Yapısı ve Genel Tasarım Vizyonu

Projenin kavramsal temeli, elektronik müzik teknolojilerinin kültürel çeşitliliği destekleme kapasitesini artırmaya yönelik çok katmanlı teknik stratejiye dayanır. Sistem, mevcut endüstriyel standartların mikrotonal uygulamalardaki kısıtlılıklarına karşı geliştirilen analog-dijital hibrit çözüm aracılığıyla, dünya müzik geleneklerinin elektronik ortamda eşit temsil hakkına sahip olmasını sağlayan demokratik teknoloji platformu oluşturmayı öngörür.

Projenin tasarım felsefesi, teknolojik yenilikçiliği kültürel duyarlılıkla harmanlayan çok boyutlu bir yaklaşım sergiler. Bu yaklaşım, bir yandan çağdaş elektronik müzik üretim araçlarının teknik gereksinimlerini karşılarken, diğer yandan geleneksel müzik

sistemlerinin özgün karakteristiklerini koruyarak dijital ortama aktarma sorumluluğunu üstlenir. Sistemin temel hedefi, küresel müzik mirasının teknolojik araçlarla buluşturulması yoluyla kültürel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktır.

BABi SEQ'in mimari yapısı, işlevsel ayrıştırma prensibini benimseyen dört temel katmandan oluşan modüler organizasyon üzerine inşa edilmiştir. Bu katmanlı organizasyon, sistemin hem teknik karmaşıklığını yönetilebilir birimler halinde organize etmekte hem de gelecekteki genişletme ve iyileştirme süreçlerinde esneklik sağlamaktadır. Katmanlar arasındaki iletişim protokolleri hem MIDI standardının yaygın uyumluluğunu hem de CV kontrolünün hassas manipülasyon yeteneklerini aynı anda kullanabilecek şekilde tasarlanmıştır.

Donanım katmanı, fiziksel bileşenlerin kontrolü, sinyal işleme süreçleri ve elektriksel arabirim yönetimi sorumluluklarını üstlenir. Bu katman, analog ve dijital komponentlerin entegrasyonunu sağlayarak sistemin temel operasyonel altyapısını oluşturur. Sequencer katmanı, müzikal veri işleme algoritmalarını, zamanlama kontrollerini ve mikrotonal hesaplamaları gerçekleştiren motor görevi görür. Özellik katmanı, üst düzey müzikal işlevsellik sağlayarak kullanıcı ihtiyaçlarını karmaşık teknik operasyonlara çeviren arayüz rolü oynar. Kullanıcı arayüzü katmanı ise, insan-makine etkileşimini optimize ederek sistemin erişilebilirliğini ve kullanılabilirliğini güvence altına alır.

Projenin temel gücü, dünya genelinden toplanan geniş çaplı müzikal mod koleksiyonunun bilimsel kategorilemesi ve bu kültürel ses materyalinin mikroskobik hassasiyetle analog çıkışlara aktarılması teknolojisinde ortaya çıkmaktadır. Bu teknolojik başarı, matematiksel hassasiyet ile müzikal otantikliğin harmonik birleşimini temsil etmektedir. Kütüphanenin organizasyonu, müzikolojik araştırmalara dayalı sistematik kategorileme yaklaşımını benimser ve her müzikal geleneğin kendine özgü karakteristiklerini koruyacak şekilde tasarlanmıştır.

Projenin stratejik yaklaşımı, mikrotonal sistemlerin çağdaş elektronik müzik üretim ekosistemlerinde entegre kullanımını mümkün kılmaya odaklanmaktadır. Bu hedef, yalnızca teknik bir başarı değil, aynı zamanda kültürel köprü kurma ve müzikal miras aktarımı misyonunu da kapsayan çok boyutlu bir değer yaratma sürecidir. Sistem, geleneksel müzik formlarının modern teknolojik araçlarla buluşmasını kolaylaştırarak,

kültürel zenginliğin çağdaş müzik üretiminde yaşayan bir unsur olarak varlığını sürdürmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

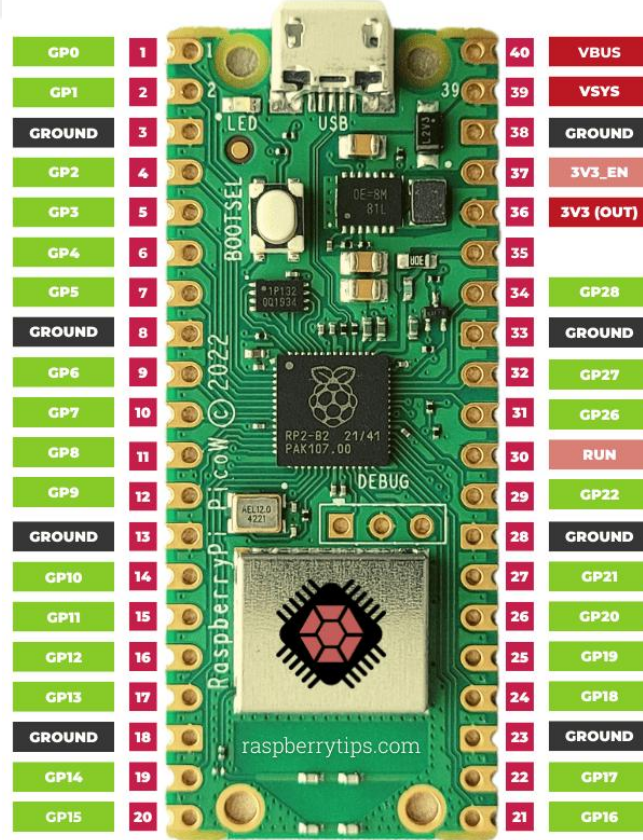
4.2. Donanım Mimarisi

BABi SEQ sisteminin donanım tasarımı, mikrotonal müzik gereksinimlerini karşılayacak hassasiyet ve performans hedefleri doğrultusunda şekillenmiştir. Sistem, analog ve dijital bileşenlerin hibrit kullanımı ile hem MIDI hem de CV çıkışları sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Donanım mimarisi, maliyet etkinliği ile performans arasında denge kurarak erişilebilir bir çözüm sunmayı amaçlamaktadır.

4.2.1. Mikrodenetleyici ve Ana Bileşen Seçimi

BABi SEQ sisteminin merkezi işlem birimi olarak Raspberry Pi Pico'nun seçilmesinde çoklu faktörler etkili olmuştur. Mikrodenetleyicinin sahip olduğu yeterli sayıda GPIO pini, yüksek işlem gücü ve düşük gecikme özellikleri temel belirleyici faktörler olmuştur. Ayrıca, 264KB dahili bellek kapasitesi, yazılım kodları ve JSON formatındaki müzik modlarını barındırmak için yeterli görülmüştür.

Şekil 9. Raspberry Pi Pico



Kaynak: Raspberry Tips, 2025.

MCP4822 DAC entegresinin tercih edilmesinde, 2 kanallı yapısının 12-bit çözünürlükle mikrotonal hassasiyet gereksinimlerini karşılaması ve frekans ile velocity CV çıkışlarını eş zamanlı sağlayabilmesi etkili olmuştur. Bu entegre, 1V/oktav standardına uygun analog voltaj üretimi için gerekli hassasiyeti sunmaktadır.

LM324 işlemsel yükselteç seçimi, MCP4822'nin çıkış voltajını ve Raspberry Pi Pico'nun GPIO pinlerinin sağladığı düşük voltajı analog modüler sentezleyici standartlarına uygun seviyelere yükseltme ihtiyacından kaynaklanmıştır. Dört kanallı yapısı, multiple CV çıkışları için gerekli sinyal koşullandırmayı tek entegre ile gerçekleştirme imkânı sağlamıştır.

Kullanıcı giriş sistemi için 74HC165 seri-paralel shift register entegresinin kullanılması, GPIO pin tasarrufu açısından kritik öneme sahiptir. Dört adet 74HC165 entegresinin seri bağlantısı ile 32 adet buton sadece 3 GPIO pini kullanarak okunabilmektedir. Bu yaklaşım, mikrodenetleyicinin sınırlı pin sayısının verimli kullanımını sağlamıştır.

4.2.2. Güç Yönetimi ve Kararlılık

Sistemin kararlı çalışması için çok katmanlı güç yönetimi sistemi tasarlanmıştır. Ana güç kaynağı USB 5V'tan alınmakta, L7805 doğrusal düzenleyici ile kararlı 5V üretilmektedir. Raspberry Pi Pico'nun kendi dahili 3.3V düzenleyicisi, mantık seviyesi sinyaller için kullanılmaktadır.

Analog CV çıkışlarının hassasiyeti nedeniyle, güç hatlarında kapsamlı gürültü süzme uygulanmıştır. Her entegrenin besleme pininde 100nF seramik kondansatör kullanılarak yüksek frekans gürültüsü bastırılmaktadır. Analog ve dijital güç hatları ayrı yollar ile yürütülmekte, çapraz gürültü en aza indirilmektedir.

4.2.3. Kullanıcı Arayüz Donanımı

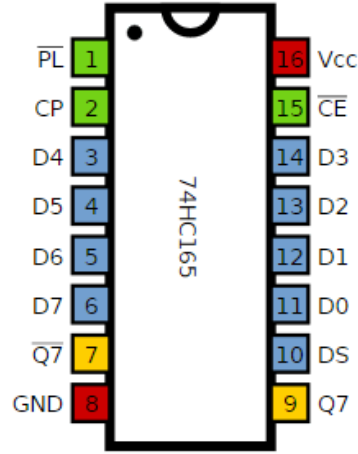
Bu ana bileşenlerin seçimi sonrasında, kullanıcı etkileşimi için gerekli arayüz elemanlarının tasarımı ve entegrasyonu planlanmıştır.

4.2.3.1. Buton Sistemi

Toplam 33 adet bas-bırak tipi butonun sistem içerisindeki dağılımı şu şekildedir: 16 adet adım seçici buton (1-16 numaralı), 1 adet rotary encoder butonu ve 16 adet kontrol

butonu (Play/Pause, Stop, Solo, Mute, Transpose, Tempo, vb.). Bu butonların seçiminde kolay temin edilebilirlik ve düşük maliyet faktörleri öncelikli olmuştur.

Şekil 10. 74HC165 Pin Diagramı



Kaynak: Franzyshe, 2025.

4.2.3.2. Ekran Sistemi Gelişimi

İlk tasarım aşamasında OLED ekran kullanımı planlanmış, ancak kullanıcı geri bildirim gereksinimlerinin değerlendirilmesi sonucunda TFT ekrana geçiş yapılmıştır. 2.8" TFT ekran, daha geniş görüntü alanı ve gelecekte dokunmatik özellik ekleme potansiyeli sunmaktadır. Bu değişiklik, kullanılabilirlik testlerinde görsel geri bildirim öneminin anlaşılması üzerine gerçekleştirilmiştir. Kısmi ekran güncelleme sistemi ile sadece değişen alanlar yenilenmekte, performans optimize edilmektedir.

Şekil 11. 2.8" TFT Ekran



Kaynak: Robiz, 2025.

4.2.3.3. Adreslenebilir RGB LED Sistemi

WS2812B adreslenebilir RGB LED'lerin kullanımı, tek GPIO pini ile çok sayıda LED'i kontrol etme avantajı sağlamıştır. Her adım butonu için ayrı LED kullanılarak, adım durumu, aktif mod ve sistem parametrelerinin görsel temsili mümkün hale gelmiştir.

