

T.C
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GENETİK ALGORİTMA İLE MELODİ ÜRETİMİ VE OPTİMİZASYONU

FATİH YADIGAR

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilgisayar Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2025

T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GENETİK ALGORİTMA İLE MELODİ ÜRETİMİ VE OPTİMİZASYONU

FATİH YADIGAR

DANIŞMAN

Doç. Dr. Abdullah ELEN

II. DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Fahrettin Burak DEMİR

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilgisayar Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2025

ONAY

Fatih YADIGAR tarafından hazırlanan “**Genetik Algoritma ile Melodi Üretimi ve Optimizasyonu**” adlı tez çalışması 27/06/2025 tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Doç. Dr. Abdullah ELEN
(Danışman)

Doç. Dr. Emrah DÖNMEZ
(Üye)

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet KARAOĞLU
(Üye)

Bu tezin kabulü, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../...gün ve .../... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Serhat DUMAN
Enstitü Müdürü

**BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ
EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI**

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre hazırlamış olduğum “**Genetik Algoritma ile Melodi Üretimi ve Optimizasyonu**” adlı tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez hazırlanırken tüm aşamalarda bilimsel etik ilkelerine uygun davrandığımı, tez kapsamında sunulan tüm verileri bilimsel etik ilkelerine uygun elde ettiğimi, tezde faydalandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynaklar kısmında bu eserleri gösterdiğimi beyan ederim.
27/06/2025

Fatih YADIGAR

ÖNSÖZ

Müzikal yapıların temel bileşenleri olan melodi, ritim ve harmoni arasındaki karmaşık ilişkilerin hesaplamalı yöntemlerle modellenmesi ve yeniden üretilmesi, bilgisayar bilimi ve müzik teorisi disiplinlerinin kesişiminde yer alan güncel araştırma konularından birini oluşturmaktadır. Bu tezde, Genetik Algoritmaların algoritmik besteleme alanındaki etkinliği, özellikle melodi üretimi bağlamında sistematik olarak incelenmiştir. Araştırmanın temel amacı, evrimsel hesaplama tekniklerinin müzikal yaratıcılık süreçlerinde nasıl kullanılabileceğini araştırmak ve disiplinlerarası bir metodoloji geliştirmektir.

Bu tez çalışması, müzikal melodi yapılarının sayısal kodlama sistemlerinin tasarımı, genetik algoritma parametrelerinin optimizasyonu ve çok kriterli değerlendirme fonksiyonlarının geliştirilmesi aşamalarını kapsamaktadır. Deneysel çalışmada, farklı popülasyon büyüklükleri ve genetik operatörlerin performans analizi gerçekleştirilmiş, üretilen melodilerin müzikal kalite değerlendirmesi yapılmıştır. Elde edilen bulgular, genetik algoritmaların melodi üretiminde etkili bir yöntem olduğunu ortaya koyarken, algoritmik besteleme alanındaki gelecek çalışmalar için temel oluşturmaktadır.

Bu araştırmanın gerçekleştirilmesi sürecinde değerli rehberliği ve bilimsel yaklaşımıyla her aşamada destek sağlayan danışmanım Doç. Dr. Abdullah ELEN'e ve ikinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Fahrettin Burak DEMİR'e en derin saygı ve şükranlarımı sunarım. Bilimsel araştırma sürecinde gösterdikleri anlayış ve destekleri için Prof. Dr. Necla TEKTAŞ ve Prof. Dr. Mehmet TEKTAŞ'a, aileme ve akademik yolculuğumda yanımda olan meslektaşlarım ve arkadaşlarıma içten teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GENETİK ALGORİTMA İLE MELODİ ÜRETİMİ VE OPTİMİZASYONU

Fatih YADIGAR

Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Abdullah ELEN

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fahrettin Burak DEMİR

Haziran 2025, 82 sayfa

Müzik besteleme yüzyıllardır insan yaratıcılığının önemli bir alanı olmuş, son yıllarda bilgisayar teknolojilerindeki ilerleme ile otomatik müzik besteleme yaygınlaşmıştır. Bu alanda Genetik Algoritmalar (GA), doğal seçimden esinlenerek geniş arama alanlarında en iyi veya en yakın çözümler bulmada güçlü bir teknik olarak öne çıkmaktadır. Ancak, müziğin öznel doğası ve en iyi müziğin nesnel olarak değerlendirilmesinin zorluğu, GA'nın uygunluk fonksiyonu (fitness function) tasarımını karmaşıktırmaktadır. Bu tez, bu zorlukları ele alarak, Genetik Algoritmaları kullanarak müzikal olarak anlamlı ve estetik açıdan hoş melodiler üretme ve optimize etme potansiyelini deneysel çalışmayla araştırmayı amaçlamıştır. Tezde, melodileri temsil eden uygun bir kromozom yapısı, müzikal yapıları işleyen genetik operatörler (seçilim, çaprazlama, mutasyon) ve müzik teorisi prensiplerine dayalı kural tabanlı bir uygunluk fonksiyonu içeren GA tabanlı bir sistem tasarlanmış ve uygulanmıştır. Farklı popülasyon boyutları (100, 200, 300) ve turnuva seçimi boyutlarının (3, 5) algoritma performansı (yakınsama hızı, uygunluk değerleri) ve

Üretilen melodilerin müzikal nitelikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bulgular, GA'ların uygun tasarım ve parametrelerle müzikal olarak anlamlı melodiler üretebildiğini göstermiştir. Daha büyük popülasyonların çeşitliliği artırarak daha yüksek final uygunluk değerlerine ulaşma potansiyeli sunduğu, daha büyük turnuva boyutlarının ise daha hızlı yakınsamaya yol açabildiği ancak çeşitliliği azaltma riski taşıdığı gözlemlenmiştir. Uygunluk fonksiyonunda birden çok müzikal kriterin kullanımının çıktı kalitesini artırdığı ve tekrarların azaltılmasına yardımcı olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, GA'lar müzik bestelemesinde yaratıcı süreci destekleyen etkileşimli yardımcılar olarak değerlendirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Genetik Algoritma, Melodi retimi, Optimizasyon, Otomatik Müzik Besteleme, Yapay Zekâ, Müzik Teorisi

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

MELODY GENERATION AND OPTIMIZATION WITH GENETIC ALGORITHM

Fatih YADIGAR

**Bandirma Onyedi Eylul University
Institute of Graduate Studies
Department of Computer Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Abdullah ELEN

Co-Supervisor: Assist. Prof. Fahrettin Burak DEMİR

June 2025, 82 pages

Music composition has been a significant area of human creativity for centuries, and recent advancements in computer technology have led to the widespread adoption of Automatic Music Composition. Within this field, Genetic Algorithms (GAs), inspired by natural selection, stand out as a powerful technique for finding optimal or near-optimal solutions in vast search spaces. However, the subjective nature of music and the difficulty of objectively evaluating best music complicate the design of the GA's fitness function. This thesis aimed to empirically investigate the potential of using Genetic Algorithms to generate and optimize musically meaningful and aesthetically pleasing melodies by addressing these challenges. This thesis designed and implemented a GA-based system including an appropriate chromosome structure to represent melodies, genetic operators (selection, crossover, mutation) to manipulate musical structures, and a rule-based fitness function based on music theory principles. The effects of different population sizes (100, 200, 300) and tournament selection sizes

(3, 5) on algorithm performance (convergence speed, fitness values) and the musical qualities of generated melodies were examined. The findings indicated that GAs can generate musically meaningful melodies with appropriate design and parameters. Larger populations demonstrated the potential to increase diversity and achieve higher final fitness values, while larger tournament sizes could lead to faster convergence but risked reducing diversity. The use of multiple musical criteria in the fitness function was found to improve output quality and help reduce repetition. In conclusion, GAs can be considered as interactive assistants supporting the creative process in music composition.

Keywords: Genetic Algorithm, Melody Generation, Optimization, Automatic Music Composition, Artificial Intelligence, Music Theory

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	IV
ABSTRACT	VI
İÇİNDEKİLER	VIII
ŞEKİL LİSTESİ.....	X
TABLO LİSTESİ	XI
KISALTMA LİSTESİ	XII
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR TARAMASI.....	4
2.1. Genetik Algoritma Aracılığıyla Melodi Üretimi ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	5
2.1.1. Otomatik Müzik Besteleme Yaklaşımları	6
2.1.2. Genetik Algoritmaların Müzik Bestelemesinde Kullanımı	6
2.1.3. Müzik Temsili.....	7
2.1.4. Genetik Algoritma Operatörlerinin Müzik Bestelemeye Adaptasyonu	8
2.1.5. Üretilen Müziğin Değerlendirilmesi.....	10
2.1.6. Belirli Sistemler ve Platformlar.....	11
2.1.7. Zorluklar ve Gelecek Yönleri	12
2.2. Genetik Algoritmaların Müzikal Beste Üzerindeki Etkileri	14
2.3. Literatürde Yapılmış Çalışmaların İncelenmesi	15
2.3.1. GA'nın Müzikal Beste Üzerindeki Etkileri	21
3. YÖNTEM.....	23
3.1. Araştırma Modeli	23
3.2. Genetik Algoritma Tasarımı	24
3.2.1. Melodi Kodlama Yapısı.....	25
3.2.2. Uygulanan GA Süreci.....	28
3.2.2.1. Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması	29

3.2.3. Kullanılan Parametreler ve Değer Aralıkları	37
3.3. Melodi Değerlendirme Yöntemleri	39
3.3.1. Uyum ve Yenilik Ölçütleri	39
3.3.2. İnsan Değerlendirmesi ve Yarı Otomatik Yöntemler	42
4. UYGULAMA VE BULGULAR.....	44
4.1. Tezin Deneysel Çalışma Tasarımı.....	44
4.2. Parametre Deneyleri ve Sonuçları	47
4.2.1. Mutasyon Oranı Etkisi.....	62
4.2.2. Çaprazlama Türleri Etkisi.....	64
4.2.3. Popülasyon Boyutu ve Turnuva Seçimi Boyutu Etkisi	64
4.3. Üretilen Melodilerin Değerlendirilmesi.....	66
4.3.1. Müzikal Uyum Açısından Sonuçlar	69
4.3.2. Yenilik ve Yaratıcılık Açısından Sonuçlar	70
4.3.3. İnsan Müdahalesinin Sonuçlara Etkisi.....	72
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	74
5.1. Deneysel Çalışmalarda Elde Edilen Sonuçların Yorumlanması	74
5.2. Genel Değerlendirme	75
5.3. Tez Çalışmanın Sınırlılıkları.....	76
5.4. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler	76
KAYNAKLAR	78
ÖZGEÇMİŞ.....	83

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1.1. Araştırma Modeli Akış Şeması	23
Şekil 3.2.1 Melodi Kodlama Yapısı Akış Diyagramı.....	27
Şekil 3.2.2. Uygulanan GA Süreci Akış Diyagramı.....	29
Şekil 3.2.3. Başlangıç Popülasyonu Oluşturma Akış Diyagramı	30
Şekil 3.2.4. Uygunluk Değerlendirme İşlemi Akış Diyagramı	31
Şekil 3.2.5. Seçilim Yöntemi Akış Diyagramı	32
Şekil 3.2.6. Tek Noktalı Çaprazlama İşlemi Akış Diyagramı	33
Şekil 3.2.7. Yavru Oluşumu Örneği	34
Şekil 3.2.8. Mutasyon İşlemi Akış Diyagramı	35
Şekil 3.2.9. Durma Kriteri ve Tekrarlama Akış Diyagramı	36
Şekil 4.2.1. 100 Popülasyon ve 3 Turnuva Sayılı Uygunluk Değeri Grafiği	47
Şekil 4.2.2. 1. Grup Optimal Melodi Çıktısı	48
Şekil 4.2.3. 200 Popülasyon ve 3 Turnuva Sayılı Uygunluk Değeri Grafiği	49
Şekil 4.2.4. 2. Grup Optimal Melodi Çıktısı	50
Şekil 4.2.5. 300 Popülasyon 3 Turnuva Sayılı Uygunluk Değeri Grafiği	51
Şekil 4.2.6. 3. Grup Optimal Melodi Çıktısı	52
Şekil 4.2.7. 100 Popülasyon 5 Turnuva Sayılı Uygunluk Değeri Grafiği	53
Şekil 4.2.8. 4. Grup Optimal Melodi Çıktısı	54
Şekil 4.2.9. 200 Popülasyon 5 Turnuva Sayılı Uygunluk Değeri Grafiği	55
Şekil 4.2.10. 5. Grup Optimal Melodi Çıktısı	56
Şekil 4.2.11. 300 Popülasyon 5 Turnuva Sayılı Uygunluk Değeri Grafiği	57
Şekil 4.2.12. 6. Grup Optimal Melodi Çıktısı	58

TABLO LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.2.1. Uygulama Modül Yapısı	24
Tablo 3.2.2. 8 Notadan Oluşan Örnek Kromozom Yapısı	26
Tablo 3.2.1. Genetik Algoritma Parametreleri	37
Tablo 4.2.1. Uygunluk Değerleri ve Melodik Özelliklerin Özeti.....	59
Tablo 4.2.2. Deneysel Konfigürasyonlara Göre Melodi Yapısı	60
Tablo 4.2.3. Temel Notaların Karşılaştırması	61
Tablo 4.2.4. Diyezli Notaların Karşılaştırması.....	62

KISALTMA LİSTESİ

Kisaltmalar	Açıklama
AMC:	Automatic Music Composition
AMV:	Automatic Music Variations
API:	Application Programming Interface
Bi-LSTM:	Bidirectional Long Short-Term Memory
DNN-HMM:	Deep Neural Network - Hidden Markov Model
FI-2POP:	Feasible-Infeasible Two-Population
GA:	Genetik Algoritma
GO:	Genetik Operatörler
GP:	Genetik Programlama
HMM:	Hidden Markov Model
IGA:	Interactive Genetic Algorithm
MIDI:	Musical Instrument Digital Interface
NSGA-II:	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
RNN-LSTM:	Recurrent Neural Network – Long Short-Term Memory
YSA:	Yapay Sinir Ağları
YZ:	Yapay Zekâ

1. GİRİŞ

Müzik besteleme, yüzyıllardır insan yaratıcılığının en derin ve karmaşık uğraşlarından biri olmuştur [1]. Duyguların, düşüncelerin ve estetik vizyonların ses ve zaman aracılığıyla ifade edildiği bu süreç hem içsel sezgiyi hem de belirli müzik teorisi prensiplerini harmanlar. Bilgisayar teknolojilerindeki hızlı ilerleme, son yıllarda müzik besteleme sürecinde algoritmaların ve otomatik sistemlerin kullanımını yaygınlaştırmıştır. Bu alan, Automatic Music Composition (AMC) olarak adlandırılmakta ve bilgisayar bilimleri ile müzikoloji gibi multidisipliner alanların kesişiminde önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir.