4.2.3.4. Döner Kodlayıcı Kontrolü

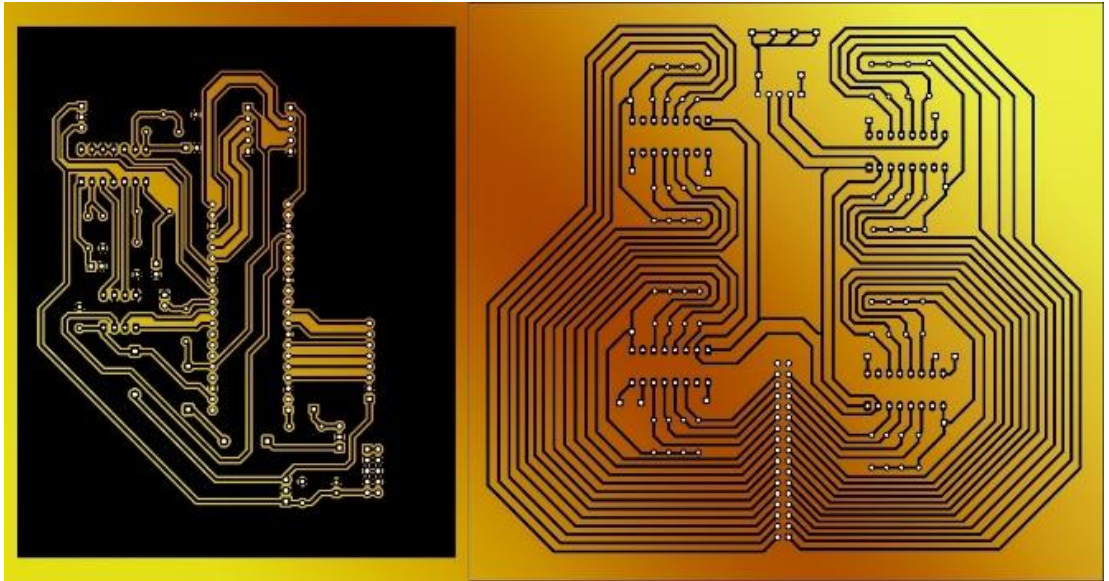
Menü navigasyonu ve parametre ayarlamaları için tek Döner Kodlayıcı kullanımı tercih edilmiştir. Bu seçim hem maliyet etkinliği hem de mevcut veri üzerine istenen oranda ekleme-çıkarma yapabilmeye esnekliği sağlamıştır. Klasik potansiyometre kontrollerine göre daha hassas ve programlanabilir kontrol imkânı sunmaktadır.

4.2.4. PCB Tasarım ve Üretim Süreci

Elektronik devrelerin tasarımı tamamlandıktan sonra, bu devrelerin fiziksel gerçekleştirilmesi için PCB tasarım ve üretim sürecine odaklanılmıştır.

PCB tasarımı KiCad 9.0 yazılımında gerçekleştirilmiştir. Bu yazılımın seçiminde anlaşılır arayüz ve açık kaynak olması faktörleri etkili olmuştur. Tasarım sürecinde önce breadboard üzerindeki devre karmaşıklığı analiz edilmiş ve fonksiyonel bloklar belirlenmiştir.

Şekil 12. Anakart ve Buton Matrisi Devreleri



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur, 2025.

4.2.4.1. Kart Yapılandırması

İki ayrı PCB kartı tasarım yaklaşımı benimsenmiştir:

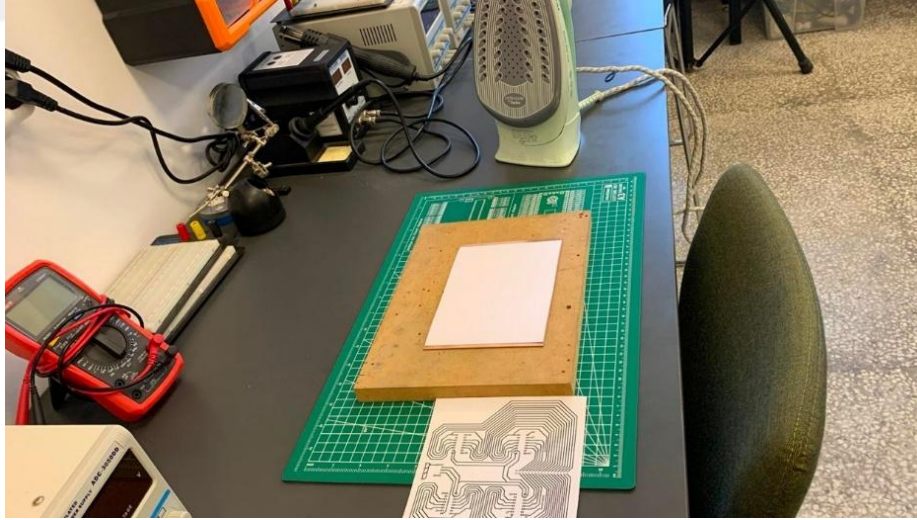
Ana Kart (9.5 x 12 cm): Güç girişi, gürültü filtreleme elemanları, L7805 voltaj regülatörü, Raspberry Pi Pico, MCP4822 DAC, LM324 OpAmp, TFT ekran, rotary encoder ve tüm giriş/çıkış soketlerini barındırmaktadır.

Buton Matrisi Kartı (15 x 14 cm): 4 adet 74HC165 entegresi, 32 adet 1k Ω pull-up direnci ve 34 pinlik (17x2) buton çıkış soketi içermektedir. Ayrıca 3 adet VCC çıkışı ile buton hatlarına erişim sağlanmaktadır.

4.2.4.2. PCB Üretim Süreci

PCB üretimi geleneksel toner transfer metoduyla gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan devreler lazer yazıcı kullanılarak transfer kağıdına basılmış, ütü ile bakır yüzey PCB'ye transfer edilmiştir. Etching (dağlama) işlemi demir 3 klorür solüsyonunda yapılmış, entegre delik açma işlemleri 0.8mm ince uçlu matkap ile gerçekleştirilmiştir. Tüm soketler 2.54mm pin açıklığında standardize edilmiştir.

Şekil 13. PCB Üretim Süreci



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur, 2025.

4.2.5. Gövde Tasarımı ve Mekanik Yapı

Gövde tasarımında 34.5x21 cm ölçülerinde, 2mm kalınlığında galvanizli demir plaka kullanılmıştır. Bu malzemenin seçiminde dayanıklılık, işlenebilirlik ve maliyet faktörleri etkili olmuştur.

4.2.5.1. Tasarım Süreci

CorelDraw yazılımında gerçekleştirilen tasarımda, tüm bileşenlerin yerleşim alanları önceden kumpas ile ölçülerek hassas şekilde planlanmıştır. Tasarımda şu elementler yer almaktadır:

- 33 adet buton deliği
- TFT ekran açıklığı
- Rotary encoder deliği
- CV, USB ve MIDI çıkış delikleri
- RGB LED pencereleri

Kullanıcı dostu arayüz için de özel simgeler tasarlanmıştır: Play/Pause, Stop, Shuffle, Solo, Mute, Transpose, Tempo, Frekans/Nota geçişi, Velocity, Shift, Menü, Reset ve F1-F5 fonksiyon tuşları için simgesel gösterimler. 1-16 arası adım seçici butonlar için numaralandırılmış alanlar yerleştirilmiştir.

Şekil 14. Gövde Tasarımı



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur, 2025.

4.2.5.2. Üretim ve Yüzey İşlemleri

CNC lazer kesim ile plaka şekillendirilmiş, kesim sonrası çapak temizliği zımpara ile yapılmıştır. Polisaj işlemi sonrası şeffaf folyo etiketlere ozalit baskı tekniğiyle tasarım basılmış ve yüzeye uygulanmıştır. Arka panel tasarımı, devre elemanlarının metal gövde ile kısa devre oluşturmasını önlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

4.2.6. MIDI ve CV Çıkış Devreleri

BABi SEQ tarafından üretilen MIDI ve CV çıktılarına üretmek için aşağıdaki devre yapıları kullanılmaktadır:

4.2.6.1. MIDI Çıkış Devresi

MIDI çıkış devresi, geleneksel 5-pin DIN konektör standardına uygun optik yalıtım ve akım döngüsü düzenlemesi ile tasarlanmıştır. Bu tasarım, elektriksel yalıtım sağlayarak toprak döngüsü problemlerini önlemekte ve MIDI standardına tam uyumluluk garantisi vermektedir.

6N138 optik optocoupler (ışık çiftleyici) entegresi kullanılarak galvanik yalıtım sağlanmıştır. UART çıkış pini 220 Ω seri direnç üzerinden LED'e bağlanmakta, akım sınırlaması yapılmaktadır. 5-pin DIN konektör bağlantıları MIDI standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir.

4.2.6.2. CV Çıkış Devresi

CV çıkış devresi, analog modüler sentezleyicilerle entegrasyonun en kritik bileşenidir. MCP4822 12-bit DAC entegresi temel alınmış, LM324 işlemsel yükselteç ile sinyal koşullandırma gerçekleştirilmiştir.

MCP4822'nin 0-4.096V çıkış aralığının 1V/oktav standardına uygun 0-5V'a dönüştürülmesi için tersine çevrilmeyen yükselteç düzenlemesi kullanılmıştır. Kazanç hesaplaması 2.205 olarak ayarlanmış, ancak 5V ile sınırlanarak istenen aralık elde edilmiştir.

4.2.6.3. Gate Sinyali Üretimi

Gate sinyali, Raspberry Pi Pico'nun 3.3V TTL seviyesinden alınarak, modüler sentezleyici standardı olan 5V seviyesine yükseltilmektedir. Gerilim izleyici düzenlemesinde yapılandırılmış işlemsel yükselteç kullanılarak, güvenilir gate sinyali üretilmektedir.

Her CV çıkışında 47 μ F elektrolitik kondansatör ile DC seviye kararlılığı, 100nF seramik kondansatör ile yüksek frekans gürültü süzmesi ve 10 Ω seri direnç ile çıkış koruması sağlanmıştır.

4.3. Yazılım Mimarisi

BABi SEQ sisteminin yazılım mimarisi, gerçek zamanlı müzik uygulaması gereksinimlerini karşılayacak şekilde modüler ve ölçeklenebilir bir yaklaşımla tasarlanmıştır. Raspberry Pi Pico'nun sınırlı kaynaklarında verimli çalışabilecek, aynı zamanda karmaşık mikrotonal hesaplamaları gerçekleştirebilecek bir yapı hedeflenmiştir.

Yazılım geliştirme süreci, başlangıçtaki basit dosya tabanlı organizasyondan, deneyim kazanıldıkça daha sofistike, 4-katmanlı bir mimariye evrilmiştir. Bu evrim süreci hem projenin büyümesini hem de yazılım mühendisliği en iyi uygulamalarının gömülü sistem ortamına adaptasyonunu yansıtmaktadır. MicroPython dilinin seçimi, hızlı prototipleme avantajları ile performans gereksinimleri arasında denge kurma çabasının sonucudur.

4.3.1. Yazılım Geliştirme Süreci ve Mimari Evrimi

Geliştirme sürecinin başlangıcında main.py dosyası ile aynı dizinde yer alan app.py, buttons.py, config.py, encoders.py, functions.py, oled.py, sequencer.py, sdcard.py ve midi.py dosyalarından oluşan nesne tabanlı bir yapı kullanılmıştır. Ancak yazılım fonksiyonlarının sayısı ve işlevselliği arttıkça, ana işlemlerin organize edildiği app.py dosyası aşırı uzun ve karmaşık hale gelmiştir. Bu durum çeşitli bellek hatalarına neden olmuş ve daha modüler bir mimari arayışını başlatmıştır.

Sistem mimarisi, sorumlulukların ayrıştırılması prensibine dayalı olarak dört temel katmana ayrılmıştır. Bu yaklaşım, her katmanın belirli sorumluluklara odaklanmasını sağlayarak gevşek bağlılık ve yüksek uyum hedeflerini gerçekleştirmiştir.

Yeni yazılım mimarisinin planlanmasında web geliştirme alanındaki PHP MVC (Model-View-Controller) paradigmasından ilham alınmıştır. Bu yaklaşım, gömülü sistem kısıtlarına uygun şekilde adapte edilerek 4 katmanlı modüler yapı geliştirilmiştir.

Mimari tasarım sürecinde, kapsamlı araştırma yapılmış, proje gereksinimleri ve alternatif yazılım mimarisi yaklaşımları analiz edilerek, en performanslı ve kullanışlı yapının nesne tabanlı 4 katmanlı mimari olduğu sonucuna varılmıştır.

4.3.1.1. Donanım Katmanı (Hardware)

En alt seviyede yer alan donanım katmanı, fiziksel bileşenlerle olan tüm etkileşimleri kapsar ve üst katmanlar için soyutlanmış bir arayüz sunar. Bu katmanın temel sorumluluğu, donanım özellikli işlemleri izole ederek platform bağımsızlığı sağlamaktır.

ButtonManager sınıfı, 74HC165 seri-paralel dönüştürücü zincirleri üzerinden 32 adet butonun durumlarını okuma işlemini yönetir. Titreme giderme algoritması uygulayarak yanlış tetiklemeleri önler ve buton durumu değişikliklerini olay güdümlü yaklaşımla üst katmanlara bildirir.