AMC'nin temel motivasyonu, beste sürecini kolaylaştırmak, maliyetleri ve zamanı azaltmak, ayrıca bestecilere ilham kaynağı olabilecek yeni müzikal fikirler üretmektir. AMC'de farklı yaklaşımlar mevcuttur; bunlar arasında stokastik yöntemler (örneğin Markov zincirleri), kural tabanlı sistemler ve yapay zekâ (YZ) tabanlı yöntemler yer alır. YZ tabanlı yaklaşımlar, mevcut müzik verilerinden öğrenme ve beste için kendi kurallarını oluşturma yeteneğine sahip sistemleri içerir [2]. Evrimsel algoritmalar, YZ tabanlı yöntemlerin önemli bir alt kümesini oluşturur.

Doğal seçim ve biyolojik evrim prensiplerinden esinlenen Genetik Algoritmalar (GA), geniş ve karmaşık arama genişliğinde optimal veya optimizeye yakın çözümler bulmak için kullanılan güçlü bir optimizasyon tekniğidir [3-5]. GA'ların popülasyon tabanlı yapısı ve genetik operatörleri (seçim, çaprazlama, mutasyon), müzik yaratıcılığını ve müzikal varyasyon süreçlerini modellemede potansiyel bir araç olarak görülmüştür [1]. GA'ları müzik bestelemesine uygulamadaki en büyük zorluklardan biri, müziğin subjektif doğası ve en iyi müziğin nesnel olarak nicelleştirilmesinin güçlüğüdür [2]. Müzikal beğeni, bireysel, kültürel ve bağlamsal faktörlere bağlı olarak büyük farklılık gösterir. Bu durum, GA'nın arama sürecini yönlendiren temel bileşen olan uygunluk fonksiyonunun tasarımını karmaşıktırır.

Literatürde, kural tabanlı uygunluk fonksiyonları, Interactive Genetic Algorithms (IGA) ve öğrenilmiş uygunluk fonksiyonları gibi farklı yaklaşımlar denenmiştir [6]. Ancak, IGA'lar insan yargısının subjektifliğini ve zaman alıcı doğasını içerirken, tamamen otomatik sistemler müziğin karmaşık estetik ve duygusal katmanlarını yakalamakta zorlanabilir. Bu zorlukları dikkate alarak, bu tez GA'ları

kullanarak müzikal olarak anlamlı ve estetik açıdan hoş melodiler üretme ve optimize etme potansiyelini araştırmayı amaçlamaktadır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, GA'ların müzikal melodiler üretme ve optimize etme potansiyelini ampirik olarak araştırmaktır. Bu kapsamda, müzik teorisi prensiplerini temel alan ve GA'nın evrimsel sürecini yönlendirecek bir sistemin tasarlanması ve uygulanması hedeflenmiştir. Spesifik olarak, GA tabanlı bir melodi üretim sistemi tasarlanarak, bu sistemde melodileri temsil edecek uygun bir kromozom yapısı, müzikal yapıları manipüle edecek genetik operatörler ve melodilerin müzikal kalitesini değerlendirecek kural tabanlı bir uygunluk fonksiyonu geliştirilecektir. Ayrıca, GA parametrelerinin algoritma performansı üzerindeki etkileri incelenecek, üretilen melodilerin müzikal kalitesi değerlendirilecek ve farklı müzikal kriterlerin melodilerin yapısal ve estetik özelliklerini nasıl etkilediği analiz edilecektir.

Bu tez, AMC alanında GA'ların kullanımına ilişkin mevcut bilgi birikimine katkı sağlaması açısından önemlidir. Bilgisayar teknolojilerinin müzik üretimindeki rolünün artmasıyla birlikte, otomatik beste sistemleri besteciler için zaman, maliyet ve çaba tasarrufu sağlamanın yanı sıra, yaratıcı süreçlerini zenginleştirecek yeni fikirler ve varyasyonlar sunma potansiyeline sahiptir [2, 7]. Farklı GA parametre setlerinin algoritma performansı ve üretilen müziğin kalitesi üzerindeki etkilerinin sistematik olarak incelenmesi, gelecekteki GA tabanlı müzik sistemlerinin tasarımında daha bilinçli kararlar alınmasına yardımcı olacaktır. Bu tür parametre çalışmalarının, algoritmanın hızlı yakınsaması ile müzikal çeşitliliğin ve özgünlüğün korunması arasında optimal bir denge bulmada kritik rol oynadığı kaynaklar tarafından belirtilmiştir [8-10].

Bu tez ayrıca, algoritmik performans metrikleri ile insan dinleyicilerin müziksel çıktılara ilişkin estetik yargıları arasındaki ilişkinin karmaşıklığına dikkat çekmektedir. Bu tezde elde edilecek bulgular, müzisyenler için interaktif beste yardımcıları veya belirli gereksinimlere sahip otomatik müzik üretimi uygulamalarının geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

Bu tez, GA'ların müzikal olarak anlamlı ve estetik açıdan tatmin edici melodiler üretme potansiyelini, farklı GA parametrelerinin performans ve kalite üzerindeki etkilerini, müzikal kalitenin değerlendirilme yöntemlerini ve uygunluk fonksiyonunu oluşturan müzikal kriterlerin üretilen melodiler üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Bu motivasyonlar, GA'ların müzik besteleme alanındaki uygulanabilirliğini ve potansiyelini daha iyi anlamak için temel oluşturacaktır.

Tez çalışmasının kapsamı, monofonik melodilerin GA aracılığıyla üretilmesi ve optimize edilmesiyle sınırlıdır. Melodilerin kalitesi, öncelikli olarak müzik teorisi prensiplerine dayalı objektif, kural tabanlı bir uygunluk fonksiyonu aracılığıyla değerlendirilecektir. Bu yaklaşım, etkileşimli değerlendirmenin zaman alıcı ve sübjektif doğasından kaçınmayı amaçlar, ancak tamamen otomatik değerlendirmenin müziğin tüm estetik katmanlarını yakalayamayacağı önemli bir sınırlılık olarak kabul edilmektedir.

Tez, literatür taraması, metodoloji, uygulama ve bulgular ile sonuçlar ve öneriler bölümlerinden oluşmaktadır. Bu yapı, GA'ların melodi üretimi ve optimizasyonu alanındaki potansiyelini kapsamlı bir şekilde ortaya koyacak ve gelecekteki araştırmalara yön verecek bulgular sunacaktır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR TARAMASI

GA, doğada gözlemlenen evrimsel süreçlerden ilham alan ve hesaplama modelleri oluşturan bir optimizasyon ve arama yöntemidir [11,12]. Karmaşık ve çok boyutlu arama genişliğinde en iyinin hayatta kalması ilkesine göre bütünsel en iyi çözümü aramaktadır. GA'lar, problemlerin çözümü için evrimsel süreci bilgisayar ortamında taklit ederler [12]. Geleneksel optimizasyon yöntemlerinin aksine, tek bir yapı yerine, çeşitli çözümlerden oluşan bir küme, yani popülasyon üretirler. Popülasyon içerisindeki sayı dizileri birey ya da kromozom olarak adlandırılırken, kromozomların elemanlarına ise gen denilmektedir [11,12].

GA temel olarak seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinden oluşur. Seçim, bireylerin genetik yapısında bir değişiklik yapmadan yeni nesillere aktarılması işlemidir. Bu süreç, doğal seleksiyon mantığına dayanır; daha güçlü bireylerin üreme ve gen aktarımı konusunda daha şanslı olduğu vurgulanır. Ancak, düşük olasılıklı kromozomların da bazı seçim adımları ve mutasyon işlemleriyle yeni nesil kromozomları meydana getirebileceği belirtilmektedir, bu da çözüm adımlarını desteklemekte ve geniş bir yelpazede çözüm oluşturulmasına katkı sağlamaktadır. Çaprazlama, iki bireyin rastgele birleştirilmesiyle yeni bireyler oluşturma işlemidir. Çaprazlama sırasında yüksek uygunluk değerine sahip kromozomlar ön plana çıkar veya sonraki seçimlerde ön plana çıkarılmaya devam eder. Mutasyon ise, bir bireyin genlerinde bir veya daha fazla değişiklik yapma işlemidir [13].

GA 'da süreç, başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıyla başlar. Bireyler, bir uygunluk fonksiyonuna tabi tutularak test edilir ve optimal çözüm adımı elde edilene kadar farklı kromozom yapıları belirlenerek çözüm adımları genişletilir [11]. Kromozomların çaprazlama ve mutasyon yöntemleriyle türetilen çözüm adımları sürekli tekrarlanarak popülasyon içerisindeki en uygun çözüm kümesi bulunur [14]. Bu uygunluk fonksiyonu genellikle toplam maliyeti en aza indirmeyi veya belirli kısıtlamalara uyarak en düşük ceza puanını bulmayı hedefler [15, 16]. Her yinelemede, en düşük ceza puanına sahip kromozom uygunluk fonksiyonu tarafından belirlenir ve bu değer algoritma sonlanana kadar güncel en iyi değer olarak saklanır [15, 16].

2.1. Genetik Algoritma Aracılığıyla Melodi Üretimi ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Melodi besteleme, yüzyıllardır insanoğlunun yaratıcı uğraşlarından biri olmuştur [10]. Son yıllarda, bilgisayar algoritmalarının müzik besteleme alanındaki uygulamaları hızla artış göstermektedir [7]. Gelişen hesaplama gücü ve yapay zekâ teknikleri sayesinde AMC yöntemleri daha erişilebilir hale gelmiştir [7-10,17,18]. AMC'nin ardındaki temel fikir, çeşitli müzik parçalarından elde edilen verileri analiz ederek yeni müzik üretmek, böylece finansal maliyeti, zamanı ve stresi azaltmaktır [7-10, 17-19]. Bu alanda matematiksel modelleme, stokastik süreçler, Markov Zincirleri gibi çeşitli yaklaşımlar benimsenmiştir. Ayrıca, kural tabanlı sistemler, evrimsel yöntemler, öğrenme sistemleri ve bunların hibritleri de müzik bestelemede kullanılmıştır [7, 20-24]. Bu evrimsel yöntemler arasında, doğal seçilimden ilham alan ve genellikle optimizasyon problemleri için kullanılan Genetik Algoritma (GA) müzik yaratıcılığını modellemede potansiyel bir araç olarak öne çıkmaktadır. [23, 24].

Melodi besteleme, yaratıcılık, müzik teorisi ve estetik yargıların iç içe geçtiği karmaşık bir süreci temsil etmektedir [25, 26]. Bu sürecin bilgisayar ortamında simülasyonu, özellikle müzikal çıktının niceliksel olarak ölçülebilir olmaması nedeniyle önemli zorluklar barındırmaktadır. Müzikal beğeni, büyük ölçüde bireysel tercihlere ve kültürel geçmişe bağlı olarak değişkenlik göstermektedir; bu da müzik üretimi için uygunluk fonksiyonunun tanımlanmasını ve standardize edilmesini güçleştirmektedir [27, 28]. Otomatik bir sistem için en iyi müziği tanımlayan ve değerlendiren uygun bir uygunluk fonksiyonu bulmayı zorlaştırmaktadır [29].

Literatürdeki çalışmalar, GA'ların müzik üretimindeki kullanımını, karşılaşılan zorlukları, farklı uygulama yöntemlerini, müzik temsili yaklaşımlarını, GA operatörlerinin adaptasyonunu, üretilen müziğin değerlendirilmesini ve bu alandaki son gelişmeleri ele almaktadır. Bilgisayar bilimi perspektifinden, bu alandaki çalışmalar genellikle müziksel yaratıcılığı algoritmik bir süreç olarak modellemeyi amaçlar [2].

2.1.1.Otomatik Müzik Besteleme Yaklaşımları

Otomatik müzik besteleme alanında kullanılan başlıca yaklaşımlar stokastik yöntemler, kural tabanlı modeller ve YZ tabanlı sistemler olarak sınıflandırılabilir. GA'lar, YZ tabanlı evrimsel yöntemler kategorisine girer [30, 31].

Stokastik yöntemler, müzik üretiminde olasılık dağılımları ve rastgelelik kavramlarını kullanır. Iannis Xenakis tarafından 1954'te tanıtılan bu yaklaşım, bir sonraki notayı rastgele seçmek için olasılık dağılımlarına dayanır. Markov zincirleri, stokastik yöntemlerin popüler bir uygulamasıdır. Ancak, birinci dereceden Markov zincirlerinin yalnızca doğrusal gramerler üretebilmesi ve yapısal detayları yönetmedeki yetersizliği gibi sınırlamaları vardır [2].

Kural tabanlı modeller, müziği üretmek için önceden tanımlanmış müzik teorisi kuralları ve kısıtlamalar kullanır. Bu yöntem, müzik teorisi hakkında derinlemesine bilgi gerektirir. Kural tabanlı sistemler, rastgelelik eksikliği nedeniyle benzersiz müzik besteleri oluşturmada yetersiz kalabilir [32, 33].

YZ tabanlı sistemler, mevcut müzikten öğrenme ve kendi kurallarını oluşturma yeteneğine sahiptir. GA'lar ve Genetik Programlama (GP) gibi evrimsel hesaplama teknikleri, bu kategoride yer alır. YZ tabanlı modeller, eğitim verilerine benzeyen müzik üretebilir, bu da çıktıların çeşitliliğini sınırlayabilir. Ancak, GP gibi bazı yöntemler, beste için müzik materyali oluşturarak bu sorunu aşmayı hedefler [33, 34].

GA'lar, büyük ve potansiyel olarak yapılandırılmamış arama uzaylarında (genişliğinde) etkili bir arama tekniğidir. Bir probleme rastgele oluşturulmuş çözümlerle başlar ve biyolojik rekombinasyonun karşılığını kullanarak daha iyi çözümler bulur. Çözümler, sayılardan oluşan dizilerle temsil edilen kromozomlarla gösterilir. GA'ların müzik besteleme alanındaki uygulamaları, tematik dönüşümden, caz soloları oluşturmaya ve ritim üretimine kadar çeşitlilik gösterir [35, 36].

2.1.2.Genetik Algoritmaların Müzik Bestelemesinde Kullanımı

GA'lar, genellikle bir optimizasyon problemi olarak ele alınan müzik besteleme ve varyasyonları için uygun bir araçtır [37]. Müzik varyasyonları bağlamında, arama genişliği verilen bir melodinin tüm olası varyasyonları kümesidir [10]. GA'nın temel prensibi, bir arama genişliğinden olası her çözümün bir popülasyondaki bir bireye karşılık gelmesidir [2]. Popülasyon, istenen çözüme ulaşana

veya mevcut kaynakları (zaman, maksimum nesil sayısı) tüketene kadar evrilir. GA'ların kullanılabilmesi için en az kriter, çözümlerin sembolik biçimde temsil edilebilmesi ve çözümleri değerlendirme yöntemlerinin mevcut olmasıdır.

GA'nın temel adımları şunlardır:

- Olası çözümlerden oluşan ilk popülasyonu rastgele oluşturmak. Her bireyin uygunluk değerini (fitness value) hesaplamak.
- Uygunluk gereksinimini karşılayan veya en iyi bireyleri seçmek.
- Seçilen bireyler üzerinde çaprazlama (crossover) ve mutasyon (mutation) operatörlerini uygulamak.
- Yeni neslin uygunluk değerlerini yeniden hesaplamak.
- İstenen sonuca ulaşılan veya durdurma kriteri karşılanana kadar 2. adımdan itibaren tekrarlamak.

Müzik bestelemeye GA kullanmanın en büyük zorluklarından biri, arama ge boyutudur; problem alanı hızla büyüdüğünden tatmin edici bir çözüme yakınsama aşırı uzun sürebilir. Araştırmacılar bu zorluğu aşmak için genellikle problemi daha küçük parçalara ayırır veya daha büyük yapı taşları üzerinde çalışır [35-37]

2.1.3. Müzik Temsili

GA'lar için müzik, genellikle kromozomlar aracılığıyla sembolik biçimde temsil edilir. Bu temsilin karmaşıklığı, üzerinde çalışılan müzik türüne (monofonik, polifonik) ve algoritmanın odaklandığı müziksel unsurlara (melodi, ritim, harmoni) bağlıdır. Örneğin, basit monofonik melodiler, notaların bir dizisi olarak temsil edilebilir [1, 35].

Genom platformunda yer alan düşük seviyeli gösterim, GenJam'ın (GA tabanlı müzik üretim sistemi) Genetic Jazz Network Framework (GJNF) formatına benzer bir sembol dizisidir; burada 1'den 14'e kadar sayılar iki oktavlık diyatonik ölçeği, 0 duraklamayı ve -1 önceki notanın veya duraklamanın devamını temsil eder. Daha alan bilgili seviye, nota nesnelerinden oluşur, her biri diyatonik ölçekteki adımını ve nota süresini içerir. Üçüncü, daha soyut seviye, analizörlerin çıktısıdır ve ritmik desenler veya frekans dağılımları gibi bilgileri türetebilir [8]. Başka bir çalışmada, müzik ABC (alfabetik) formatında temsil edilir ve melodi ve ritim sayısal değerlere dönüştürülür. Melodi, notanın sayısal değerini içeren $n \times 1$ 'lik bir vektördür [29]. Ritim, nota

uzunluğunu ve notanın mı yoksa duraklamanın mı olduğunu belirten bir ikili değişkeni içeren $n \times 2$ 'lik bir vektördür [8].

Piyano matrisi, polifonik müziği temsil etmek için kullanılan bir başka yöntemdir. Bu matris, bir piyano üzerindeki 88 tuş için 88 satır ve zaman aralıkları için isteğe bağlı sütunlar içerir. Matris, yalnızca sesin (1) veya sessizliğin (0) varlığını belirtir [29].

Dört sesli harmoni (soprano, alto, tenor, bas) ve nota süreleri, beş eşit uzunlukta dizeden oluşturulabilir olarak temsil edilebilir. Soprano bilgisi kullanıcı tarafından girilir ve GA, müziksel alan bilgisini kullanarak diğer üç sesi harmonize eder [39].

2.1.4. Genetik Algoritma Operatörlerinin Müzik Bestelemeye Adaptasyonu

GA'nın çekirdeğini oluşturan çaprazlama, mutasyon ve seçim operatörleri, müzik besteleme alanına özgü gereksinimlere uyarlanmalıdır [10].

Uygunluk Fonksiyonu, müzik üretiminde uygunluk fonksiyonu genellikle bir darboğazdır. Müziksel sonuçların niceliksel olarak ölçülemez olması ve insan değerlendirmesinin öznel ve zaman alıcı olması nedeniyle etkili bir uygunluk fonksiyonu tasarlamak zordur. Kaynaklar, üç ana uygunluk fonksiyonu türü önermektedir: Kural tabanlı, İnsan (Etkileşimli GA) ve Öğrenilmiş uygunluk fonksiyonları:

- Kural tabanlı uygunluk fonksiyonları en yaygın olanlardır ve müzik teorisine dayalı kuralları, armonik/fiziksel özellikleri veya istatistiksel verileri kullanabilir. Örneğin, bir melodi varyasyonunun orijinal melodiye benzerliğini ölçen metrikler kullanılabilir. Bir sistem, uygunluk değerini hesaplarken akor ilerlemesi, diyatonik uygunluk, ses yönlendirme ve pürüzsüzlük gibi müziksel faktörleri değerlendirebilir.
- İnsan uygunluk fonksiyonları (Etkileşimli GA), değerlendirme için insan etkileşimini gerektirir. GenJam gibi sistemlerde başarılı olmasına rağmen, her bireyi dinlemek ve yargılamak önemli miktarda zaman tüketir. Bu yaklaşım, kullanıcıyı yorabilir ve sonuçları değerlendirenin zevkine göre yanlı hale getirebilir [6, 40].

- Öğrenilmiş uygunluk fonksiyonları, uygunluk değerini yargılamak için yapay sinir ağları gibi yöntemleri kullanılır. Bu yaklaşım, ağı eğitmek için tam bir süreç gerektirir ve her zaman makul sonuçlar üretmeyebilir. Bazı sistemler, uygunluk fonksiyonu kullanmaktan tamamen kaçınarak, yalnızca alana özgü çaprazlama ve mutasyonlara güvenir [6, 40].

Uygunluk fonksiyonları genellikle karmaşık müziksel bilgiyi (örneğin, armonik yapı veya melodi konturu) değerlendirmek için tasarlanır. Birden fazla uygunluk fonksiyonu birleştirilebilir. Bazı sistemlerde uygunluk, piyano matrisi gibi müziksel temsilden maskeleri çıkararak ve bu maskeleri karşılaştırarak hesaplanır. Müziksel varyasyonların kalitesini belirlemenin kesin bir yolu olmaması, uygunluk fonksiyonu tasarımını zorlaştıran bir faktördür [8, 39].

Seçilim, popülasyondan sonraki nesil için bireyleri seçme süreci müzik bestelemesinde da kullanılır. Rulet tekerleği (Roulette Wheel) yöntemi, uygunluğa orantılı seçim ile yaygın olarak kullanılır; daha yüksek uygunluğa sahip bireylerin seçilme olasılığı daha yüksektir. Bazı çalışmalar, $(\mu + \lambda)$ -Evrimsel Stratejiyi kullanarak daha iyi sonuçlar elde edildiğini göstermiştir. Bu elitist yöntem, μ ebeveyn ve λ çocuk üretir ve en iyi μ birey bir sonraki nesil için seçilir [7, 10].

Çaprazlama, ebeveyn kromozomlarından yeni kromozomlar oluşturarak genetik çeşitliliği sağlamaya yardımcı olur. Müzik bestelemesinde, çaprazlama operatörleri müziksel yapıları koruyacak şekilde tasarlanabilir. Örneğin, tek noktalı (single point) çaprazlama kullanılabilir. Kullanıcı tarafından verilen bir motifin korunması gereken durumlarda, çaprazlama noktası motifin yapısını bozmayacak şekilde seçilebilir. Melodik aralığı en az olan çaprazlama noktası seçilerek atlamaların önüne geçilebilir.

Dört sesli harmoni sisteminde, çaprazlama, melodi ve karşılık gelen akorların ardışık notaları arasında bir çaprazlama noktası seçerek iki kromozom arasında çaprazlama işlemi yapılabilir [7, 10].

Mutasyon, popülasyonda çeşitliliği korumak için kullanılır. Müzik bestelemesinde mutasyon operatörleri, notaları, ritimleri veya müziksel fragmentleri değiştirebilir. Kullanıcı motifini korumak için, mutasyonlar motifin notalarını değiştirmeyebilir. Nota tabanlı mutasyon, rastgele seçilen bir notayı komşularına göre belirli bir aralık içinde (örneğin, 4 aralık) başka bir notayla değiştirebilir. Motif tabanlı mutasyon, rastgele seçilmiş bir müziksel motif veya onun tersini kopyalayabilir. Karıştırma (shuffle) mutasyonu, bir motiftteki notaların sırasını değiştirebilir [7, 10].

Harmoni bağlamında mutasyonlar, alto, tenor ve bas partilerinin bir yarı ton veya tam ton yukarı veya aşağı hareket etmesine (perturb), iki sesin yer değiştirmesine (swap), farklı bir akor tipine değişmeye (rechord) veya müzikal cümle sonunun kök pozisyonunda bir akorla bitmesini sağlamaya (phraseEnd) izin verebilir [39, 41].

2.1.5. Üretilen Müziğin Değerlendirilmesi

Algoritmik olarak üretilen müziğin kalitesini değerlendirmek, bu alanın önemli ve zorlu bir yönüdür. Müzikal sonuçlar, diğer hesaplama zekâsı problemlerinde olduğu gibi nesnel olarak ölçülemez. Bu nedenle, insan değerlendirmesi, müziğin estetik kalitesini, kulağa hoş gelip gelmediğini ve GA'nın performansını (hız açısından) estetik kalite ile ilişkilendirmek için önemlidir [7, 10, 27].

Müziğin estetik kalitesi, tercih veya duyguların ötesindedir; müziksel yapıyı, performansı, algıyı ve bestelemeyi dikkate alan bir parçayı bütün olarak değerlendirir. Estetik algı nesnel olabilir, çünkü estetik nitelikler sanat eserleri olarak sınıflandırılır ve müziğin uygulanmış ve deneyimlenmiş kavramlarının anlaşılmasına yardımcı olur. Bununla birlikte, müzik kalitesini değerlendirmek için mevcut yöntemler (frekans spektrumu, harmonik değerlendirme, optimizasyon fonksiyonları vb.), estetik kaliteyi değerlendirmede sınırlıdır.

Bir çalışma, GA tarafından farklı nesil sayılarında sonlandırılan monofonik müziklerin estetik kalitesini insan dinleyiciler aracılığıyla değerlendirmişti. Sonuçlar, GA'lar besteleme süresi açısından daha iyi performans gösterse de estetik müzik üretmeyi garanti etmediğini göstermiştir; algoritmanın erken yakınsamasının iyi estetik üreteceğine dair bir kanıt bulunamamıştır. Aksine, daha uzun nesillerde (örneğin, 60.000 nesil) sonlandırılan besteler dinleyiciler tarafından daha çekici bulunmuştur. Bu, GA modellerinin erken yakınsaması ile üretilen müziğin estetik kalitesi arasında bir ilişki olmadığı yönündeki önceki çalışmalarla çelişmektedir [42]. Bu durum, kullanılan müziğin monofonik olması veya insan değerlendirmesinin karmaşıklığı gibi faktörlerle açıklanabilir. Bu bulgu, GA'ları müzik bestelemek için kullanan algoritmik besteleme yöntemlerinin sadece optimizasyon kurallarına odaklanmaması, bunun yerine dinleyicileri etkilemek için empati, samimiyet, tutku ve yaratıcılığın bir uzlaşmasını göstermesi gerektiğini önermektedir [7].

İnsan değerlendirmesi, müziğin kalitesini değerlendirmek için en uygun yöntem olduğu savunulsa da model performansının bir ölçümünü sağlamaz, ancak

modelin estetik müzik üretme yeteneği hakkında göstergeler sunar. Subjektif değerlendirmeyi etkileyebilecek faktörler (örneğin, dinleyicinin ruh hali veya bağlam) göz önünde bulundurulmalıdır.

Uygunluk fonksiyonu olarak insan değerlendirmesini otomatikleştirmek için makine öğrenmesi yöntemleri kullanılabilir. Yapay sinir ağları (YSA) veya Derin öğrenme modelleri (Bidirectional Long Short-Term Memory (Bi-LSTM) gibi), insan dinleyicilerin puanlarını modellemek ve tahmin etmek için eğitilebilir. Bu, etkileşimli değerlendirmenin zaman alıcı dezavantajını ortadan kaldırabilir. Bir çalışmada, müzik grameri, uzman dinleyicilerin puanları ve sıradan dinleyicilerin puanları olmak üzere üç objektif fonksiyonu birleştiren çok amaçlı bir GA kullanılmıştır. Bu yaklaşım hem müzik teorisi kurallarına uyan hem de insan zevkini dikkate alan müzik üretmeyi hedefler. Bu tür sistemler, farklı stillerde ve uzunluklarda, harmoni içeren polifonik müzik üretebilir [29, 43].