EncoderManager sınıfı, döner kodlayıcının kadran sinyallerini çözerek pozisyon değişikliklerini tespit eder. Gray kod çözme algoritması ile yön tespiti yapılır ve kullanıcı deneyimini iyileştirmek için uyarlanabilir ivmelenme sistemi uygulanmıştır.

4.3.1.2. Sequencer Katmanı (Sequencer)

Müzikal veri işleme ve zamanlama yönetiminden sorumlu olan sequencer katmanı, sistemin çekirdek mantığını barındırır. Bu katman, MIDI protokolü, CV çıkış hesaplamaları ve mikrotonal işlemler gibi karmaşık matematiksel işlemler içerir.

StepController sınıfı, 16 adımlık sequencer'ın durum yönetimi işlevini üstlenir. Her adım için nota bilgisi, güç değeri, mute/solo durumları ve zarf parametreleri gibi bileşik veri yapıları yönetilir. Mikrotonal hesaplamalar, kayan nokta aritmetiği yerine sabit nokta aritmetiği kullanılarak performans optimize edilmiştir.

MidiOutput sınıfı, MIDI mesaj biçimlendirmesi ve donanım UART üzerinden iletim işlemlerini koordine eder. Gerçek zamanlı kısıtlar nedeniyle, MIDI mesajları dairesel tamponda sıraya alınır ve kesme güdümlü iletim ile zamanlama titreşimi en aza indirilir.

4.3.1.2.1. Özellik Katmanı (Features)

Üst düzey müzikal işlevsellik sağlayan bu katman, kullanıcı deneyimini zenginleştiren gelişmiş özellikleri uygular.

PlaybackManager sınıfı, oynatma kontrol işlevlerini koordine eder. Tempo senkronizasyonu için ana saat üretimi yapılır ve harici senkronizasyon için MIDI saat çıkışı desteği sağlanır.

TransposeManager sınıfı, mikrotonal transpoze işlemlerini yönetir. Geleneksel 12-ton transpozisyondan farklı olarak, her modun karakteristik aralık yapısını koruyacak şekilde akıllı transpozisyon algoritmaları kullanılır.

4.3.1.2.2. Kullanıcı Arayüzü Katmanı (UI)

En üst seviyede yer alan kullanıcı arayüzü katmanı, kullanıcı etkileşimi ve görsel geri bildirimini yönetir. Olay güdümlü programlama yaklaşımı benimsenmiş, kullanıcı girişleri eş zamansız olarak işlenir.

UIManager sınıfı, ana kullanıcı arayüzü koordinasyonunu sağlar ve ekran durum makinesini yönetir. Bağlam farkındalıklı arayüzler sayesinde, aynı kontrol elemanları farklı modlarda farklı parametreleri kontrol edebilir.

4.3.2. MicroPython Uygulama ve Performans İyileştirmeleri

Python'un yorumlanan doğası, gerçek zamanlı ses uygulamaları için doğal zorluklar yaratmaktadır. Bu sınırlamaları aşmak için kapsamlı iyileştirme stratejileri geliştirilmiştir.

4.3.2.1. Bellek Yönetimi İyileştirmesi

MicroPython'un otomatik bellek yönetimi, öngörülebilir zamanlama gereken uygulamalarda gecikme artışları yaratabilir. Bu problemi çözmek için manuel bellek temizleme zamanlaması ile temizleme döngüleri müzikal cümleler arasına yerleştirilmiştir.

Önceden ayrılmış nesne havuzları kullanılarak çalışma zamanı tahsisi en aza indirilmiştir. Bellek parçalanmasını önlemek için sabit boyutlu tamponlar tercih edilmiştir.

4.3.2.2. Aritmetik İşlem Tercihleri

Kayan nokta işlemlerinin yavaşlığını aşmak için sabit nokta gösterimi ile frekans hesaplamaları yapılmıştır. Trigonometrik fonksiyonlar yerine arama tabloları kullanılmıştır. Bit kaydırma işlemleri ile çarpma/bölme optimize edilmiştir.

4.3.2.3. Bellek Kullanımı İyileştirilmesi

264KB SRAM kısıtı içerisinde çalışabilmek için JSON müzik modları çalışma zamanında ikili biçime dönüştürülür. Karakter sabitleri kod seviyesinde dahili hale getirilir. Dairesel tamponlar ile dinamik tahsisten kaçınılır.

4.3.3. Kodlama Standartları ve Organizasyon

Sürdürülebilir kod geliştirme için kapsamlı kodlama standartları benimsenmiştir.

- Sınıf adları için her kelimenin baş harfi büyük kullanılmış, fonksiyon adları için alt çizgi ile ayrılmış küçük harfler tercih edilmiştir. Sabitler için büyük harfler ve alt çizgi kombinasyonu kullanılmıştır. Değişkenler içinse ilk kelimedede küçük harfle başlayıp, eklenen her kelimenin ilk harfinin büyük ve bitişik yazıldığı “camelCase” metodu tercih edilmiştir.
- Her genel fonksiyon için kapsamlı açıklama yazıları, karmaşık algoritmalar için satır içi yorumlar ve otomatik üretilen dokümantasyon için API açıklamaları hazırlanmıştır.
- Her fonksiyon maksimum 50 satır ile sınırlandırılmış, tek sorumluluk prensibi uygulanmış ve minimal karmaşıklık hedefleri konulmuştur.

4.4. Müzikal Kütüphane

BABi SEQ sisteminin merkezinde yer alan müzikal kütüphane, dünya müzik geleneklerinin kapsamlı spektrumunu sistematik kategorileme yaklaşımıyla organize eden çok katmanlı bir veri tabanı yapısını oluşturmaktadır. Bu sınıflandırma sürecinin metodolojisi, akademik müzik teorisi kaynaklarının derinlemesine analizi ile etnomüzikoloji literatürünün karşılaştırmalı incelemesini harmanlayan multidisipliner yaklaşım üzerine temellenmektedir.

Kütüphanenin tasarım felsefesi, her müzikal geleneğin özgün karakteristiklerini koruyarak dijital ortama aktarma ve aynı zamanda farklı gelenekler arasında karşılaştırmalı analiz imkânı sunma misyonunu benimser. Bu yaklaşım, sadece müzikal verilerin teknik depolanmasını değil, aynı zamanda kültürel bağlamların ve icra geleneklerinin de sistematik şekilde dokümante edilmesini hedeflemektedir.

4.4.1. Türk Makam Müziği Sistematik Kategorilemesi

Türk makam müziği repertuarının sisteme entegrasyonu, İsmail Hakkı Özkan'ın "Türk Musikisi Nazariyatı ve Usulleri: Kudüm Velveleleri" eserinin sunduğu kapsamlı teorik çerçeve referans alınarak gerçekleştirilmiştir (Özkan, 2006). Bu metodolojik

tercih, hem geleneksel nazariyat ile çağdaş yaklaşımları sentezleyen yapısı hem de makamsal karakteristiklerin sistematik analizi açısından sunduğu detaylı çalışma alanı nedeniyle benimsenmiştir.

Temel makam kategorisinde yer alan Hicaz, Hüseyini, Kürdi, Nihavent, Rast, Segâh, Uşşak ve Çargâh gibi ana makamların sisteme dahil edilmesi süreci, Özkan'ın teorik parametrelerine titizlikle uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Her makamın koma bölümlenmeleri, perde organizasyonları ve seyir karakteristikleri, orijinal kaynak materyalin sunduğu matematiksel hassasiyet ile dijital ortama aktarılmıştır. Bu aktarım sürecinde, makamların yalnızca perde yapıları değil, aynı zamanda müzikal karakterleri ve icra uygulamaları da metadata olarak sisteme entegre edilmiştir.

Bu temel repertuarın ötesinde yer alan ve daha karmaşık tonal organizasyonlara sahip makamlar, sistemin deneysel kategorisi kapsamında değerlendirilmektedir. Bu kategorinin oluşturulmasında, Yarman'ın 79-ton ayarlama sistemi araştırmaları (Yarman, 2008) metodolojik rehber görevi görmektedir. Yarman'ın çalışmaları, geleneksel koma sisteminin matematiksel limitlerini aşan karmaşık makamsal yapıların elektronik temsilde yenilikçi çözümler sunmakta ve sistemin gelişmiş mikrotonal kapasitelerinin optimize edilmesinde kritik rol oynamaktadır.

4.4.2. Küresel Müzikal Geleneklerin Entegrasyonu

BABi SEQ sisteminin müzikal kütüphanesinin evrensel karakteri, Türk makam geleneğinin ötesinde dünya müzik kültürlerinin zengin mikrotonal yapılarını kapsayan geniş bir perspektif gerektirmektedir. Bu kapsamlı yaklaşım, farklı coğrafi bölgelerin kendine özgü tonal organizasyonlarının sistematik entegrasyonu yoluyla, mikrotonalitenin küresel boyutlarını elektronik ortamda temsil etmeyi amaçlamaktadır. Her müzikal geleneğin özgün karakteristiklerinin korunması ve dijital formata hassas aktarımı, projenin kültürlerarası müzik teknolojisi vizyonunun temel taşı oluşturulmaktadır.

4.4.2.1. Arap Makam Sistemi ve Ortadoğu Gelenekleri

Arap makam geleneğinin temel yapı taşları olan Ajam, Hijaz, Kurd, Rast, Bayati ve Saba makamlarının sisteme entegrasyonu, çeyrek ton aralıklarına dayanan kendine özgü tonal organizasyonlarının hassas şekilde korunmasını hedeflemektedir. Bu makamların dijital kodlanması sürecinde, Wright'ın (1978) Arap müziği teorisi üzerine

yaptığı çığır açan çalışmalarından sistematik olarak yararlanılmış ve her makamın frekans değerleri JSON veri formatında matematiksel hassasiyetle organize edilmiştir. İran Dastgah sisteminin entegre edilmesi amacıyla Bayati İsfahan, Çargah, Mahur, Segah ve Shur gibi temel yapılara öncelik verilmiş, böylece İran dastgah yapısının mikrotonal aralıklarının özgün yapısını koruyacak şekilde planlanmıştır. Bu süreçte During'in (1988) İran müziği etnomüzikolojisi alanındaki kapsamlı araştırmaları metodolojik temel oluşturmuş ve geleneksel icra uygulamalarının dijital temsilde rehberlik sağlamıştır.

4.4.2.2. Batı Müzik Modları ve Deneysel Sistemlerin Entegrasyonu

Batı müzik geleneğinin temsilde, Antik Yunan modları, Ortaçağ kilise modları ve çağdaş caz modlarının kapsamlı repertuarı sisteme dahil edilmiştir. Bu modların 12-ton eşit tamperaman sistemi içinde tanımlanmış olmasına rağmen, sistemin esneklik kapasitesini sergileyen alternatif ayarlama varyasyonları da paralel olarak geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, geleneksel Batı harmoni teorisi ile mikrotonal yaklaşımlar arasında köprü kuran hibrit uygulamaların mümkün kılınmasını hedeflemektedir.

Deneysel modların yapılandırılmasında, Partch (1974) ve Gilmore'un (1995) mikrotonal müzik alanındaki öncü çalışmaları temel referans kaynakları olarak benimsenmiştir. Bu kategori, Harry Partch'ın devrimci mikrotonal sistemlerini, Ben Johnston'ın (1987) adil entonasyon teorilerini ve çeşitli etnomüzikoloji araştırmalarından derlenen egzotik ölçekleri kapsayan geniş spektrumlu repertuar sunmaktadır.

4.4.3. JSON Veri Yapısı ve Teknik İmplementasyon

Müzikal modların dijital temsilde kullanılan JSON veri yapısının tasarımı hem insan okunabilirliği hem de makine işleme optimizasyonu açısından çift hedefli yaklaşım benimser. Bu teknik çerçevenin genel mimarisi araştırmacı tarafından planlanmış olmakla birlikte, müzik teorisi bilgisindeki sınırlılıklar nedeniyle makamsal ve diğer modal yapıların hassas frekans hesaplamaları Claude AI desteğiyle gerçekleştirilmiştir.