2.1.6. Belirli Sistemler ve Platformlar

Literatürde, GA'ları müzik üretimi için kullanan çeşitli sistemler ve platformlar tanımlanmaktadır:

Genom; GA'lar ile müzik yaratıcılığını modelleme deneyleri için tasarlanmış bir yazılım platformudur. Algoritmik müzik varyasyonları (AMV-Algorithmic Music Variaton) için R. Kh. Zaripov'un fikirlerini uyarlamayı amaçlar. Genom, GA deneyleri için bir platform olsa da özellikle AMV için tasarlanmamıştır. Platform, deneyleri gerçek zamanlı olarak izleme, özel genetik operatörler (GO) ekleme, GA/GO seçeneklerini ayarlama ve müzik bestelerini müzik notaları olarak görüntüleme veya dinleme yetenekleri sağlar. Genom, Zaripov'un dönüştürücülerinin modifikasyon kısmını, bir dizi yeni mutasyon ekleyerek uygular. Genom'da uygunluk fonksiyonu fikri, alan mantığını algoritmanın kendisinden çıkarıp alt programlara ve parametrelere yerleştirmektir. Genom, tamamen otomatik bir sistem olmaktan ziyade, besteciler için etkileşimli bir yardımcı olarak tasarlanmıştır [8].

Variations; bu sistem, stokastik müzik üreticinin çıktısından kabul edilebilir materyali tanımlayan bir dizi veri filtresi üretmek için GA kullanır. Besteciye, kulağı ve aranjörü temsil eden genetik ajanları içerir. Kulak modülü, armonik kombinasyonları en iyi veya en kötü olarak tanımlayan bir veri filtresi görevi görür. Sistemin çıktısı, genellikle türetildiği motiflere benzeyen, ancak tanınabilir

dönüşümler içeren melodilerdir. Variations, mikrotonal müzik uygulamalarına da uyarlanabilir [8, 44].

GenJam; IGA kullanarak caz soloları üreten bir sistemdir. İnsan, uygunluk değerlendirmesi için kullanılır. Bazı versiyonlarda uygunluk fonksiyonu kullanılmaz, yalnızca alana özgü çaprazlama ve mutasyonlara dayanılır [37, 43, 45].

ABC (Alfabetik) Notation ve MIDI (Musical Instrument Digital Interface); müzik temsil formatları olarak ABC Notation ve standart MIDI formatı yaygın olarak kullanılır ve aralarında dönüşüm araçları bulunur [27].

PySynth ve JFugue: Müzik bestelerini çalmak veya ses dosyalarına dönüştürmek için kullanılan yazılım kütüphaneleridir. PySynth, müziği wave dosya formatına dönüştürmek için kullanılan basit bir müzik sentezleyicidir. JFugue, Java programlama diliyle müzik programlama için açık kaynaklı bir Application Programming Interface (API)'dir ve müziği çalışma zamanında çalmaya veya MIDI dosyalarına kaydetmeye/açmaya olanak tanır [8, 10].

2.1.7.Zorluklar ve Gelecek Yönleri

GA'ların müzik üretimindeki uygulamaları umut verici olsa da hala önemli zorluklar mevcuttur. En temel sorunlardan biri, müziğin kalitesini nesnel olarak değerlendiren etkili bir uygunluk fonksiyonu tasarlamının zorluğudur. İnsan değerlendirmesinin öznelliği ve zaman alıcılığı bu sorunu daha da karmaşık hale getirir. Öğrenilmiş uygunluk fonksiyonları potansiyel sunsa da yeterince iyi sonuçlar elde etmek için eğitim süreci ve veri gereksinimleri bir zorluktur [37-46].

Arama genişliğinin büyüklüğü ve karmaşıklığı, GA'ların tatmin edici çözümlere yakınsamasını zorlaştırabilir. Müziksel yapıların karmaşık etkileşimleri, uygunluk manzarasında yerel en iyilere veya en kötülere takılma riskini artırır. Bir akorttaki değişiklik, çevresindeki harmonileri etkileyebilir ve bu tür bağlama bağlı ilişkiler basit GA'lar için zorlayıcıdır. İnsan besteciler, bu tür sorunları çözmek için genel bir harmonik çerçeve tasarlayarak yapılandırılmış bir süreç kullanırlar. Basit GA'lar, bu tür yapılandırılmış akıl yürütme yeteneğinden yoksundur [35, 36].

Mevcut GA tabanlı sistemlerin çoğu monofonik müzikle sınırlıdır. Harmoniyi içeren polifonik müzik üretimi daha karmaşık bir görevdir. Harmoni kurallarını ve seslerin eş zamanlı kombinasyonlarını dikkate almak gereklidir [29].

Müziksel stilin veya duygunun yakalanması ve üretilmesi, bir başka zorluktur. Veri tabanlı yöntemler belirli bir stilin taklit edilmesinde etkili olabilir, ancak gerçek yaratıcılığı sergilemede yetersiz kalabilir. Kullanıcıların kendi fikirlerini (motif gibi) bestesine dahil etmelerine olanak tanımak, sistemin esnekliğini artırabilir [10].

Gelecek çalışmalar için potansiyel yönler şunlardır:

- Harmoninin dahil edilmesiyle polifonik müziğin otomatik üretimi,
- Daha gelişmiş uygunluk fonksiyonlarının (öğrenilmiş fonksiyonlar veya çok amaçlı optimizasyon gibi) araştırılması.
- GA'ları diğer YZ teknikleriyle (örneğin, derin öğrenme, kural tabanlı sistemler) birleştiren melez yaklaşımların geliştirilmesi.
- Müziksel yapıları daha hiyerarşik ve bağlama duyarlı şekillerde temsil eden yöntemlerin araştırılması.
- Üretilen müziğin estetik kalitesi ile algoritma performansı arasındaki ilişkinin daha derinlemesine incelenmesi, özellikle farklı müzik türleri ve karmaşıklık seviyeleri için.
- Müziksel duygunun, anlatının veya enstrümantasyonun (birden fazla enstrüman) modellenmesi ve bestelemeye dahil edilmesi [29, 39].

GA, melodi besteleme ve varyasyonlarını modellemek için güçlü bir çerçeve sunmaktadır. Doğal seçimden ilham alan iteratif optimizasyon süreci, rastgele keşif ve yapılandırılmış evrimi birleştirerek yeni müziksel fikirler üretme potansiyeline sahiptir. Ancak, bu alandaki çalışmalar, müzikal kalitenin öznel doğası nedeniyle uygun bir uygunluk fonksiyonu tanımlamanın zorluğu, arama genişliğinin büyüklüğü ve müziksel yapıların karmaşık etkileşimleri gibi önemli zorluklarla karşı karşıyadır.

Araştırmacılar, alana özgü kromozom temsilleri, uygunluk fonksiyonları ve genetik operatörler tasarlayarak bu zorlukların üstesinden gelmeye çalışmıştır. Kural tabanlı, insan merkezli (etkileşimli) ve öğrenilmiş uygunluk değerlendirmeleri gibi çeşitli uygunluk yaklaşımları denenmiştir. Son çalışmalar hem müzik teorisi kurallarını hem de insan dinleyicilerin tercihlerini dikkate alan çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarına yönelmektedir.

Genom ve Variations gibi sistemler, GA tabanlı müzik üretiminin uygulanabilirliğini göstermiştir, ancak genellikle belirli müziksel unsurlara (örneğin, monofonik melodiler veya harmonik hareketin yerel yönleri) odaklanmaktadır.

GA performansı (hız) ile üretilen müziğin estetik kalitesi arasındaki ilişkinin net olmaması, sadece algoritma optimizasyonuna değil, aynı zamanda müziksel yaratıcılığın daha derin yönlerini yakalamaya odaklanmanın önemini vurgulamaktadır. Gelecek çalışmalar, polifonik müziğin üretilmesi, daha gelişmiş değerlendirme metriklerinin geliştirilmesi ve GA'ların diğer YZ teknikleriyle entegrasyonu gibi alanlarda ilerleme sağlamayı hedeflemektedir.

GA, tamamen otomatik sistemlerden bestecilere yardımcı araçlara kadar çeşitli uygulamalarda müzik üretimi için değerli bir araç olmaya devam etmektedir. Bu alandaki sürekli araştırma, bilgisayarların hem teknik olarak doğru hem de estetik açıdan hoş müzik besteleme yeteneğini daha da geliştirecektir.

2.2. Genetik Algoritmaların Müzikal Beste Üzerindeki Etkileri

Son yıllarda GA'ların yaratıcı alanlarda, özellikle müzikal besteleme süreçlerinde kullanımı artmıştır. Bu algoritmalar, rastgele başlatılmış nota dizileri üzerinden uygunluk değerlendirmeleri yaparak estetik açıdan tatmin edici müzik parçaları oluşturmayı amaçlar. GA'ların müzikal bestelemeye katkısı hem otomatik beste üretimi hem de yaratıcı iş birlikleri bağlamında önemlidir. GA, müzikal besteleme sürecinde çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Bunlar arasında melodi üretimi, ritim sentezi, harmoni ilerlemeleri oluşturma ve çok sesli müzik yapıları üretme gibi alanlar yer alır. Kullanılan temel yöntemler şunlardır:

- Melodi kodlama; nota yüksekliği, süre ve dinamik gibi bileşenlerin genetik dizilere çevrilmesi.
- Uygunluk fonksiyonu; müzikal yapıların harmonik, ritmik veya stilistik özelliklerine göre değerlendirilmesi.
- Evrimsel işlemler; seçim, çaprazlama ve mutasyon gibi işlemlerle müzikal çeşitliliğin artırılması.

Bazı çalışmalarda, GA'ların müzikal örüntüleri insan duyumuna daha yakın hale getirebilmesi için YSA ile birlikte hibrit sistemler geliştirilmiştir. Ayrıca, kullanıcı geri bildirimi ile çalışan interaktif sistemler, bireysel tercihlere uygun müzikler üretmek amacıyla tercih edilmektedir. GA'ların müzikal besteleme üzerindeki en büyük etkisi, yaratıcı süreci algoritmik olarak modelleyebilme yeteneğidir. Bu hem profesyonel müzisyenlerin hem de amatör kullanıcıların yeni

melodiler üretmesini kolaylaştırır. Ayrıca, klasik müzik teorisi kurallarına bağlı olarak yenilikçi besteler oluşturulmasını sağlar. Bunun yanı sıra GA'lar, belirli bir müzik türüne veya stile özgü melodik kalıplar üreterek YZ destekli besteciliğe yeni olanaklar sunar. Geri bildirim döngüsüyle çalışan sistemlerde ise, kullanıcı tercihleri doğrudan bestenin evrimini etkiler.

GA'lar, müzikal bestelemeye yaratıcılığı destekleyen önemli algoritmik araçlardan biridir. Melodi, ritim ve harmoni gibi temel müzikal bileşenleri genetik temsillere dönüştürerek, evrimsel işlemler aracılığıyla estetik ve özgün besteler oluşturulmasını sağlar. Literatürdeki çeşitli örnekler, GA'ların sadece teknik değil aynı zamanda sanatsal üretim süreçlerine de önemli katkılar sağladığını göstermektedir. Aşağıda son yıllarda bu konu üzerinde yapılmış güncel 5 bazı çalışmalar sunulmuştur:

- Genetik algoritmaların müzik bestelemadaki yenilikçi uygulamalarını incelenmiştir [47]. D. Xu ve H. Xu'nun bu çalışmasında, evrimsel hesaplama tekniklerinin müzikal yaratım süreçlerine entegrasyonunu ve bu entegrasyonun müzikal ifadedeki etkilerini analiz etmektedir.
- L. R. De Azevedo Santos ve arkadaşları çalışmasında, GA kullanılarak duygusal şablonlara dayalı prosedürel piyano müziği besteleme metodolojisini sunmaktadır [48]. Araştırma, mutlu ve hüzünlü duygulara sahip şablonlara uygun müzik parçalarının otomatik olarak üretilmesini hedeflemektedir.
- A. Wiafe ve arkadaşları çalışmasında, GA kullanılarak oluşturulan monofonik müziklerin estetik kalitesini değerlendirmektedir [7]. Çalışma, erken sonlandırmanın müzikal estetik üzerindeki etkilerini analiz etmektedir.
- H. C. Soong ve arkadaşları çalışmasında, GA kullanılarak monofonik melodilerin evrimsel olarak oluşturulması ele alınmıştır [49]. Müzikal notaların genetik temsilleri aracılığıyla kısa melodilerin üretilmesi çalışılmıştır.

2.3. Literatürde Yapılmış Çalışmaların İncelenmesi

Yakın zamanda yapılan bir çalışma, geleneksel Sichuan Qingyin (sessiz) müziğine odaklanarak, ezgi üretimi ve optimizasyonu için derin öğrenme ile GA'ların birleşimini içeren yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır [50]. Çalışma, önce MIDI biçimindeki müzik verilerini zaman serisi olarak ön işleyip RNN-LSTM (Recurrent

Neural Network- Long Short-Term Memory) modeli ile ezgiler üretmektedir; bu model, müzikal öğelerin zamansal ilişkilerini öğrenerek ardışık veri modellemesi yapar. Üretilen ezgiler daha sonra GA kullanılarak optimize edilir; burada çaprazlama ve mutasyon işlemleri uygulanarak ezginin uygunluk değeri artırılır. Uygunluk değeri, evrimsel kurallar ya da insan değerlendirmelerine göre belirlenmiştir. Sichuan Qingyin müziğinden seçilen sekiz ezgi üzerinde yapılan deneylerde, evrimsel optimizasyon sonrası ezgilerin kalitesinde anlamlı artış gözlemlenmiş; ortalama dinleyici puanları yaklaşık 3,67'den 6,33'e yükselmiştir. Ayrıca önerilen model, HMM (Hidden Markov Model) ve DNN-HMM (Deep Neural Network-Hidden Markov Model) gibi geleneksel yöntemlerden daha yüksek doğruluk ve kullanıcı memnuniyeti sağlamıştır. Literatürdeki diğer yöntemlerle yapılan karşılaştırmalar da önerilen Derin öğrenme-GA tabanlı melez yaklaşımın ezgi üretiminde daha üstün performans gösterdiğini ortaya koymuş; bu da yöntemi, yerel müzik geleneklerinin YZ destekli korunması ve yeniden canlandırılması için etkili bir araç haline getirmiştir.