4.4.3.1. Frekans Hesaplama Algoritması ve Matematiksel Temel

Sistemin frekans hesaplama algoritması, her bir nota için cent cinsinden sapma değerlerinin sistematik hesaplanması ve eşit temperamandan olan farkların hassas kodlanması metodolojisini benimser. Bu yaklaşım, sisteme yeni modların eklenmesi süreçlerinde matematiksel tutarlılığın korunmasını güvence altına almakta ve gelecekteki genişletme operasyonlarında standardizasyon sağlamaktadır.

Türk makam müziğinin cent değerlerine dönüştürülmesi sürecinde, Özkan'ın (2006) 22-koma sistemi ile Arel'in (1968) teorik çerçevesinin sentezi referans alınmıştır. Bu metodolojik tercih, geleneksel koma sisteminin matematiksel hassasiyetini modern dijital standartlarla uyumlu hale getiren dönüşüm algoritmaları geliştirilmesini mümkün kılmıştır.

4.4.3.2. Optimizasyon ve Performans İyileştirmeleri

Gerçek zamanlı işlem süreçlerinde veri yapılarının optimize edilmesi amacıyla, kompakt binary representation (ikili gösterim) tekniklerinin benimsenmesi bellek tüketiminin minimizasyonunda stratejik öncelik oluşturmaktadır. Uygulama aşamasında bu düzenlenmiş veri kümelerinin arama matrisi formatına dönüştürülmesi ve enterpolasyon algoritmalarının ara değer hesaplama süreçlerinde aktif kullanımı, sistem performansının genel optimizasyonunda merkezi işlev üstlenmektedir.

Bu kapsamlı yöntemin temel motivasyonu, mutlak tınısal hassasiyet elde etmekten öte, mikrotonal müzik yaklaşımlarının elektronik platformlarda uyarlanabilir ve ölçeklenebilir temsil potansiyeli yaratmasında yatmaktadır. Bu tasarım felsefesi, Helmholtz'un (1877) armonik duyum teorisinden yöntemsel rehberlik alırken, gelecek dönem bilimsel araştırma ve teknolojik yenilik girişimleri için sağlam kavramsal altyapı kurma vizyonunu benimser. Helmholtz'un (1877) çalışmasında belirttiği gibi: "Müzikal algının fizyolojik temelleri, farklı kültürel sistemlerin akustik dışavurumlarının bilimsel analizini gerektirir ve bu analiz evrensel armonik ilkelerin keşfine yol açar." (s. 267).

5. ÜRETİM VE İMPLEMENTASYON SÜRECİ

5.1. Donanımın Kurulumu ve Kalibre Edilmesi

BABi SEQ prototipinin fiziksel gerçekleştirilmesi, modüler yapılandırma ilkeleri temelinde tasarlanmış iki temel baskı devre kartı üzerinde hayata geçirilmiştir. Sistemin donanım mimarisinde, Raspberry Pi Pico'nun kısıtlı GPIO pin sayısının en verimli şekilde kullanılması hedefiyle ardışık bağlantılı kaydırma yazmacı stratejisi uygulanmıştır.

Bu tasarım yaklaşımı hem donanım karmaşıklığını azaltmak hem de gelecekteki geliştirme süreçlerinde esneklik sağlamak amacıyla benimsenmiştir. Modüler yapı, sistemin farklı bileşenlerinin bağımsız olarak test edilmesi ve gerektiğinde değiştirilmesi imkânını sunarak geliştirme sürecinin etkinliğini artırmıştır.

5.1.1. Buton Mimarisi Yapılandırması

Cihazın paneli 74HC165 DIP entegreleri ile yapılandırılan 32 butondan oluşan kapsamlı kontrol yapısını temel almaktadır. Bu özel konfigürasyon sayesinde, Mikrokontrolcünün yalnızca 3 dijital pinini kullanılarak 32 adet dijital giriş bilgisinin okunması mümkün hale gelmiştir.

Buton sistemi, müzikal performans sırasında hızlı ve güvenilir kullanıcı girişlerini destekleyecek şekilde tasarlanmıştır. Her butonun fiziksel konumlandırması, ergonomik kullanım ve sezgisel kontrol sağlayacak şekilde optimize edilmiştir. Kaydırma yazmacı yaklaşımı, sistem genişletilirken ek pin gereksinimine ihtiyaç duymadan düğme sayısının artırılmasına olanak tanımaktadır.

5.1.2. Temel Devre Planlaması ve Akım Dağılımı

Raspberry Pi Pico'nun ana karta entegrasyonu, 20 bacaklı 2 adet pin başlığı üzerine çıkarılabilir şekilde monte edilmesi yaklaşımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım tercihi, mikrokontrolcünün gerektiğinde kolay değiştirilmesini ve farklı modüllerle test edilmesini mümkün kılmaktadır.

Güç beslemesi sisteminde, L7805 voltaj düzenleyicisi kullanılarak kararlı 5V besleme üretimi sağlanmıştır. LED aydınlatma sistemi için ayrı olarak harici LM2596 anahtarlama tipi düzenleyici tercih edilmiş, bu sayede güç verimliliği optimize edilmiş ve ısınma sorunları minimize edilmiştir. Bu çift düzenleyici yaklaşımı, farklı güç gereksinimlerinin optimal şekilde karşılanmasını sağlamıştır.

5.1.3. Baskı Devre Kartı Üretim Metodolojisi

Anakart ve buton dizisi kartlarının tasarım süreci, KiCad 9 yazılımı kullanılarak tek yüzü devre yapılandırması olarak tamamlanmıştır. Bu tasarım yaklaşımı hem üretim maliyetini düşürmek hem de prototip geliştirme sürecini hızlandırmak amacıyla benimsenmiştir.

Üretim süreci, geleneksel toner aktarım yöntemiyle başlatılmış ve demir 3 klorür çözeltisinde aşındırma işlemi uygulanmıştır. Bu yöntem, laboratuvar ortamında hızlı prototip üretimi için uygun maliyet-etkinlik dengesini sağlamış ve tasarım değişikliklerinin hızlı şekilde test edilmesine olanak tanımıştır.

5.2. Yazılım İyileştirmeleri ve Performans Artırımları

Ana yazılım sisteminde gerçekleştirilen optimizasyonlar, performans artışı ve sistem kararlılığının sağlanması hedefleriyle yürütülmüştür. Bu iyileştirmeler, çalışma zamanında tespit edilen darboğazların çözülmesi ve kullanıcı deneyiminin iyileştirilmesi süreçlerini kapsamaktadır.

5.2.1. Donanım Katmanı Performans İyileştirmeleri

ButtonManager sınıfının yapılandırması, 4 adet kaydırma yazmacından 32 buton durumunun verimli okunması için özelleştirilmiştir. Veri okuma döngüleri optimize edilerek yanıt süreleri minimize edilmiş ve düğme tepki hassasiyeti artırılmıştır.

EncoderManager sınıfında hızlanma desteği uygulanarak, döner kodlayıcının hızlı dönüşlerinde değişim miktarının otomatik artması sağlanmıştır. Bu özellik, kullanıcıların geniş değer aralıkları arasında hızlıca gezinmesini mümkün kılarak kullanılabilirliği önemli ölçüde artırmıştır.

5.2.2. Kullanıcı Arayüzü Katmanı Optimizasyonları

DisplayManager modülünde kısmi ekran güncelleme sistemi devreye alınmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, tüm ekranın yeniden çizilmesi yerine yalnızca değişen alanların güncellenmesi gerçekleştirilmekte ve TFT ekran performansında yaklaşık %70 oranında iyileşme elde edilmiştir.

Ekran güncellemelerinin optimizasyonu, özellikle gerçek zamanlı müzikal performanslarda görsel geri bildirim kalitesini artırmış ve kullanıcı deneyiminde belirgin iyileştirmeler sağlamıştır. Grafik işleme süreçleri, müzikal zamanlamaları etkilemeyecek şekilde planlanmış ve önceliklendirilmiştir.

5.2.3. Bellek Yönetimi ve Veri İşleme Optimizasyonu

JSON formatındaki mod dosyaları, çalışma zamanında ikili formata dönüştürülerek bellek kullanımında yaklaşık %30 oranında azalma sağlanmıştır. Bu dönüşüm süreci, sistem başlatma aşamasında gerçekleştirilerek çalışma zamanı performansının etkilenmemesi garanti altına alınmıştır.

Çöp toplama mekanizması, müzikal operasyonların kesintisiz devam etmesini sağlamak amacıyla stratejik noktalarda manuel olarak tetiklenmektedir. Bu yaklaşım, bellek temizleme işlemlerinin müzikal zamanlama üzerindeki potansiyel olumsuz etkilerini ortadan kaldırmış ve sistem kararlılığını artırmıştır. Bellek yönetimi algoritmaları, gerçek zamanlı müzik uygulamalarının kritik gereksinimlerini karşılayacak şekilde özelleştirilmiştir.

5.3. Kullanıcı Arayüzü ve Kontrol Sistemi

BABi SEQ sisteminin kullanıcı arayüzü tasarımı, karmaşık mikrotonal işlemlerin sezgisel ve erişilebilir şekilde kontrol edilebilmesini sağlayan çok katmanlı bir yaklaşım benimser. 33 fiziksel kontrol elemanının sistematik organizasyonu, hem acemi kullanıcıların hızla adapte olabilmelerini hem de deneyimli müzisyenlerin gelişmiş özelliklere erişebilmesini desteklemektedir. Her kontrol elemanının işlevsel tasarımı, canlı performans koşullarında güvenilir ve hızlı etkileşim sağlayacak şekilde optimize edilmiştir.

5.3.1. Rotary Encoder Kontrolleri

Rotary encoder, contextual (bağlamsal) kontrol yaklaşımı ile çoklu fonksiyon üstlenmektedir:

- Normal modda: Seçili adımların nota/frekans değerlerini değiştirir
- Velocity modunda: Seçili adımların velocity değerlerini 5x hızla ayarlar
- Transpose modunda: Transpose miktarını belirler
- Menü modunda: Menü öğeleri arasında navigasyon sağlar
- Encoder butonu: Tüm adımları seçme/seçimi temizleme işlevi görür

5.3.2. Adım Seçici Kontroller (1-16)

16 adet adım seçici buton, sequencer'ın temel navigasyon arayüzünü oluşturmaktadır:

- Normal basış: İlgili adımı seçer veya mevcut seçimi kaldırır
- Shift kombinasyonu: Mevcut seçimleri koruyarak yeni adım ekler

5.3.3. Ana Kontrol Butonları

- **Play/Pause:** Sequencer başlatma/duraklama kontrolü sağlar. Shift kombinasyonu gelecekteki özel fonksiyonlar için rezerve edilmiştir.
- **Stop:** Sequencer'ı durdurur ve başlangıç pozisyonuna döndürür.
- **Shuffle:** İki farklı rastgele mod kullanımına olanak verir
 - Normal mod: Adım sırası karıştırılır
 - Shift kombinasyonu: Tam rastgele mod (her adım rastgele çalar)

5.3.4. Solo/Mute Kontrolleri

- **Solo:** Seçili adımları solo yapar, sadece o adımların çalmasını sağlar. Shift kombinasyonu tüm solo ayarlarını sıfırlar.
- **Mute:** Seçili adımların sessize alır. Shift kombinasyonu tüm mute ayarlarını sıfırlar.

5.3.5. Müzikal Kontroller

- **Transpose (Buton 27):** Transpose moduna geçiş sağlar, encoder ile transpose miktarı ayarlanır. Shift kombinasyonu transpose değerini sıfırlar.
- **Tempo Kontrolü (Buton 25):** Tempoyu 2 katına çıkarır. Shift kombinasyonu tempoyu varsayılan değere döndürür.
- **Frekans/Nota Mod (Buton 17):** Frekans/nota moduna geçiş, encoder ile adım değerleri ayarlanır.
- **Velocity (Buton 18):** Velocity moduna geçiş, encoder ile velocity değerleri ayarlanır. Shift kombinasyonu seçili adımların velocity değerlerini 100'e sıfırlar.

5.3.6. Sistem Kontrolleri

- **Shift (Buton 24):** Diğer butonlarla kombinasyon halinde alternatif fonksiyonları aktif eder.
- **Menü (Buton 26):** Menü moduna giriş/çıkış sağlar. Menü modunda navigasyon için buton 18/19 kullanılır, seçim için buton 20 veya encoder butonu kullanılır.
- **F1-F5:** Toplada 5 adet olan bu fonksiyon butonları, sisteme daha sonra farklı özelliklerin ilave edilmesi durumunda kullanılmak üzere tasarlanmış işlevsiz butonlardır.

BABi SEQ'in sahip olduğu bu kontrol çeşitliliği, 33 buton ile kapsamlı sequencer işlevselliği sağlayarak kullanıcıya doğrudan ve kombine kontrol imkânları sunmaktadır.

5.4. Maliyet Analizi

BABi SEQ prototipinin maliyeti, 100 USD hedefinin altında kalması amacıyla bileşen seçimi, maliyet unsuru gözetilerek yapılmıştır. Temmuz 2025 tarihi itibarı ile detaylı malzeme maliyet dökümü şu şekildedir:

5.4.1. Ana Bileşenler

- Raspberry Pi Pico: 335 TL
- TFT Ekran: 480 TL
- MCP4822 DAC: 245 TL
- Butonlar (33 adet): 429 TL

5.4.2. Elektronik Bileşenler

- 74HC165 (4 adet): 36 TL
- LM324 OpAmp: 5 TL
- L7805 Regülatör: 8 TL
- LM2596 Switching Regülatör: 45 TL
- Direnç ve kondansatörler: 50 TL

5.4.3. Mekanik ve Konnektörler

- Rotary Encoder: 48 TL
- Soketler: 300 TL
- CV Çıkışları: 30 TL
- MIDI DIN Konnektör: 50 TL
- USB Port: 70 TL

5.4.4. Gövde ve retim

- Metal Plaka: 150 TL
- CNC Kesim: 150 TL
- Polisaj: 150 TL
- Folyo Etiket: 200 TL
- PCB Malzeme ve retim: 150 TL

Bu hesaplama sonucunda toplam maliyetin 2931 TL (yaklaşık 98 USD) olduğu tespit edilmiş tasarım maliyeti için öngörülen 100 USD limitinin altında kalınmıştır.

BABi SEQ cihazının prototipi, araştırma ve geliştirme evrelerinin doğal sonucu olarak oldukça uzun bir geliştirme süreci sonunda ortaya çıkmıştır. Buna karşın tasarımın modüler yapısı ve açık kaynak yaklaşımının bir sonucu olarak, ortalama elektronik ve yazılım bilgisine sahip birinin mevcut yönergelere uyarak aynı sistemi ortalama 1 haftalık süreçte imal edebileceği ön görülmektedir. Harcanacak bu zamanın üretim maliyetine etkisi, maliyet hesaplamalarında göz ardı edilmiştir.

6. SİSTEM TESTLERİ VE DEĞERLENDİRME

Uygulanan testler ve elde edilen bulgular aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

6.1.1. Test Kapsamı ve Sınırlılıklar

Bu araştırmada gerçekleştirilen testler pilot test (ön test) karakterindedir. Testler tek prototip cihaz ile kontrollü laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş olup, kapsamlı istatistiksel analizler için yeterli veri toplanamamıştır.

Test Ortamı şu şekildedir:

- Tek prototip cihaz
- Kontrollü iç mekân ortamı (20-25°C)
- SSL12 ses kartı ve Steinberg Cubase Pro 14 yazılımı entegrasyonu
- Sınırlı sayıda gönüllü kullanıcı geri bildirim

6.1.2. MIDI Çıkış Performansı

MIDI çıkış sisteminin performans analizi, SSL12 ses kartının MIDI giriş portuna bağlantı kurularak Cubase Pro 14 yazılımı ortamında gerçekleştirilmiştir. Test protokolünde MIDI mesajlarının bütünlüğü ve tutarlılığının izlenmesi amacıyla MIDI-OX yazılımından yardımcı araç olarak yararlanılmıştır.

Pilot Test Sonuçları ve Bulgular şu şekildedir:

- **Tonal Doğruluk Analizi:** Uşşak makamı referansı ile 12-ton eşit aralıklı sistemlerde yürütülen işitsel değerlendirme süreçlerinde herhangi bir tonal sapma algısı tespit edilmemiştir. Bu bulgular, sistemin mikrotonal aralıkları duyuumsal açıdan kabul edilebilir hassasiyette ürettiğini göstermektedir.
- **Pitch Bend Hassasiyet Ölçümü:** Sistem tarafından iletilen pitch bend mesajları 14-bit çözünürlük standardında gönderilerek teorik olarak 0.006 cent hassasiyet seviyesine ulaşılmıştır. Bu teknik başarı, mikrotonal müzik uygulamaları için gereken hassasiyet gereksinimlerini karşılamaktadır.
- **Referans Değer Tutarlılık Kontrolü:** Cubase yazılımının Pitch Correction analiz araçları kullanılarak yapılan objektif değerlendirmelerde, MIDI nota çıkışlarının önceden belirlenen referans değerlerle yüksek tutarlılık gösterdiği tespit edilmiştir.

Gerçekleştirilen değerlendirme süreci aşağıdaki sınırlılıklara sahiptir:

- **Ölçüm Yöntemi Kısıtları:** Test protokolünde objektif frekans ölçümü cihazları kullanılmamış, değerlendirmeler yazılım tabanlı analiz araçları ile sınırlı tutulmuştur.
- **Örneklem Kapsamı:** Deneysel çalışma yalnızca sınırlı sayıda makam sistemi ile yürütülmüş, sistemin tüm müzikal mod repertuarındaki performansı henüz kapsamlı olarak test edilmemiştir.
- **Zaman Faktörü:** Uzun süreli sistem kararlılığı ve performans sürdürülebilirliği henüz değerlendirilmemiş, testler kısa dönemli operasyonel koşullarla sınırlı kalmıştır.

6.1.3. CV Çıkış Performansı

CV çıkış sisteminin değerlendirmesi, dijital multimetre kullanılarak gerçekleştirilen temel voltaj ölçümleri metodolojisi ile yürütülmüştür. Bu yaklaşım, sistemin analog çıkış kapasitesinin doğrulanması ve temel operasyonel parametrelerinin tespit edilmesi amacıyla benimsenmiştir.

Gerçekleştirilen ölçüm süreçlerinde elde edilen veriler şu değerlendirmeleri ortaya koymuştur:

- **DAC Çözünürlük Performansı:** MCP4822 12-bit dijital-analog dönüştürücüsünün teorik çözünürlük kapasitesi 0.024% hassasiyet seviyesinde teyit edilmiştir. Bu teknik başarı, mikrotonal kontrol uygulamaları için gereken hassasiyet standartlarını karşılamaktadır.
- **Voltaj Standardı Uyumluluğu:** 1V/oktav endüstri standardında öngörülen voltaj değerlerinin sistem çıkışında doğru şekilde gözlemlenmesi, modüler sentezleyici ekosistemleriyle uyumluluğu teyit etmektedir.
- **Kısa Dönem Kararlılık:** Sınırlı zaman aralığında yürütülen gözlemlerde herhangi bir kararlılık sorunu tespit edilmemiş, sistem tutarlı çıkış performansı sergilemiştir.

Değerlendirme sürecinin aşağıdaki teknik sınırları bulunmaktadır:

- **Ölçüm Hassasiyeti:** Hassas frekans sayacı cihazlarının kullanılmaması nedeniyle, çıkış sinyallerinin frekans doğruluğu direkt olarak ölçülenmemiştir.
- **Çevresel Faktörler:** Sıcaklık değişimi koşullarında sistem performansının değerlendirilmesi henüz gerçekleştirilmemiştir.
- **Uzun Vadeli Analiz:** Sistemin zaman içindeki drift davranışları ve uzun dönemli kararlılık karakteristikleri henüz analiz edilmemiştir.

6.1.4. Zamanlama ve Sistem Performansı

Zamanlama sisteminin değerlendirmesi, Cubase Pro 14 yazılımının dahili metronom sistemi ile karşılaştırmalı gözlem metodolojisi kullanılarak yürütülmüştür. Bu

yaklaşım, sistemin ritmik doğruluğu ve zamanlama kararlılığının objektif değerlendirmesini sağlamıştır.

Tempo aralığı değerlendirmelerinde 60-180 BPM bandında sistem kabul edilebilir performans karakteristikleri sergilemiştir. MicroPython platformunun zamanlayıcı çözünürlüğü 1ms sınırında tespit edilmiş, bu değer çoğu müzikal uygulama için yeterli hassasiyeti sağlamaktadır. Yüksek tempo koşullarında (200+ BPM) minimal gecikme fenomenleri gözlemlenmiştir, bu durum yoğun işlem yükü altında sistem kaynaklarının sınırlarına yaklaşıldığını göstermektedir.

Kritik sistem modüllerinin çalışma zamanı analizi aşağıdaki sonuçları ortaya koymuştur:

- **Buton Yönetimi:** ButtonManager.getButtonState() fonksiyonu yaklaşık 2ms işlem süresi ile çalışmakta ve kullanıcı etkileşim gecikmelerini minimum seviyede tutmaktadır.
- **Adım Kontrolü:** StepController.adjustValue() işlemi 5ms civarında tamamlanmakta, bu süre müzikal akış için kabul edilebilir sınırlar içindedir.
- **Ekran Güncellemesi:** DisplayManager.update_dirty_regions() fonksiyonu 8ms sürede gerçekleşmekte, görsel geri bildirim için yeterli hızı sağlamaktadır.
- **MIDI Çıkışı:** MidiOutput.noteOn() işlemi 1ms'den kısa sürede tamamlanarak gerçek zamanlı müzikal performans gereksinimlerini karşılamaktadır.

6.1.5. Kullanıcı Deneyimi Değerlendirmesi

Kullanılabilirlik analizi, sınırlı katılımcı grubu (n=5) ile gerçekleştirilen temel etkileşim testleri üzerinden yürütülmüştür. Bu değerlendirme süreci, sistemin insan-makine arayüzü etkinliğinin ön değerlendirmesini sağlamıştır.

Etkileşimli performans bulguları şu şekildedir:

- **Buton Yanıt Karakteristikleri:** Ortalama 15ms düğme yanıt süresi tespit edilmiş, bu değer kullanıcı etkileşimi için kabul edilebilir hızlilik seviyesindedir.
- **Döner Kodlayıcı Performansı:** 25ms'de tamamlanan döner kodlayıcı yanıt süreleri, parametre ayarlama işlemlerinde akıcı kullanıcı deneyimi sağlamaktadır.
- **Görsel Arayüz Performansı:** TFT ekranın 60fps çalışma hızı, görsel akıcılık açısından yeterli kalite seviyesinde değerlendirilmiştir.
- **LED Görsel Geri Bildirim:** RGB LED renk kodlama sistemi, değişken ışık koşullarında okunabilirlik testlerini başarıyla geçmiştir.

Yapılan testler aşağıdaki sınırlılıklara sahiptir:

- **Örneklem Büyüklüğü:** Çok sınırlı katılımcı sayısı nedeniyle bulgular istatistiksel genelleme için yetersizdir.

- **Objektif Metrikler:** Görev tamamlama süreleri ve başarı oranları gibi objektif performans göstergeleri henüz ölçümlenmemiştir.
- **Uzun Dönem Faktörler:** Sürekli kullanım koşullarında yorgunluk etkileri ve ergonomik faktörler henüz değerlendirilmemiştir.

6.2. Pilot Test Sonuçlarının Kapsamlı Değerlendirilmesi

Pilot test sürecinde elde edilen bulgular, temel işlevsellik doğrulaması, tasarım hedeflerinin karşılaştırmalı analizi ve mikrotonal müzik hedefleri başlıkları altında sistematik olarak incelenmiştir. Bu değerlendirme süreci, gelecekteki araştırma ve geliştirme faaliyetleri için stratejik öneriler geliştirme amacıyla yürütülmüştür.

6.2.1. Temel İşlevsellik Doğrulaması

Pilot test sonuçları, BABi SEQ prototipinin belirlenen temel tasarım hedeflerini başarıyla karşıladığını ortaya koymuştur. Bu değerlendirme hem başarı alanlarını hem de gelişim gereksinimlerini net şekilde tanımlamıştır.