Bir diğer çalışma, otomatik müzik üretimi alanında, çok amaçlı genetik algoritma ile derin öğrenmeyi birleştirerek çok sesli (polifonik) müzik parçalarının üretimini amaçlayan yenilikçi bir sistem önermektedir [29]. Çalışmanın temel problemi, müzik üretiminde hem müzik kurallarına uygunluğu hem de dinleyici memnuniyetini aynı anda değerlendirebilecek net bir ölçüt bulunmamasıdır. Bu doğrultuda, önerilen yöntem iki aşamalı bir yapıdadır: İlk aşamada, müzik kurallarına uygunluk ve insan yapımı müziklere benzerlik temelinde GA kullanılarak geniş bir müzik parçası havuzu oluşturulmakta; ikinci aşamada ise bu parçalar hem uzman hem de sıradan dinleyiciler tarafından puanlanarak elde edilen verilerle eğitilmiş iki ayrı Bi-LSTM ağı GA'nın hedef fonksiyonlarına entegre edilmektedir. Böylece sistem, müzik kuralları ile insan beğenilerini aynı anda gözeterek yeni müzikler üretmektedir. Yapılan deneysel analizler, önerilen yaklaşımın hem kurallara uygun hem de dinleyici açısından estetik olarak tatmin edici müzikler üretebildiğini göstermiştir. Ayrıca, önerilen sistemin müzik üretim sürecinde hız, esneklik ve stil uyumu açısından yüksek başarı sağladığı; melodi, armoni ve ritmi bir arada içeren parçalar üretebildiği görülmüştür. Sonuç olarak, yapılan bu çalışma hem müzik kurallarını hem de insan değerlendirmelerini dikkate alan çok amaçlı bir öğrenme yaklaşımı ile AMC sistemlerine önemli bir katkı sunmakta; müzik üretimini sadece teknik doğrulukla sınırlamayıp, insan duygusu ve beğenisini de merkeze alan bir model önermektedir.

Başka bir çalışma, MIDI formatındaki etiketlenmemiş müzik verilerinden otomatik olarak yeni müzik eserleri üretmek amacıyla geliştirilen bir yöntem sunmaktadır [51]. Temel katkı, iki farklı MIDI dosyasının harmoni ve ritim özelliklerini GA kullanarak yeniden birleştirerek, özgün ve intihal içermeyen müzik eserlerinin oluşturulmasıdır. Öncelikle her bir MIDI dosyasından perde (pitch), oktav, başlangıç zamanı ve nota süresi gibi temel müziksel özellikler çıkarılarak dört ayrı sözlük oluşturulmakta, ardından bu özellikler sıralı haritalarla yapılandırılmaktadır. Bu aşamada, birinci dosyanın armonik özellikleri ile ikinci dosyanın ritmik özellikleri GA yardımıyla uyumlu hale getirilerek birleştirilmekte ve böylece hem tutarlı hem de farklı stillerde yeni bir müzik bestesi elde edilmektedir. GA, harmoni sözlüklerini hem global (tüm notalar) hem de lokal (alt bölümlerdeki notalar) düzeyde uyumlu hale getirmek için ortalama kare hata ölçütüne dayalı olarak aday çözümler üretir. Yöntem, herhangi bir kullanıcı müdahalesi gerektirmeden çok enstrümanlı (polifonik) müzik parçaları oluşturabilirken, klasik müzik eserleri üzerinden yapılan testler yaklaşımın hem doğruluğunu hem de yaratıcılığını ortaya koymuştur. Ayrıca, oluşturulan müzikler dinlenebilir örnekler olarak müzik dinleme platformu olan Spotify üzerinden yayınlanmış ve müziksel özniteliklerin makine öğrenmesi sınıflandırıcılarıyla anlamlı biçimde tanınabildiği de gösterilmiştir. Sonuç olarak, bu yaklaşım müzik üretiminde insan müdahalesini en aza indirerek algoritmik besteleme sürecini hızlandırmakta, özgünlük ve çeşitlilik sağlayan etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Geleneksel Cava müziği olan Gamelan'ın iskeletsel ezgi yapısını temel alarak, soru-cevap temelli melodik ifadelerin yapay zekâ yoluyla üretimini hedefleyen yenilikçi bir sistem önerilmiştir [52]. Yazarlar, özellikle ondan az sayıda eserden oluşan küçük bir veri kümesini kullanarak yeni ve yaratıcı melodiler üretebilmek için GA tabanlı bir model geliştirmiştir. Model, Gamelan melodilerindeki ritmik ve melodik yapıların çok katmanlı (vuru, çift vuru, ölçü ve çizgi) düzeylerde soru-cevap desenlerine göre temsil edilmesini sağlayacak özellik çıkarımı ve veri haritalama aşamalarını içermektedir. Sistem, iki ardışık vuru temelli nota çiftlerinden oluşan bireylerle başlangıç popülasyonu oluşturur ve GA işlemleri olan seçim, çaprazlama ve mutasyon ile bu bireyleri geliştirerek dört ölçülük yeni Gamelan ezgileri üretir. Üretilen melodiler, hem veri kümesindeki örüntülerle benzerlik açısından hem de Gamelan uzmanları tarafından geleneksel yapı ve soru-cevap desenlerine uygunluk açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar, üretilen melodilerin yüksek oranda özgünlük ve ifade gücüne sahip olduğunu; özellikle çizgi düzeyinde veri kümesinde bulunmayan

ama geleneksel bestelerde rastlanan yeni melodik örüntüler oluşturabildiğini göstermektedir. Ayrıca, uzman değerlendirmelerinde üretilen tüm eserler Gamelan müziğinin karakteristiklerini yansıtmakta ve Endonezya müzik teorisine ait bir kavram olan "pathet nem" mod sistemine uygunluk göstermektedir. Çalışma, küçük veri kümeleriyle yaratıcı müzik üretiminde GA'nın etkili bir yöntem olduğunu ortaya koyarak, kültürel mirasın dijitalleşmesi ve yaratıcı YZ uygulamaları açısından önemli bir katkı sunmaktadır.

Otomatik müzik besteleme sürecinde GA ile YSA birleştirilerek yaratıcı ve dinlenebilir müzik parçaları üretmeyi amaçlayan iki aşamalı bir yaklaşım sunulmuştur [53]. İlk aşamada GA, belirli müzikal kurallara dayalı olarak başlangıç popülasyonları oluşturur ve bu popülasyonlar, ritim, melodi ve akor gibi müziksel öğelerin çeşitliliğini optimize edecek şekilde çaprazlama ve mutasyon işlemleriyle geliştirilir. İkinci aşamada ise, YSA'nı bu müzikal bireyleri değerlendirerek onların estetik uygunluklarını ve dinleyici açısından kalitesini ölçer; bu, insan beğenisine yakın sonuçlar elde etmek için kritik bir adımdır. Sistemin temel avantajı, hem teorik müzik kurallarına bağlı kalması hem de YZ kullanımıyla insan benzeri müzikal ifadeler üretmesidir. Çalışmada, MIDI verisi kullanılarak yapılan deneyler sonucunda önerilen yöntemin geleneksel GA veya yalnızca YSA kullanılan yöntemlere göre daha tutarlı, estetik ve yaratıcı besteler üretebildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu model sayesinde kullanıcı müdahalesine gerek kalmaksızın çok sesli ve dengeli müzik parçaları üretilmekte; bu da müzik besteleme sürecini otomatikleştirerek özellikle müzikal eğitim almamış bireyler için yeni ifade alanları yaratmaktadır. Sonuç olarak, çalışma hem müzikal kurallara bağlılığı hem de YZ destekli yaratıcılığı bir araya getirerek müzik üretiminde anlamlı bir yenilik sunmaktadır.

Önerilen başka bir çalışma, AMC için müzik teorisiyle yönlendirilmiş çok amaçlı evrimsel bir algoritma önermekte ve özellikle melodik dengeyi gerilim ve istikrar olmak üzere iki çelişkili hedefle optimize etmeye odaklanmaktadır [54]. Geliştirilen sistemde, kullanıcı tarafından belirlenen harmoni ilerlemeleri ve ritim desenleri temel alınarak, farklı melodik tercihlere uygun çok sayıda ezgi aynı anda üretilmektedir. Çalışmada iki uygunluk fonksiyonu tasarlanmıştır: biri istikrarlı melodiler için akor tonları, adım hareketleri ve inişli diziler gibi öğeleri; diğeri ise gerilimli melodiler için akor dışı tonlar, atlamalı hareketler ve çıkışlı dizileri esas almaktadır. Ayrıca, müzikal bağlama uygun biçimde tasarlanmış çaprazlama ve mutasyon operatörleri sayesinde melodiler, müzikal bütünlük ve duyuşal uyum

gözetilerek evrimsel olarak geliştirilmektedir. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) algoritması ile çok amaçlı optimizasyon sağlanarak, kullanıcıların istikrar-gerilim dengesine göre tercih yapabilecekleri bir çözüm kümesi oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlarda, önerilen yöntemin diğer çok amaçlı algoritmalara kıyasla daha yüksek hipervolum değeri sunduğu, üretilen melodilerin çeşitlilik ve estetik açıdan daha başarılı olduğu gösterilmiştir. Besteleme örnekleri üzerinden yapılan analizler, istikrarı ve gerilimi dengeleyen melodilerin hem harmoni yapılarıyla uyumlu hem de müzikal açıdan ilgi çekici olduğunu ortaya koymuştur. Sonuç olarak bu yöntem, sadece teknik doğruluk değil, ayrıca dinleyici beğenisini de dikkate alan etkili ve esnek bir otomatik müzik besteleme aracı olarak öne çıkmaktadır.

Monofonik müzik besteleme amacıyla GA ve Bresenham çizgi algoritmasını birleştiren esnek ve kullanıcı etkileşimli bir yaklaşım sunulmuştur [10]. Önerilen sistem, kullanıcıya zaman imzası, nota aralığı ve ölçek gibi müzikal parametreleri özelleştirme imkânı tanımakta ve hatta belirli bir motif girilmesine olanak sağlayarak bu motifi besteye entegre edebilmektedir. Ritmik yapı, Bresenham çizgi algoritması kullanılarak, farklı zaman imzalarına ve vuruş sürelerine uyum sağlayacak biçimde oluşturulmaktadır. Melodik yapı ise, kullanıcı tarafından belirlenmiş motifin korunmasına dikkat edilerek geliştirilen alan bilgisine özgü çaprazlama ve mutasyon operatörleriyle genetik algoritma yardımıyla üretilmektedir. Bu operatörler, notalar arası geçişlerin melodik bütünlüğünü bozmadan, çeşitliliği koruyan çözümler üretmek üzere tasarlanmıştır. Önerilen sistem hem varsayılan parametrelerle hem de kullanıcı tarafından girilen motif ve parametrelerle başarılı sonuçlar üretmiş; yapılan karşılaştırmalarda klasik genetik algoritmalara kıyasla daha yüksek uygunluk değerlerine ve daha hızlı yakınsamaya ulaşmıştır. Ayrıca, PySynth kullanılarak üretilen ezgiler ses dosyasına dönüştürülmüş ve müzik notası olarak da sunulmuştur. Sonuçlar, algoritmanın sadece teknik doğruluğu değil, aynı zamanda kullanıcı tercihini de gözeterek yaratıcı ve dinlenebilir müzik eserleri üretebildiğini göstermektedir. Gelecekte çalışmanın çok sesli (polifonik) yapılar ve harmonik unsurlar içerecek şekilde genişletilmesi planlanmaktadır.

Müzikte yaratıcı kavram üretimini desteklemek amacıyla, kavramsal harmanlama teorisini yüksek düzeyli özelliklerin istatistiksel önemiyle birleştiren yeni bir çerçeve önerilmiştir [55]. Özellikle Çin ve Alman geleneksel melodileri gibi farklı kültürel yapılara ait melodiler üzerinde uygulanan bu yöntem, düşük düzeyli müziksel bilgilerin (örneğin nota geçişleri) GA yardımıyla yeniden birleştirilmesini, buna

karşılık hedefin yüksek düzeyli müzikal özelliklerin (örneğin ritmik karmaşıklık, küçük aralıklar, nota tekrarı) harmanlanması olmasını esas alır. Önerilen sistemde, öncelikle veri kümesindeki tüm melodilerin bu altı temel özellikle temsil edildiği vektörler çıkarılır ve her özellik için bir önem değeri hesaplanır. Ardından, iki farklı melodi arasından en önemli özellikler seçilerek hedef bir harmanlama özelliği oluşturulur ve GA ile bu hedefe en yakın yeni bir melodi bestelenir. Özellikle sistemin, kullanıcının (doğu-batı dinleyicileri gibi) arka plan bilgisine göre farklı önem değerleri atayabilmesi, kültürel algı farklılıklarını da modelleyebilmesini sağlamaktadır. Örneğin, Çin müziğine alışkın bir dinleyici için Alman melodilerinde ses sınıfı karmaşıklığı öne çıkarken, batılı dinleyiciler Çin melodilerinde sabit ritmik tekrar gibi öğeleri daha ayırt edici bulabilir. Bu sistem sayesinde, belirli bir melodiye istenilen özelliklerin aktarılması, örnek nitelikteki melodilerin belirlenmesi ve kişiselleştirilmiş öneri sistemlerinin kurulması gibi uygulamalı senaryolar başarıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma hem yaratıcı müzik üretimini yönlendiren bilişsel teorilere katkı sunmakta hem de istatistiksel veri temelli yaklaşımla anlamlı ve hedefe yönelik melodi üretiminde önemli bir adım atmaktadır.