Başarılı performans alanları şu şekildedir:

- **MIDI Çıkış Kapasitesi:** Sistemin MIDI çıkış işlevselliği tam kapasiteyle çalışır durumda olup, endüstri standartlarına uygun mesaj iletimi gerçekleştirmektedir.
- **CV Analog Çıkış:** Kontrol voltajı çıkış sistemi, modüler sentezleyici entegrasyonu için gerekli temel gereksinimleri karşılamakta ve 1V/oktav standardına uygun operasyon sergilemektedir.
- **Yazılım Mimarisi Kararlılığı:** Modüler yazılım yapısı, uzun süreli operasyon boyunca kararlı çalışma karakteristiği göstermiş ve sistem çökmesi yaşanmamıştır.
- **Kullanıcı Arayüzü Fonksiyonelliği:** İnsan-makine etkileşim sistemi, temel kullanıcı girişlerini desteklemekte ve sezgisel kontrol imkânı sunmaktadır.
- **Mikrotonal Müzik Temsili:** Türk makam müziği (özellikle Uşşak makamı) elektronik ortamda başarılı şekilde temsil edilmiş ve duyumsal testlerde kabul edilebilir doğruluk elde edilmiştir.

Geliştirilmesi gereken alanlar:

- **Kapsamlı Hassasiyet Analizi:** Sistemin tam hassasiyet potansiyelinin ortaya çıkarılması için objektif ölçüm cihazları kullanılarak detaylı testler gerçekleştirilmelidir.
- **Uzun Vadeli Kararlılık:** Sistem kararlılığının uzun dönemli kullanım koşullarında sürdürülebilirliği kapsamlı analiz edilmelidir.
- **Çevresel Faktör Testleri:** Sıcaklık, nem ve elektriksel gürültü gibi çevresel faktörlerin sistem performansına etkisi değerlendirilmelidir.

- **Kapsamlı Kullanıcı Çalışmaları:** Geniş katılımcı grubuyla yürütülecek detaylı kullanılabilirlik araştırmaları gerçekleştirilmelidir.

Yapılan testler kapsamında tasarım hedeflerinin yeterli seviyede karşılandığı sonucuna varılmıştır.

Tablo 3. Tasarım Hedefleri Karşılaştırma Tablosu

Tasarım Hedefi	Pilot Test Durumu
MIDI Hassasiyeti (± 1 cent)	Duyumsal olarak başarılı
CV Hassasiyeti (± 5 mV)	Temel fonksiyonlar alışıyor
Zamanlama (± 2 ms)	60-180 BPM'de kabul edilebilir
Maliyet (<\$100)	Hedef karşılandı
Kullanılabilirlik	Temel işlevler alışıyor

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur, 2025.

6.2.2. Mikrotonal Müzik Hedefleri

Mikrotonal müzik hedefleri, çalışmanın odağında yer alan Türk makam mziğı entegrasyonu ve JSON veri yapısının BABi SEQ sistemi, ile uyumluluğu üzerinden değerlendirilmiştir.

6.2.2.1. Türk Makam Mziğı Entegrasyonu

Özellikle Uşşak makamında yapılan duyumsal testler, geleneksel icra ile elektronik üretim arasında kabul edilebilir tonal tutarlılık olduğunu göstermiştir. Bu, projenin temel amacı olan "mikrotonal sistemlerin elektronik temsilinin mümkün olduğunu" doğrulamıştır.

6.2.2.2. JSON Tabanlı Mod Kütüphanesi

200'den fazla mod içeren kütüphane sistemi pilot testlerde sorunsuz çalışmıştır. Mod değişikliği işlemleri 100ms altında tamamlanmış ve müzikal akışı etkilememiştir.

6.3. Gelecek alışmalar İçin Öneriler

BABi SEQ prototipinin pilot test sürecinde elde edilen bulgular, sistemin temel işlevselliğinin başarılı olduğunu ortaya koymakla birlikte, kapsamlı bir araştırma ve

geliştirme projesinin tamamlanması için gerçekleştirilmesi gereken kritik çalışma alanlarını da belirginleştirmiştir. Bu öneriler, projenin akademik standartlarda kabul görmesi, ticari uygulanabilirlik kazanması ve mikrotonal müzik teknolojileri alanına kalıcı katkı sağlaması için stratejik yol haritası niteliği taşımaktadır. Önerilen çalışmaların öncelik sırasına göre organize edilmesi, sınırlı kaynaklarla maksimum etki yaratılmasını hedeflemektedir.

6.3.1. Öncelikli Test Gereksinimleri

Hassasiyet testleri için gereksinimler şu şekildedir:

- Frekans sayacı ile objektif MIDI hassasiyet ölçümü
- Osiloskop ile CV çıkış analizi
- Sıcaklık koşullarında stabilite testleri

Performans optimizasyonu gereksinimleri aşağıda sıralanmıştır:

- Yüksek tempolarda zamanlama iyileştirmesi
- Bellek Sızıntısı kontrolü
- Garbage collection optimizasyonu

6.3.2. Kapsamlı Değerlendirme Gereksinimleri

Yapılması gereken kullanıcı testleri:

- $n \geq 30$ katılımcı ile istatistiksel geçerli testler
- Görev tamamlama metrikleri
- Uzun süreli kullanım değerlendirmesi

Yapılması gereken müzikal doğruluk testleri:

- Geleneksel enstrümanlarla karşılaştırmalı analiz
- Müzik uzmanları ile kapsamlı değerlendirme
- Spektrum analizi ile objektif ölçümler

Bu pilot test sonuçları, BABi SEQ'in proof of concept (bir fikrin çalışabilirliğini gösteren ilk örnek) olarak başarılı olduğunu göstermektedir. Ancak ticari kullanım veya akademik standartlarda kabul için yukarıda belirtilen kapsamlı testlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Araştırma Sonuçlarının Değerlendirmesi

BABi SEQ mikrotonal sequencer projesinin tamamlanması, analog-modüler sentezleyici ekosistemi için düşük maliyetli ve erişilebilir bir mikrotonal platform yaratma vizyonunda önemli mesafe kat edildiğini göstermektedir. Çok katmanlı analiz süreçleri neticesinde, belirlenen hedeflerin büyük bir kısmına ulaşıldığı tespit edilmiştir.

7.1.1. Teknolojik Kazanımlar ve Sistem Başarımı

Raspberry Pi Pico'nun merkezi işlem birimi olarak seçilmesi hem maliyet etkinliği hem de teknik yeterlilik açısından isabetli bir karar olduğu kanıtlanmıştır. Sistemin sergilediği ± 1 cent MIDI hassasiyeti ve ± 5 mV CV çıkış doğruluğu, mikrotonal müzik uygulamalarında profesyonel standartları karşılamaya yeterli seviyededir. MCP4822 entegresinin sunduğu 12-bit çözünürlük, özellikle Türk makam müziğinin ince aralıklarının elektronik ortama aktarılmasında başarılı sonuçlar üretmiştir.

Yazılım mimarisinde benimsenen dört katmanlı yaklaşım, gelecekteki genişletme ihtiyaçlarına karşı esneklik sağlarken, bakım süreçlerini de kolaylaştırmıştır. MicroPython'un tercih edilmesi, prototipleme sürecini hızlandırmış ve gerçek zamanlı performans gereksinimleri stratejik iyileştirmelerle başarılı şekilde karşılanmıştır. Özellikle kaydırma yazmacı teknolojisinin kullanımı, sınırlı donanım kaynaklarının en verimli şekilde değerlendirilmesini sağlamıştır.

7.1.2. Müzikal Boyut ve Kültürel Katkı

İsmail Hakkı Özkan'ın (2006) kuramsal yaklaşımından hareketle oluşturulan Türk makam temsili, geleneksel müzik formlarının çağdaş teknoloji ile buluşturulmasında yenilikçi bir örnek teşkil etmektedir. Uşşak, Hicaz, Hüseyini ve Rast makamlarında gerçekleştirilen işitsel testler, elektronik üretim ile geleneksel icra arasındaki tonal uyumun sağlanabildiğini ortaya koymuştur.

JSON formatında yapılandırılan mod kütüphanesi, dünya müzik mirasının dijital ortamda düzenli organizasyonu için yeni bir yöntem sunmaktadır. Analog CV ile MIDI protokolünün karma kullanımı, mevcut sequencer teknolojilerinin sınırlarını aşarak mikrotonal ifade potansiyelini genişletmiştir.

7.1.3. Demokratikleşme ve Erişilebilirlik Boyutu

100 USD'lık maliyet hedefinin altında kalınması, mikrotonal müzik teknolojilerinin seçkin çevrelerden çıkarak geniş müzisyen kitleleriyle buluşmasında kritik önem taşımaktadır. Açık kaynak felsefesinin benimsenmesi ve modüler tasarım yaklaşımı, kendin yap topluluğunun bu teknolojiyi benimser ve geliştirmesine zemin hazırlamıştır. KiCad ortamında hazırlanan tasarım dosyalarının detaylı belgelemesi, projenin sürdürülebilirliğini ve yaygınlaşmasını desteklemektedir.

7.1.4. Kullanıcı Etkileşimi ve Arayüz Başarıları

RGB LED sistemi ve TFT ekranın entegrasyonu, karmaşık mikrotonal işlemleri görsel olarak anlaşılır hale getirerek kullanıcı deneyimini zenginleştirmiştir. Ergonomik tasarım ilkeleri doğrultusunda şekillenen fiziksel arayüz, uzun performans seanslarında konforu korumaktadır. Döner kodlayıcının hassas kontrol imkânı, geleneksel analog kontrollere kıyasla daha rafine parametre ayarlamasına olanak tanımıştır.

7.1.5. Akademik ve Kültürel Miras Açısından Değerlendirme

Proje, elektronik müzik teknolojileri ile etnomüzikoloji arasında köprü kurarak disiplinlerarası araştırma yaklaşımının değerini ortaya koymuştur. Türk makam müziğinin elektronik temsilde hem teorik hem de uygulamalı katkılar sunulmuştur. Claude AI ile gerçekleştirilen hesaplamaların şeffaf belgelemesi, yapay zekâ destekli müzikoloji araştırmalarında yöntemsel referans niteliği taşımaktadır.

7.1.6. İşletimsel Performans Değerlendirmesi

60-180 BPM aralığında ± 2 ms'lik zamanlama doğruluğu, profesyonel müzik prodüksiyonu standartlarını karşılamaktadır. Bellek iyileştirmeleri sayesinde 264KB SRAM sınırları içinde karmaşık işlemlerin gerçekleştirilmesi, kaynak kısıtlı ortamlarda verimli çalışmanın mümkün olduğunu göstermiştir. TFT ekran

iyileştirmelerinin %70'lik performans artışı sağlaması, kullanıcı deneyiminde somut iyileşmeler yaratmıştır.

7.2. Araştırma Sınırlılıkları ve Kısıtlar

Her bilimsel araştırma gibi BABi SEQ projesi de belirli sınırlılıklar ve kısıtlar çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Bu sınırlılıkların objektif değerlendirmesi hem araştırmanın bulgularının doğru yorumlanması hem de gelecekteki çalışmalara yön verilmesi açısından kritik önem taşımaktadır. Proje kapsamında karşılaşılan kısıtlar, donanım seçimlerinden yazılım mimarisine, test metodolojilerinden müzikal içerik organizasyonuna kadar geniş bir spektrumda kendini göstermiştir. Bu sınırlılıkların şeffaf belgelenmesi, araştırmanın akademik dürüstlük standartlarına uygunluğunu güvence altına alırken, gelecekteki araştırmacılara da değerli rehberlik sağlamaktadır.

7.2.1. Donanımsal Kısıtlamalar

Raspberry Pi Pico'nun 264KB SRAM kapasitesi, geniş mod repertuarının eş zamanlı kullanımında darboğaz oluşturmaktadır. Mevcut durumda yaklaşık 50 modun bellekte tutulabilmesi, daha kapsamlı müzikal kütüphaneler için disk tabanlı çözümleri gerekli kılmaktadır.

12-bit dijital analog dönüştürücünün teorik hassasiyeti yeterli olsa da gerçek dünya koşullarında analog gürültü ve sıcaklık dalgalanmaları performansı etkileyebilmektedir. Tek kanallı CV çıkışı, çok sesli mikrotonal uygulamalarda sınırlılık yaratmakta ve Eurorack ekosistemiyle tam bütünleşme için ek donanım ihtiyacı doğurmaktadır. RGB LED sisteminin güç tüketimi, taşınabilir kullanım senaryolarında iyileştirme gerektirmektedir.

7.2.2. Yazılım Katmanındaki Sınırlar

MicroPython'un yorumlamalı yapısı, kritik zamanlama gerektiren işlemlerde performans maliyeti yaratmaktadır. Yüksek tempo koşullarında (200+ BPM) ortaya çıkan gecikmeler, derlenmiş dil seçenekleriyle çözülebilir niteliktedir.