Duygusal ifade içeren müzik üretimi için geliştirilen besteleme platformu olan MetaCompose adlı esnek ve modüler bir sistemin tasarımını, yöntemlerini ve değerlendirme sonuçları sunulmuştur [56]. Sistem, özellikle video oyunları gibi etkileşimli ortamlarda gerçek zamanlı olarak farklı duygusal durumları yansıtan müzik üretmeyi amaçlamaktadır. MetaCompose, akor dizisi oluşturmak için grafik tabanlı bir geçiş yöntemi, melodi üretimi için çok amaçlı evrimsel bir algoritma (NSGA-II ve Feasible-Infeasible Two-Population Genetic Algorithm (FI-2POP) kombinasyonu), eşlik yapıları için örüntü tabanlı bir yaklaşıma sahiptir ve duygusal ifade katmanında tempo, tını, yoğunluk ve disonans (gerilimli, huzursuz veya kararsız gelen ses birleşimleri) gibi müzikal özellikleri değiştirerek valans-arousal (duyguları iki boyutta sınıflandıran bir duygu uzayı) düzlemi üzerinde duygu ifade etmektedir. Melodi üretiminde hem estetik kurallar hem de yapısal kısıtlar dikkate alınarak çoklu hedef fonksiyonları optimize edilmektedir. Sistem ayrıca, daha önce oluşturulmuş besteleri ve oyun durumlarına bağlı bağlam bilgilerini içeren bir arşiv ile çeşitliliği ve tutarlılığı sağlamaktadır. Yapılan kullanıcı deneyleri, sistemin bileşenlerinin her birinin müzikal kaliteye olumlu katkı sağladığını, disonansların ise negatif valans algısını artırdığını göstermektedir. Değerlendirme çalışmaları, MetaCompose'un oluşturduğu bestelerin rastgele varyantlara göre anlamlı ölçüde daha fazla uyumlu, hoş ve yapılandırılmış

bulunduğunu ortaya koymuş; ayrıca sistemin duygusal ifade açısından güvenilir ve özelleştirilebilir bir araç olduğunu doğrulamıştır. Sonuç olarak çalışma, yaratıcı hesaplamanın müziksel duygu üretimiyle entegrasyonunda ileri düzeyde, uygulanabilir ve teorik olarak temellendirilmiş bir çözüm önermektedir.

2.3.1. GA'nın Müzikal Beste Üzerindeki Etkileri

Son yıllarda GA'ların yaratıcı alanlarda, özellikle müzikal besteleme süreçlerinde kullanımı artmıştır. Bu algoritmalar, rastgele başlatılmış nota dizileri üzerinden uygunluk değerlendirmeleri yaparak estetik açıdan tatmin edici müzik parçaları oluşturmayı amaçlar. GA'ların müzikal bestelemeye katkısı hem otomatik beste üretimi hem de yaratıcı iş birlikleri bağlamında önemlidir. GA'lar müzikal beste sürecinde çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Bunlar arasında melodi üretimi, ritim sentezi, harmoni ilerlemeleri oluşturma ve çok sesli müzik yapıları üretme gibi alanlar yer alır. Kullanılan temel yöntemler şunlardır:

- Melodi kodlama; nota yüksekliği, süre ve dinamik gibi bileşenlerin genetik dizilere çevrilmesi.
- Uygunluk fonksiyonu; müzikal yapıların armonik, ritmik veya stilistik özelliklerine göre değerlendirilmesi.
- Evrimsel işlemler; seçim, çaprazlama ve mutasyon gibi işlemlerle müzikal çeşitliliğin artırılması.

Bazı çalışmalarda, GA'ların müzikal örüntüleri insan duyumuna daha yakın hale getirebilmesi için YSA ile birlikte melez sistemler geliştirilmiştir. Ayrıca, kullanıcı geri bildirimi ile çalışan interaktif sistemler, bireysel tercihlere uygun müzikler üretmek amacıyla tercih edilmektedir. GA'ların müzikal beste üzerindeki en büyük etkisi, yaratıcı süreci algoritmik olarak modelleyebilme yeteneğidir. Bu hem profesyonel müzisyenlerin hem de amatör kullanıcıların yeni melodiler üretmesini kolaylaştırır. Ayrıca, klasik müzik teorisi kurallarına bağlı kalarak yenilikçi besteler oluşturulmasını sağlar. Bunun yanı sıra GA'lar, belirli bir müzik türüne veya stile özgü melodik kalıplar üreterek YZ destekli besteciliğe yeni olanaklar sunar. Geri bildirim döngüsüyle çalışan sistemlerde ise, kullanıcı tercihleri doğrudan bestenin evrimini etkiler.

GA, müzikal bestelemede yaratıcılığı destekleyen önemli algoritmik araçlardan biridir. Melodi, ritim ve harmoni gibi temel müzikal bileşenleri genetik temsillere dönüştürerek, evrimsel işlem­ler aracılığıyla estetik ve özgün besteler oluşturulmasını sağlar. Literatürdeki çeşitli rnekler, GA'ların sadece teknik değil aynı zamanda sanatsal üretim süreçlerine de önemli katkılar sağladığını göstermektedir.



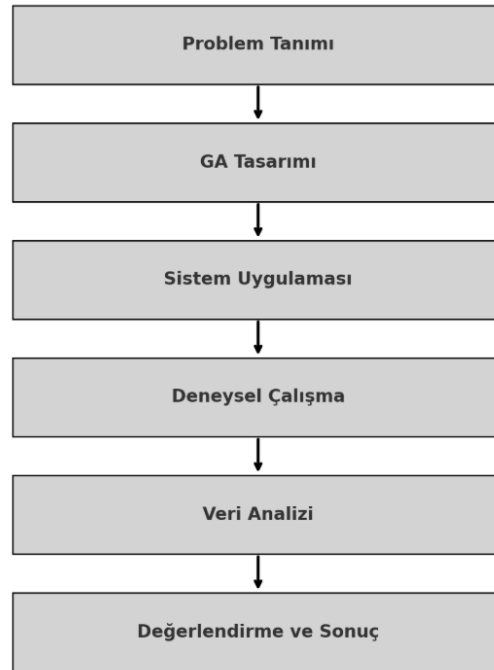
3. YÖNTEM

Bu bölümde, GA ile melodi üretimi ve optimizasyonu için benimsenen araştırma modeli, algoritmanın detaylı tasarımı ve kullanılan melodi değerlendirme yaklaşımları açıklanmaktadır.

3.1. Araştırma Modeli

Bu tezde, melodilerin otomatik olarak üretilmesi ve müzikal kriterlere göre optimize edilmesi amacıyla deneysel bir araştırma modeli benimsenmiştir. Model, bir GA sisteminin tasarlanması, uygulanması ve farklı parametre setleri altında elde edilen çıktıların hem algoritmik performans (uygunluk değeri, yakınsama hızı) hem de üretilen melodilerin müzikal nitelikleri açısından analiz edilmesine dayanmaktadır.

Araştırma modeli aşağıdaki adımları içerir:



Şekil 3.1.1. Araştırma Modeli Akış Şeması

Problem tanımı; müzikal olarak tutarlı, akıcı ve estetik melodiler üretme probleminde GA'yı bir optimizasyon tekniği olarak uygulama. GA tasarımı; Müzikal yapıları (melodileri) temsil edecek kromozom yapısının tanımlanması, genetik operatörlerin (seçim, çaprazlama, mutasyon) tasarlanması ve müzikal kriterleri

değerlendirecek bir uygunluk fonksiyonunun formüle edilmesi. Sistem uygulaması; tanımlanan GA modelinin Python dili ve Visual Studio 2022 ortamında uygulanması. Deneysel çalışma; belirlenen GA parametrelerinin (özellikle popülasyon boyutu ve turnuva seçimi boyutu) farklı kombinasyonları altında sistemin çalıştırılması ve deneylerin kaydedilmesi. Veri analizi; deneysel çalışmalardan elde edilen kantitatif verilerin (uygunluk değeri nesiller içindeki değişimi, yakınsama hızı vb.) ve kalitatif çıktıların (üretilen melodiler) analizi. Değerlendirme ve sonuç; analiz sonuçlarına dayanarak farklı parametrelerin etkilerinin değerlendirilmesi, araştırma sorularının yanıtlanması ve genel sonuçların çıkarılması.

Bu model, GA'nın müzik bestelemedeki potansiyelini anlamak ve parametre ayarlarının sonuçlar üzerindeki etkilerini ampirik (deneyim, gözlem) olarak incelemek için yapılandırılmıştır. Uygunluk fonksiyonu, GA'nın arama sürecini yönlendiren merkezi bileşendir ve bu tez çalışmasının başarısı için kritik öneme sahiptir [9].

3.2. Genetik Algoritma Tasarımı

Bu tezde uygulanan GA, biyolojik evrimden esinlenen standart GA döngüsünü takip eder ve melodi üretim problemine özgü uyarlamalar içerir [57, 58]. Bu tezde uygulanan kodlar modüler bir yapıya sahip olup, her modül belirli bir işlevi yerine getirmek için yapılandırılmıştır. Tablo 3.2.1.'de bu tez için hazırlanan kod modülleri işlevsel tanımları sunulmuştur.

Tablo 3.2.1. Uygulama Modül Yapısı

Modül / Bileşen	İşlevsel Açıklama
Modelleme Modülü	Melodi ve nota gibi temel müzikal nesnelerin tanımlandığı yapıdır.
Genetik İşlemler Modülü	Popülasyon oluşturma, birey seçimi, çaprazlama ve mutasyon işlemlerini içerir.
Uygunluk Değerlendirme Modülü	Melodilerin tonalite, tekrar yapıları ve aralık uyumu gibi müzikal ölçütlerle değerlendirilmesini sağlar.
Dışa Aktarım Modülü	Üretilen melodilerin MIDI ve MusicXML (müzikal notasyon verisini yazılımla paylaşmak

Modül / Bileşen	İşlevsel Açıklama
	için kullanılan bir açık ve standart veri formatı) formatlarında dışa aktarımını gerçekleştirir.
Çalma / Önizleme Modülü	Oluşturulan melodilerin MIDI dosyası üzerinden sistemde çalınmasını sağlar.
Yapılandırma Modülü (config.py)	Genetik algoritma parametreleri, tonalite bilgileri ve diğer sabit değerleri içerir.
Ana Uygulama Modülü (GeneticMelody.py)	Tüm modülleri bir araya getirerek algoritmanın yürütüldüğü temel betik dosyasıdır.

3.2.1. Melodi Kodlama Yapısı

GA’larda, problem çözümleri kromozom adı verilen genetik yapılara kodlanır. Bu projede, her bir kromozom tam bir melodi bireyini temsil eder. Kromozomlar, sabit uzunlukta bir nota dizisi olarak yapılandırılmıştır. Bu dizideki her bir öge, bir "gen" olarak kabul edilir ve tek bir notayı temsil eder.

Her bir nota (gen), iki temel bilgiyi içerir;

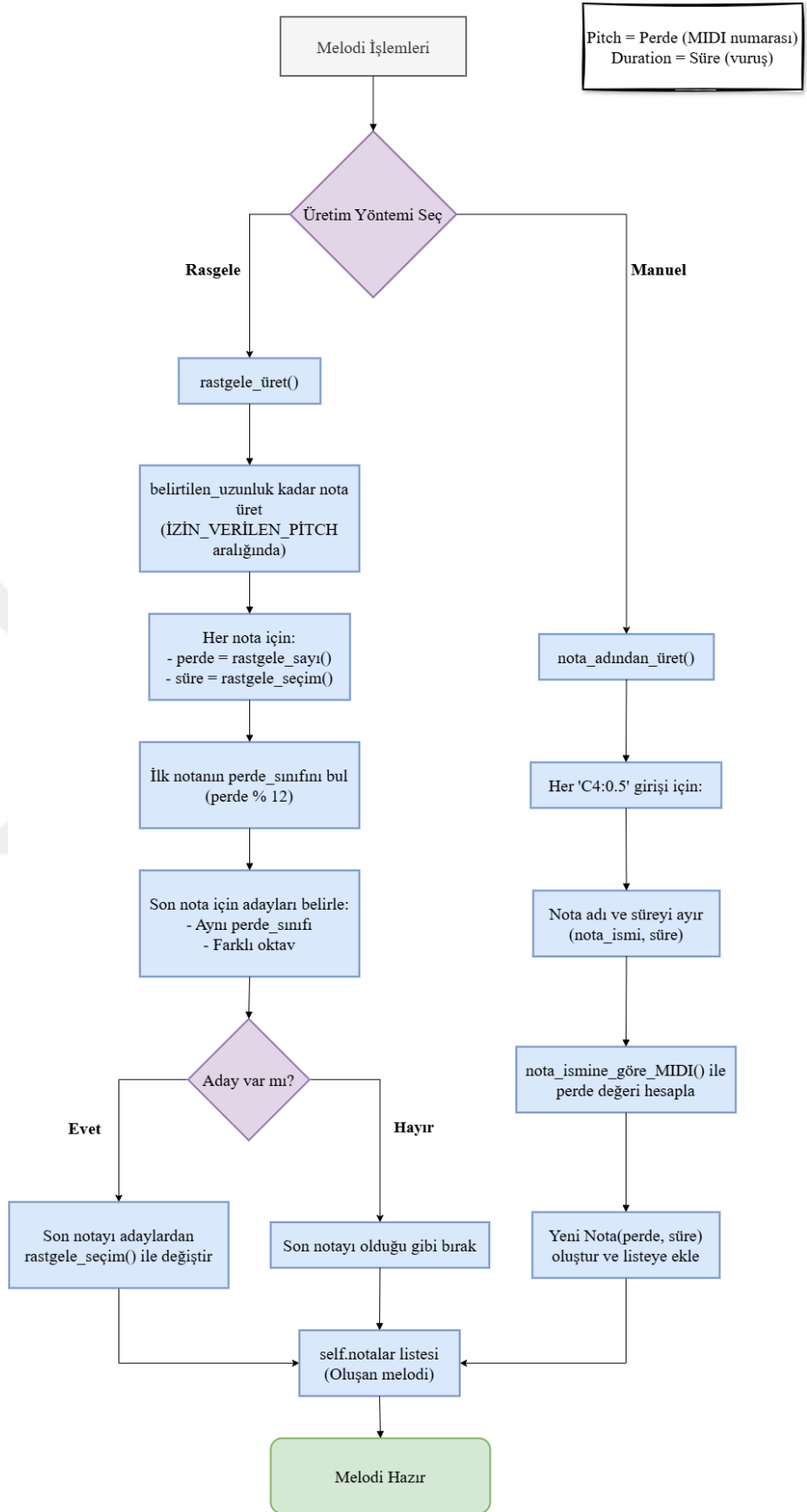
- Perde (pitch, yükseklik), Notanın müzikal yüksekliğini belirten bir MIDI değeridir. MIDI değerleri, müzik teorisinde belirli notalara karşılık gelir (örneğin, C4 için 60, A4 için 69, vb.). Bu tez kapsamında, belirli bir tonal aralık ve ölçek içinde değerler alması beklenir.
- Süre (duration), Notanın ne kadar süreceğini belirten bir değerdir, genellikle vuruş (beat) cinsinden ifade edilir. Farklı ritim değerleri (tam, yarım, çeyrek, sekizlik, vb.) bu parametre ile temsil edilir. Tablo 3.2.2. ‘de 8 notadan oluşan örnek bir kromozom yapısı gösterilmiştir.

Tablo 3.2.2. 8 Notadan Oluşan Örnek Kromozom Yapısı

MIDI Değeri	Perde Dizisi (perde % 12)	Nota Adı	Süre (Duration)
60	0	C4	1.0
62	2	D4	0.5
64	4	E4	1.0
65	5	F4	0.5
67	7	G4	1.5
69	9	A4	0.5
71	11	B4	1.0
72	0	C5	2.0

Bu örnekte, 8 notadan (genden) oluşan bir melodi kromozomu görülmektedir. İlk nota, 60 MIDI değerine sahip (C4) ve 1.0 vuruş (tam nota) sürelidir. Bu yapı, melodinin hem perde (pitch) dizisini hem de ritimsel yapısını (duration dizisi) tek bir kromozomda temsil etmeyi sağlar.

Bu tez çalışmasında melodi kodlama yapısı modelleme modülünde yer almakta olup akış diyagramı yapısı Şekil 3.2.1. 'de gösterilmiştir.



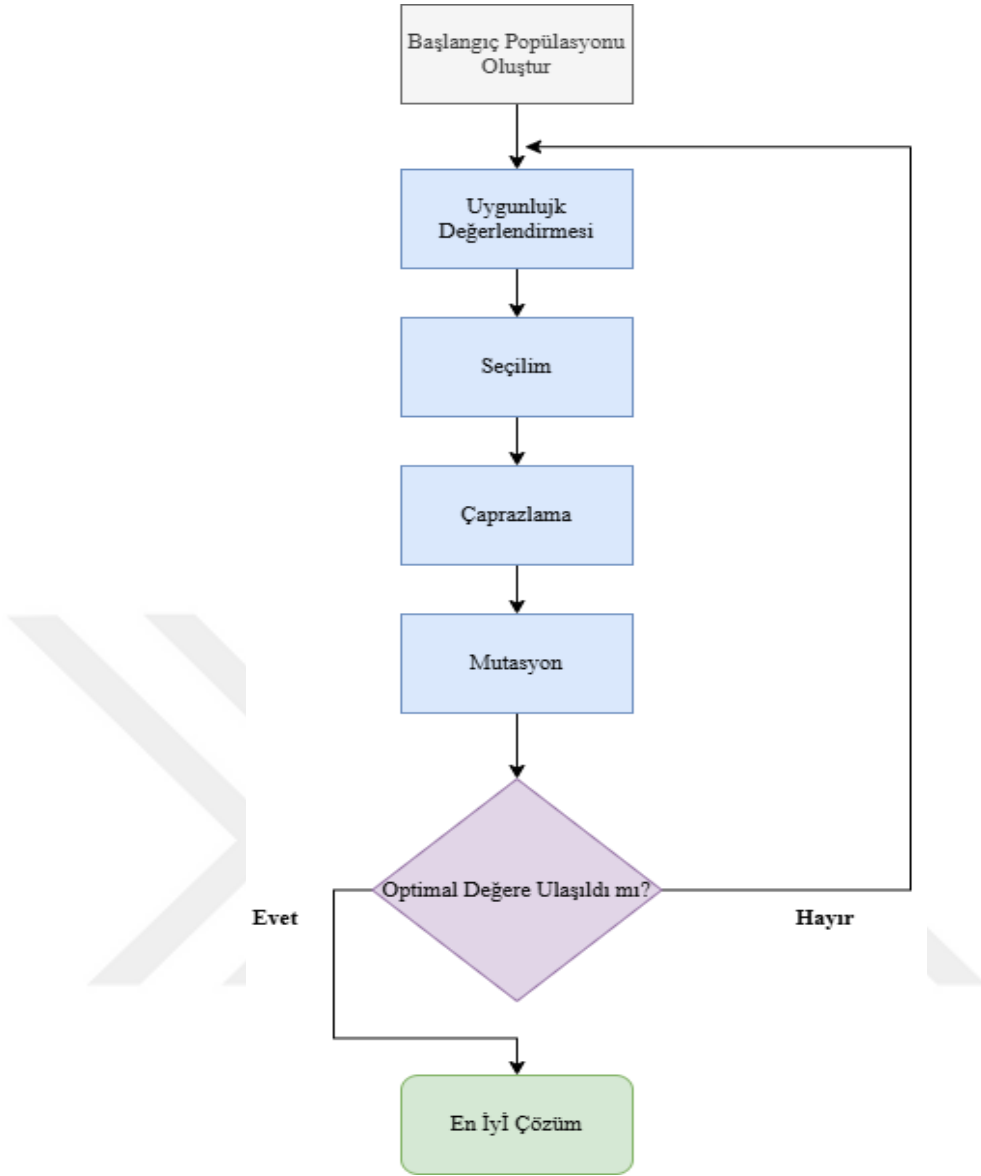
Şekil 3.2.1 Melodi Kodlama Yapısı Akış Diyagramı

Bu tezde kullanılan deneysel çalışmada, melodilerin algoritmik olarak oluşturulması ve yönetilmesi amacıyla geliştirilen *melodi* sınıfı, hem rastgele hem de kural tabanlı melodi üretimini destekleyen esnek bir yapıya sahiptir. Rastgele üretim yaklaşımında, kullanıcı tarafından tanımlanan melodi uzunluğu ve sistem içerisinde sabitlenen perde aralığı (*PITCH_RANGE*) doğrultusunda, çeşitli süre değerleriyle birlikte nota dizileri algoritmik olarak oluşturulmaktadır. Kural tabanlı üretim yönteminde ise, kullanıcı tarafından girilen ve "C4:0.5" biçiminde yapılandırılmış ifadeler sözcüksel olarak çözümlenmekte ve bu girdiler *nota* nesnelere dönüştürülmektedir. Her iki üretim tekniğinde de müzik kuramına uygunluk sağlamak amacıyla, başlangıç notasının perde sınıfı modüler aritmetik yöntemiyle (*perde % 12*) belirlenmekte ve bitiş notasının, aynı perde sınıfından fakat farklı oktav düzeyinden seçilmesiyle tonal tutarlılık sağlanmaktadır. Bu yapı, özellikle melodinin başı ve sonu arasında harmonik bütünlüğü korumak açısından önemle sahiptir. Ayrıca sınıf, kullanıcı girdilerindeki biçimsel hatalara karşı dayanıklı bir mekanizma içermekte olup, hatalı format algılandığında sistemin kesintisiz çalışmasına olanak tanımaktadır. Sınıfın *__repr__* metodu aracılığıyla da oluşturulan melodiler okunabilir biçimde kullanıcıya sunulmaktadır. Tüm bu özellikler, *melodi* sınıfının hem otomatik beste üretimi hem de kullanıcı kontrollü besteleme süreçlerine entegre edilebilir bir yazılım mimarisi sunmaktadır.

Bu melodi kodlama yapısı üzerinde GA'nın temel operatörleri (çaprazlama ve mutasyon) uygulanır. Bu temsil biçimi, algoritmik işlemlerin doğrudan müziksel öğeler üzerinde yapılmasını kolaylaştırır ve GA'nın yeni ve çeşitli melodiler üretmesine olanak tanır. Kromozomun uzunluğu, üretilecek melodinin ölçü sayısına ve her ölçüdeki nota sayısına bağlı olarak belirlenebilir; bazı sistemlerde ritim analizi sonucunda belirlenen nota sayısına göre kromozom uzunluğu dinamik olarak da ayarlanabilir [10]. Bu tezde, sabit uzunlukta bir melodi dizisi kullanılması beklenir.

3.2.2. Uygulanan GA Süreci

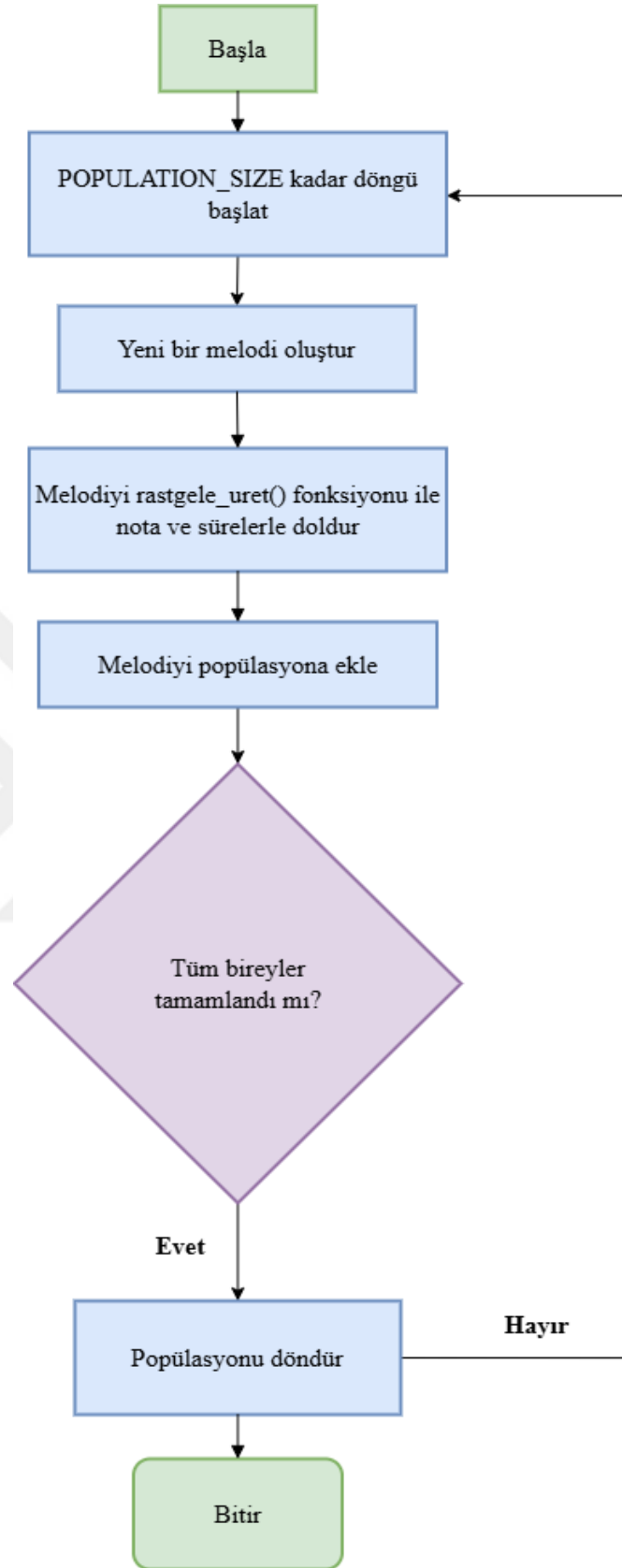
Uygulanan GA süreci, temel GA döngüsünü izler ve melodi optimizasyonu problemine uygulanır. Süreç Şekil 3.2.2 'deki adımları içerir.