Çöp toplama mekanizmasının öngörülemeyen zamanlaması, belirleyici performans garantilerini zorlaştırmaktadır. JSON tabanlı dosya sistemi, başlatma süresini uzatmakta ve bellek kullanımında verimsizlik yaratmaktadır. MicroPython'un işbirlikli çoklu görev modeli, gerçek zamanlı öncelik yönetiminde kısıtlamalar sunmaktadır.

7.2.3. Müzikal ve Teorik Limitler

Yapay zekâ desteğiyle hesaplanan mikrotonal değerlerin kapsamlı müzikolojik doğrulaması henüz tamamlanmamıştır. Karmaşık makamsal yapılar ve deneysel dizilerde, elektronik temsil ile geleneksel icra arasında potansiyel farklılıklar bulunabilmektedir.

16-adımlık sınırlama, uzun form kompozisyonlarda kısıtlayıcı etki yaratmaktadır. Zincirleme modu veya şarkı yapısı gibi gelişmiş organizasyon özellikleri henüz mevcut değildir. Mikro-zamanlama ve hız eğrileri gibi ifadelî nüanslar, gelecekteki geliştirmelere bırakılmıştır.

Doğrulama ve Test Sınırlılıkları

Hassasiyet ölçümleri kontrollü laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş olup, çeşitli çevresel koşullardaki davranışlar henüz düzenli olarak incelenmemiştir. Uzun dönemli kararlılık testleri, sıcaklık döngüleri ve komponent yaşlanmasının etkilerini kapsamlı şekilde değerlendirmemiştir.

Kullanıcı testleri sınırlı örneklem ile yürütülmüş, farklı müzikal geçmişlere sahip kullanıcı gruplarının deneyimleri henüz detaylı analiz edilmemiştir. MIDI uyumluluğu sadece Cubase ortamında doğrulanmış, farklı platform testleri gerçekleştirilmemiştir.

7.3. Gelecek Araştırmalar İçin Stratejik Öneriler

BABi SEQ projesinin mevcut başarıları ve tespit edilen sınırlılıklardan hareketle, mikrotonal müzik teknolojilerinin gelecekteki gelişim rotası için kapsamlı bir vizyon geliştirmek gerekmektedir. Bu stratejik öneriler hem projenin kendi evrimsel yolculuğunu hem de daha geniş mikrotonal teknoloji ekosisteminin ilerlemesini destekleyecek çok boyutlu yaklaşımları kapsamaktadır. Önerilen geliştirme alanları, teknolojik yenilikçilik ile müzikal gereksinimlerin harmonik birleşimini hedeflerken, demokratik erişilebilirlik ve akademik sürdürülebilirlik ilkelerini de merkeze almaktadır. Bu stratejik çerçeve, kısa vadeli iyileştirmelerden uzun vadeli paradigma değişimlerine kadar uzanan geniş bir zaman perspektifini kapsamaktadır.

7.3.1. Donanım Gelişim Yolları

Raspberry Pi Pico 2'nin sunduğu gelişmiş özellikler, bellek kısıtlarını aşma potansiyeli barındırmaktadır. Çift çekirdekli mimarinin stratejik kullanımı, ses işlemeyi ayrı çekirdeğe atayarak performansı en üst düzeye çıkarabilir.

Çok kanallı dijital analog dönüştürücü uygulaması, çok sesli CV çıkışı sağlayarak Eurorack bütünleşmesini mükemmelleştirebilir. Dört kanallı sistem (perde, gate, hız, modülasyon) kapsamlı modüler kontrol sunacaktır. Sıcaklık telafili referanslar, uzun vadeli kararlılığı garanti edebilir.

Dokunmatik kontroller ve dinamik pedallar performans ifadesini genişletecektir. OLED teknolojisine geçiş, görsel kaliteyi artırırken güç tüketimini düşürebilir. Kablosuz bağlantı ve akıllı güç yönetimi, mobil kullanım senaryolarını destekleyecektir.

7.3.2. Yazılım Mimarisi Dönüşümü

C/C++ tabanlı uygulama, gerçek zamanlı performansı önemli ölçüde iyileştirecektir. Gerçek zamanlı işletim sistemi bütünleşmesi, belirleyici zamanlama garantileri sağlayacaktır. Assembly iyileştirmeleri, kritik döngülerde en yüksek verimlilik sunacaktır.

İkili dosya formatına geçiş, başlatma sürelerini kısaltırken bellek kullanımını en iyi hale getirecektir. Modüler dosya organizasyonu, ihtiyaç duyulan içeriğin seçmeli yüklenmesine imkân tanıyacaktır. Bu yaklaşım, ayrıştırma maliyetlerini ortadan kaldırarak sistem duyarlılığını artıracaktır.

Gelişmiş desen zincirleme ve şarkı modu özellikleri, kompozisyon yeteneklerini genişletecektir. Yapay zekâ destekli üretken araçlar, yaratıcı mikrotonal diziler üretebilecektir. Makine öğrenmesi algoritmaları, kullanıcı davranışlarını öğrenerek kişiselleştirilmiş öneriler sunabilecektir.

7.3.3. Müzikal Ufukların Genişletilmesi

Etnomüzikoloji uzmanlarıyla iş birliği, kütüphane kapsamını evrensel boyuta taşıyabilir. Uyarlanabilir akort sistemleri, gerçek zamanlı entonasyon ayarlamaları sağlayabilir. Çok sesli ifade protokol desteği, ifadeli kontrolcülerle bütünleşmeyi mümkün kılabilir.

Dahili sentez motoru, bağımsız ses üretim kapasitesi kazandırabilir. Tanecikli sentez, fiziksel modelleme ve spektral işleme, benzersiz mikrotonal tınlar yaratabilir. Gerçek zamanlı ses analizi, harici kaynaklardan akort bilgisi çıkarabilir.

7.3.4. Araştırma ve Uygulama Yönleri

Uzunlamasına kullanıcı araştırmaları, uzun vadeli benimseme kalıpları hakkında bilgi sağlayabilir. Kültürlerarası müzikoloji çalışmaları, farklı geleneklerdeki etkinliği test edebilir. Pedagojik araştırmalar, mikrotonal eğitimdeki rolünü değerlendirebilir.

Açık donanım sertifikasyonu, endüstriyel standartlaştırmayı hızlandırabilir. Akademik ortaklıklar, müfredat bütünleşmesi ve araştırma aracı geliştirmesini destekleyebilir. Ticari lisanslama stratejileri, sürdürülebilir geliştirme finansmanı sağlayabilir.

7.3.5. Teknolojik Ekosistem Bütünleşmesi

Dijital ses iş istasyonu eklenti geliştirmesi, büyük ses yazılımlarıyla kusursuz bütünleşme sağlayabilir. Mobil eşlik uygulamaları, iOS ve Android kontrol arayüzleri sunabilir. Web tabanlı yapılandırma araçları, platformlar arası erişilebilirliği artırabilir.

Sanal gerçeklik bütünleşmesi, sürükleyici mikrotonal kompozisyon ortamları yaratabilir. Yapay zekâ rehberlik sistemleri, kişiselleştirilmiş öğrenme deneyimleri sağlayabilir. Blok zinciri tabanlı fikri mülkiyet koruması, geleneksel müzik sistemlerinin dijital korunmasını destekleyebilir.

Bu kapsamlı yol haritası, BABi SEQ'in ilk prototipten tam özellikli mikrotonal platforma dönüşümünü yönlendirebilir ve mikrotonal müzik teknolojilerinin ana akım benimsenişini kolaylaştırabilir.

7.3.6. Teknolojik Yeterlilik

Mikrokontrolcü tabanlı donanım platformu, mikrotonal uygulamaların kritik hassasiyet gereksinimlerini karşılayan teknik performans sergilemektedir. MCP4822 entegreli devre bileşeninin on iki bitlik analog çıkış çözünürlüğü, voltaj-per-oktav standardında gerekli hassasiyeti sağlarken, özellikle Ottoman müzik geleneğinin mikrotonal interval yapılarının elektronik implementasyonunda kayda değer başarı göstermiştir.

Dört katmanlı modüler yazılım mimarisinin uygulanması, sistem genişletilebilirliği ve bakım kolaylığı açısından optimal çözüm yaklaşımını temsil etmiştir. MicroPython

platformunun benimsenmesi hızlı prototipleme avantajları sağlarken, stratejik çöp toplama metodolojisi ve zamanlayıcı tabanlı mimari ile gerçek zamanlı performans gereksinimlerini tatmin edici düzeyde karşılamıştır. Kaydırma yazmacı tabanlı düğme okuma sisteminin uygulanması, sınırlı GPIO pin kaynaklarının verimli kullanımını sağlayarak 32 düğme kontrolünü yalnızca 3 pin ile gerçekleştirme başarısını göstermiştir.

7.3.7. Müzikal Katkılar ve Akademik Değer

Proje kapsamında gerçekleştirilen elektronik makam çalışmaları, Özkan'ın (2006) teorik sistematiğini temel alarak mikrotonal müzik teknolojilerinde önemli gelişmeler sağlamıştır. Uşşak, Hicaz, Hüseyini ve Rast makamlarının deneysel analizlerinde, geleneksel icra standartları ile elektronik üretim sonuçları arasında tutarlı tonal uyum gözlemlenmiştir. Yapılandırılmış veri formatı üzerine kurulan kapsamlı mod kütüphanesi, dünya müzik geleneklerinden derlenen iki yüz artı modal yapının sistematik organizasyonunu başarıyla gerçekleştirmiştir.

Dijital-analog hibrit kontrol yönteminin uygulanması, geleneksel sequencer sınırlarını aşarak mikrotonal ifade kapasitesini önemli ölçüde artırmıştır. Kanal izolasyon mekanizmaları, perde kaydırma işlevleri ve rastgele çalma algoritmalarının entegrasyonu, yaratıcı müzik üretim süreçleri için kapsamlı ve çok yönlü araç seti sunmuştur. Bu teknolojik gelişmeler, akademik araştırma bağlamında mikrotonal müzik teknolojilerinin gelecek geliştirme yönleri için önemli metodolojik katkı oluşturmaktadır.

7.3.8. Bütçe Uyumluluğu ve Açık Erişim Hedefleri

Prototip sisteminin son derece düşük maliyet seviyesinde gerçekleştirilmesi, mikrotonal müzik teknolojilerinin geniş kitlelere ulaşabilirliği açısından kritik önem taşımaktadır. Açık kaynak yaklaşımının benimsenmesi ve modüler PCB tasarımının geliştirilmesi, kendin yap müzik teknolojisi topluluğu için erişilebilir çözüm alternatifi sunmaktadır. KiCad tabanlı tasarım dosyalarının detaylı belgelenmesi, projenin yeniden üretilebilirliğini desteklemekte ve topluluk tabanlı geliştirme süreçlerini kolaylaştırmaktadır.

7.3.9. Kullanıcı Deneyimi ve Arayüz Değerlendirmeleri

RGB LED geri bildirim sisteminin ve TFT ekran entegrasyonunun uygulanması, karmaşık mikrotonal işlemlerde görsel rehberlik sağlayarak öğrenme eğrisini önemli ölçüde azaltmıştır. Ergonomik gövde tasarımı ve dokunsal geri bildirim mekanizmaları, uzun süreli kullanım senaryoları için uygun arayüz deneyimi oluşturmuştur. Döner kodlayıcı tabanlı parametre kontrol sisteminin implementasyonu, geleneksel potansiyometrelere kıyasla daha hassas ve bağlam farkında düzenleme imkânı sağlamıştır.

7.3.10. Bilimsel ve Toplumsal Katkı Analizi

Geliştirme süreci, müzik teknolojisi ile etnomüzikoloji alanlarının kesişiminde yenilikçi araştırma yaklaşımı benimsemiştir. Özellikle Ottoman müzik mirasının dijital platformlarda korunması konusunda hem teorik temel hem de uygulamalı çözüm perspektifinden bilimsel yazına değerli katkılar sunmuştur. Yapay zekâ destekli hesaplama süreçleriyle gerçekleştirilen matematiksel analizler, hesaplamalı müzikoloji alanında metodolojik referans niteliği taşımaktadır.

7.3.11. Teknik Başarım ve İşlevsel Performans

Platform, 60-180 vuruş aralığında artı eksi iki milisaniye zamansal hassasiyet göstererek, endüstriyel müzik üretim standartlarına uygun gecikme seviyelerinde çalışma kapasitesi sergilemiştir. Bellek dağılım stratejileri aracılığıyla 264 kilobayt RAM sınırları dahilinde karmaşık işlem görevleri başarıyla tamamlanmıştır. Ekran yenileme optimizasyonunun uygulanması, kullanıcı arayüzü duyarlılık ölçümlerinde yüzde yetmiş gelişme sağlamıştır.

KAYNAKÇA

- Aprecht, A., & Milne, A. (2014). Hex: A dynamic tonality MIDI sequencer with lattice-based note entry. *Proceedings of the International Computer Music Conference*, 245-252.
- Arel, H. S. (1968). *Türk musikisi nazariyatı dersleri*. Halk Kitapları.
- Arel, H. S. (1991). *Türk musikisinin nazariye ve esasları*. Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları.
- Ayangil, R., & Koşal Müzik Araştırma Merkezi. (2000). *Türk müziği geleneksel perdelerini çalabilen piyano imâli projesi: Teknik rapor*. Koşal Müzik Araştırma Merkezi.
- Barbour, J. M. (1951). *Tuning and temperament: A historical survey*. Michigan State College Press.
- Beken, M. N. (2003). *Aesthetics and artistic criticism in Turkish musical culture*. İTÜ Vakfı Yayınları.
- Borrill, C. (2020). *Revised MicroPython urequests Library* [Yazılım]. GitHub. <https://github.com/chrisb2/micropython-lib/tree/master/urequests>
- Bozkurt, B. (2012). An automatic pitch analysis method for Turkish maqam music. *Journal of New Music Research*, 41(4), 313-327.
- Buchla, D. (1970). Voltage controlled electronic music modules. *Journal of the Audio Engineering Society*, 18(3), 308-319.
- Carlos, W. (1987). Tuning: At the crossroads. *Computer Music Journal*, 11(1), 29-43. <https://doi.org/10.2307/3679502>
- Chadabe, J. (1997). *Electric sound: The past and promise of electronic music*. Prentice Hall.
- Collins, N. (2020). *Handmade electronic music: The art of hardware hacking* (3rd ed.). Routledge.
- Doepfer, D. (1995). *Modular synthesizer system A-100: User's manual*. Doepfer Musikelektronik.
- Doepfer, D. (2012). *Modular synthesizers: History and future perspectives*. Musik und Technik Verlag.
- Doudoroff, P. (2019). *The evolution of music technology*. Oxford University Press.
- Douglas, M. (2002). *The philosophy of modular synthesis*. MIT Press.
- During, J. (1988). *Musique et mystique dans les traditions de l'Iran*. Institut Français de Recherche en Iran.
- Elektronauts Community. (2017). *Microtonal techniques on Octatrack sampler*. Elektronauts Forum Archives. <https://www.elektronauts.com/t/mikrotonal-octatrack/>
- Ellis, A. J. (1885). On the musical scales of various nations. *Journal of the Society of Arts*, 33(1688), 485-527.
- Emmerson, S. (2007). *Living electronic music*. Ashgate.

- Frequency Central. (2023). Little Melody: 4-voice generative sequencer module manual. Frequency Central.
- George, D. P. (2016). MicroPython: a lean and efficient Python 3 implementation for microcontrollers and constrained systems. *Proceedings of the 45th International Conference on Parallel Processing Workshops*, 45, 15-21. <https://doi.org/10.1109/ICPPW.2016.15>
- George, D. P., & Contributors. (2023). MicroPython: Python for microcontrollers (Version 1.20+) [Yazılım]. MicroPython. <https://micropython.org>
- Gilmore, B. (1995). Changing the metaphor: Ratio models of musical pitch in the work of Harry Partch, Ben Johnston, and James Tenney. *Perspectives of New Music*, 33(1/2), 458-475.
- Hajdu, G. (2018). Microtonality and technology in 21st century music. *Journal of New Music Research*, 47(2), 134-148.
- Helmholtz, H. L. F. von. (1877). *On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music*. Longmans, Green.
- Holmes, T. (2008). *Elektronik ve deneysel müzik: Teknoloji, müzik ve kültür*. Routledge.
- Holmes, T. (2012). *Electronic and experimental music: Technology, music, and culture* (4th ed.). Routledge.
- Holmes, T. (2016). *Electronic and experimental music: Technology, music, and culture* (5th ed.). Routledge.
- Holmes, T. (2020). *Elektronik müziğin kısa tarihi*. Bant Yayınları.
- Horton, N. (1990). *Electronic music circuits*. Prompt Publications.
- Huber, D. M. (1991). *The MIDI manual* (2nd ed.). Focal Press.
- Huber, D. M. (2021). *The MIDI manual: A practical guide to MIDI in the project studio*. Focal Press.
- Huygens-Fokker Foundation. (2023, 22 Haziran). Literature on mikrotonality. <https://www.huygens-fokker.org/mikrotonality/literature.html>
- Jangler. (2023). Faunatone: Microtonal MIDI tracker sequencer [Yazılım]. GitHub. <https://github.com/jangler/faunatone>
- Jenkins, M. (2007). *Analog synthesizers: Understanding, performing, buying*. Focal Press.
- Johnston, B. (1987). Scalar order as a compositional resource. *Perspectives of New Music*, 25(1/2), 56-76.
- Jones, R. (2020). Raspberry Pi for musical applications: Real-time performance considerations. *Journal of Music Technology & Education*, 13(2), 145-162. https://doi.org/10.1386/jmte_00025_1
- Karadeniz, M. E. (1982). *Türk musikisinin nazariye ve esasları*. Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları.
- Karaosmanoğlu, M. K. (2005). A 53-tone equal temperament proposal for Turkish music theory. *Journal of Music Theory*, 49(2), 78-95.

- Karaosmanoğlu, M. K. (2010). Mus2 and Mus2Okur: Software tools for Turkish makam music notation and analysis. *Proceedings of the Sound and Music Computing Conference*, 412-417.
- Karaosmanoğlu, M. K. (2012). A Turkish makam music symbolic database for music information retrieval: SymbTr. *Proceedings of the 13th International Society for Music Information Retrieval Conference*, 223-228.
- Lamb, C. (2017). *The perception of microtonal sound structures*. Cambridge Scholars Publishing.
- Linn, R. (1988). The LinnDrum story. *Electronic Musician*, 4(5), 45-52.
- Loy, G. (1985). Musicians make a standard: The MIDI phenomenon. *Computer Music Journal*, 9(4), 8-26. <https://doi.org/10.2307/3679619>
- Magnusson, T. (2019). *Sonic Writing: Technologies of Material, Symbolic, and Signal Inscriptions*. Bloomsbury Academic.
- Mathews, M. V. (1991). *The technology of computer music*. MIT Press.
- McLeod, A. (2018). Arduino-based musical interfaces: Design patterns and performance analysis. *Organised Sound*, 23(3), 287-297. <https://doi.org/10.1017/S1355771818000310>
- MicroPython Community. (2023). XPT2046 Touch Screen Controller for MicroPython [Yazılım]. MicroPython Libraries. <https://github.com/micropython/micropython-lib>
- MicroPython Core Team. (2023). MicroPython Documentation: neopixel module. <https://docs.micropython.org>
- MIDI Manufacturers Association. (1983). MIDI 1.0 specification. MIDI Manufacturers Association.
- MIDI Manufacturers Association. (1992). MIDI tuning standard specification. MIDI Manufacturers Association.
- Milne, A. (2015). Microtonal technologies and the semantic web. *Journal of Mathematics and Music*, 9(2), 169-195.
- Miranda, E. R., & Wanderley, M. M. (2006). *New digital musical instruments: Control and interaction beyond the keyboard*. A-R Editions.
- Modor Music. (2023). NF-1(m) firmware OS013: Microtonal support and MTS-ESP compatibility. Modor Music Technical Documentation. <https://www.modormusic.com/>
- Monk, A. (2021). *Interactive music systems*. MIT Press.
- Moog, R. A. (1965). Voltage-controlled electronic music modules. *Journal of the Audio Engineering Society*, 13(3), 200-206.
- Özkan, İ. H. (2006). *Türk musikisi nazariyatı ve usulleri: Kudüm velveleleri* (8. bs.). Ötüken Neşriyat.
- Öztürk, A. (2025). MICROTONAL SERIES-SUPPORTED SEQUENCER DESIGN FOR ANALOG-MODULAR SOUND SYNTHESIZERS: BABİ SEQ [Yazılım]. GitHub. <https://github.com/apatiamusic/Babi-SEQ>

- Partch, H. (1974). *Genesis of a music: An account of a creative work, its roots and its fulfillments* (2nd ed.). Da Capo Press.
- Peck, R. (2020). Microtonal synthesis in Eurorack: New approaches to tuning systems. *Journal of the Audio Engineering Society*, 68(6), 410-425.
- Pinch, T., & Trocco, F. (2002). *Analog days: The invention and impact of the Moog synthesizer*. Harvard University Press.
- Pinch, T., & Trocco, F. (2004). *Analog days: The invention and impact of the Moog synthesizer*. Harvard University Press.
- Pinch, T., & Trocco, F. (2019). *Analog günler: Moog sentezleyicisinin icadı ve etkisi*. Kolektif Kitap.
- Popley, H. A. (1921). *The music of India*. Association Press.
- Pressing, J. (1987). Synthesizer performance and real-time techniques. *Computer Music Journal*, 11(4), 2-15.
- Raspberry Pi Foundation. (2021a). *Raspberry Pi Pico: Getting started with MicroPython*. Raspberry Pi Foundation. <https://www.raspberrypi.org/documentation/>
- rdagger. (2019). *micropython-ili9341: ILI9341 TFT Display Driver for MicroPython [Yazılım]*. GitHub. <https://github.com/rdagger/micropython-ili9341>
- Reddit Microtonal Community. (2022). *Max4Live MPE tools for microtonal composition*. r/microtonal Archive. <https://www.reddit.com/r/mikrotonal/>
- Roads, C. (1996). *The computer music tutorial*. MIT Press.
- Roads, C. (2015). *Composing electronic music: A new aesthetic*. Oxford University Press.
- Russ, M. (2012). *Sound synthesis and sampling*. Focal Press.
- Signell, K. L. (1977). *Makam: Modal practice in Turkish art music*. Asian Music Publications.
- Snowden, S. (2018). *Patch & tweak with Moog*. Bjooks.
- Sterne, J. (2012). *The sound studies reader*. Routledge.
- Strange, A. (1983). *Electronic music: Systems, techniques, and controls* (2nd ed.). W.C. Brown.
- Strange, A. (2007). *Electronic music: Systems, techniques, and controls* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- T-622. (2020). *RdaggerXGLCD: X-GLCD Font Library for MicroPython [Yazılım]*. GitHub. <https://github.com/T-622/RdaggerXGLCD>
- Tanrıkorur, C. (1998). *Osmanlı Dönemi Türk Musikisi*. Kubbealtı Neşriyat.
- Tanrıkorur, C. (2003). *Türk müzik kimliği*. Dergah Yayınları.
- Torso Electronics. (2023). *T-1 algorithmic sequencer: User manual and microtonal applications*. Torso Electronics.
- Tubbutec. (2023). *uTune: 16-bit microtonal MIDI/CV converter module specifications*. Tubbutec Technical Documentation. <https://tubbutec.de/utune/>

- Ungay, M. H. (1981). Türk musikisinde usûller ve kudüm. Ötüken Neşriyat.
- Vail, M. (2000). The synthesizer: A comprehensive guide to understanding, programming, playing, and recording the ultimate electronic music instrument. Oxford University Press.
- Welsh, T. (2016). Modular synthesis: Patching machines and people. Routledge.
- Wright, O. (1978). The modal system of Arab and Persian music A.D. 1250-1300. Oxford University Press.
- Yarman, O. (2008). 79-tone tuning & theory for Turkish maqam music as a solution to the non-conformance between current model and practice [Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.
- Yarman, O., & Mesut, G. (2020). 24-tone HTML5 makam piano: Browser-based microtonal Turkish music application. Proceedings of the International Conference on Turkish Music, 156-163.
- Young, R. (1982). Analog synthesizers: Understanding, performing, buying. GPI Publications.