Şekil 3.2.2. Uygulanan GA Süreci Akış Diyagramı

3.2.2.1. Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması

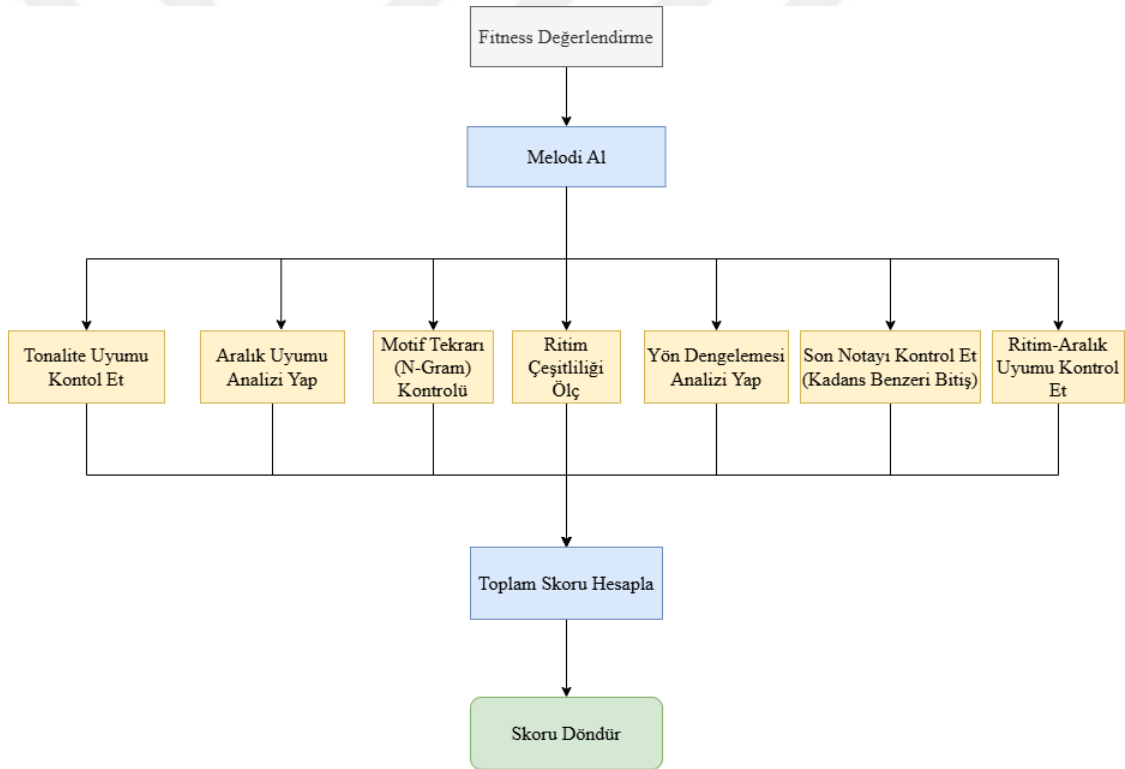
Algoritmanın ilk adımı, belirli bir büyüklükteki popülasyonu (*POPULATION_SIZE*) rasgele kromozomlardan oluşan bir başlangıç popülasyonu oluşturmaktır. Bu kromozomlar, rastgele seçilen perde ve süre değerlerine sahip notalar dizisidir. Notaların perde ve süre değerleri, önceden tanımlanmış müzikal sınırlar (örneğin, belirli bir oktav aralığı ve ritim değerleri kümesi) dahilinde seçilir. Kullanıcı tarafından sağlanan bir motif varsa, bu motif başlangıç popülasyonundaki bazı kromozomlara dahil edilebilir [10]. Başlangıç popülasyonu oluşturulurken hazırlanan yapının akış diyagramı Şekil 3.2.3 ‘te gösterilmiştir.



Şekil 3.2.3. Başlangıç Popülasyonu Oluşturma Akış Diyagramı

Şekil 3.2.3 ‘de yer alan akış diyagramı başlangıç popülasyonu üretmek için kullanılır. Her birey bir melodi nesnesidir. *rastgele_uret()* fonksiyonu ile her melodi rastgele notalar ve süreler oluşturur ve belirlenen büyüklükte bir melodi popülasyonu elde edilir.

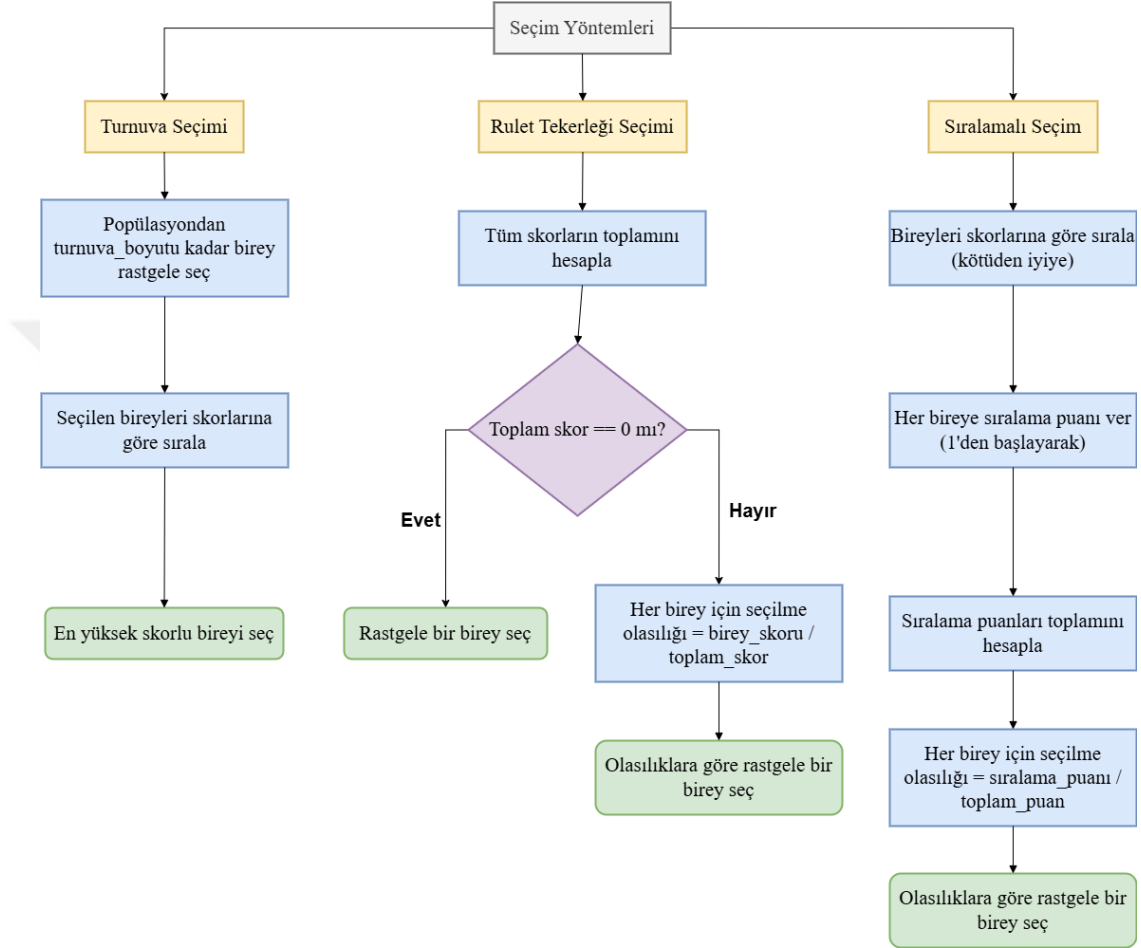
Uygunluk değerlendirmesi; popülasyondaki her bir kromozomun (melodinin) uygunluk değeri hesaplanır [7]. Uygunluk değeri, melodinin ne kadar iyi veya arzu edilen müzikal özelliklere ne kadar uygun olduğunu gösteren sayısal bir değerdir. Bu tez için detaylandırılan uygunluk fonksiyonu birden çok müzikal kriteri (tonalite, aralıklar, ritim, vb.) dikkate alır. Uygunluk değeri ne kadar yüksekse, melodi o kadar iyidir. Uygunluk fonksiyonu, GA’nın arama sürecini yönlendiren merkezi unsurdur [8]. Bu tezde uygunluk değerlendirme skorunu hesaplayan yapının akış diyagramı Şekil 3.2.4. ‘de gösterilmiştir.



Şekil 3.2.4. Uygunluk Değerlendirme İşlemi Akış Diyagramı

Seçilim (Selection); bir sonraki neslin ebeveynlerini seçmek için seçilim mekanizması kullanılır [58]. Bu tez çalışmasında Turnuva Seçimi (Tournament Selection) yöntemi kullanılmıştır. Turnuva seçiminde, popülasyondan rastgele olarak belirli sayıda birey (turnuva boyutu kadar, *tournament_size*) seçilir. Bu seçilen grup

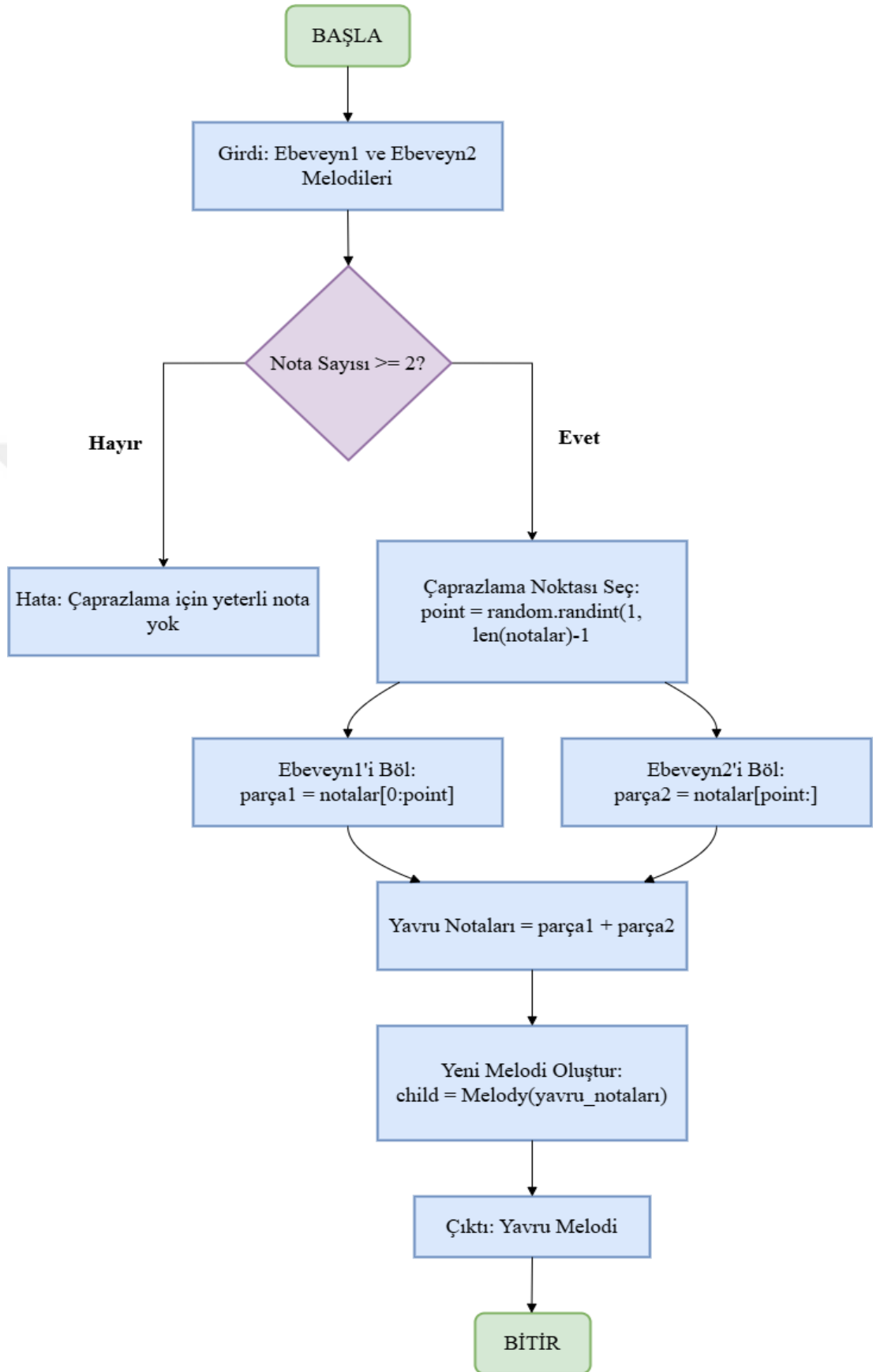
içindeki en yüksek uygunluk değerine sahip birey, ebeveyn havuzuna eklenir. Bu işlem, bir sonraki nesli oluşturmak için yeterli sayıda ebeveyn seçilene kadar tekrarlanır. Turnuva boyutu, seçim baskısının derecesini belirler. Bu tez için geliştirilen seçim kodu genetik işlemler modülünde yer almakta olup akış diyagramı yapısı Şekil 3.2.5 ‘te gösterilmiştir.



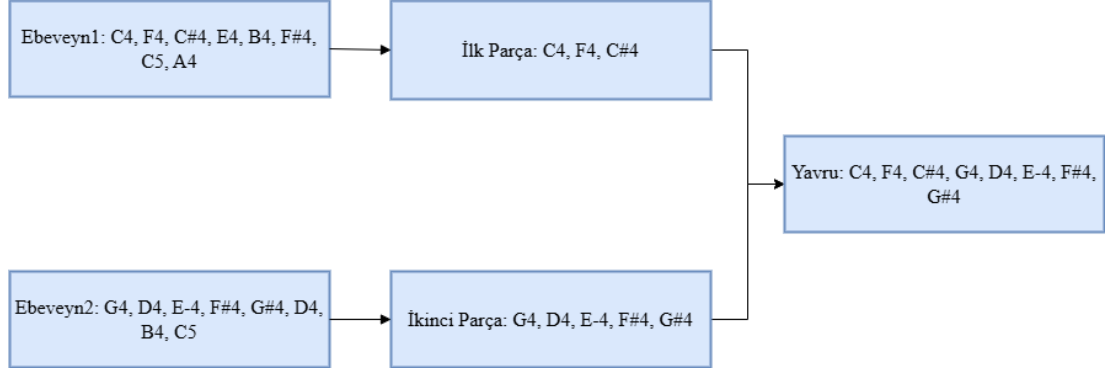
Şekil 3.2.5. Seçim Yöntemi Akış Diyagramı

Çaprazlama (Crossover); seçilen ebeveyn havuzundaki bireyler eşleştirilir ve çaprazlama operatörü uygulanarak yeni bireyler (yavrular) oluşturulur [2, 58]. Bu tezde Tek Noktalı Çaprazlama (One-Point Crossover) yöntemi kullanılmıştır. Örneğin tek noktalı çaprazlamada, iki ebeveyn kromozomu üzerinde rastgele bir çaprazlama noktası belirlenir ve bu noktanın öncesindeki veya sonrasındaki genler (notalar) ebeveynler arasında değiştirilerek iki yeni yavru kromozom elde edilir. Bu işlem, ebeveynlerin müzikal özelliklerinin yeni kombinasyonlarını yaratır. Bu tez çalışması için geliştirilen çaprazlama yöntemi yapısını gösteren akış diyagramı Şekil 3.2.6 ‘da

gösterilmiştir.

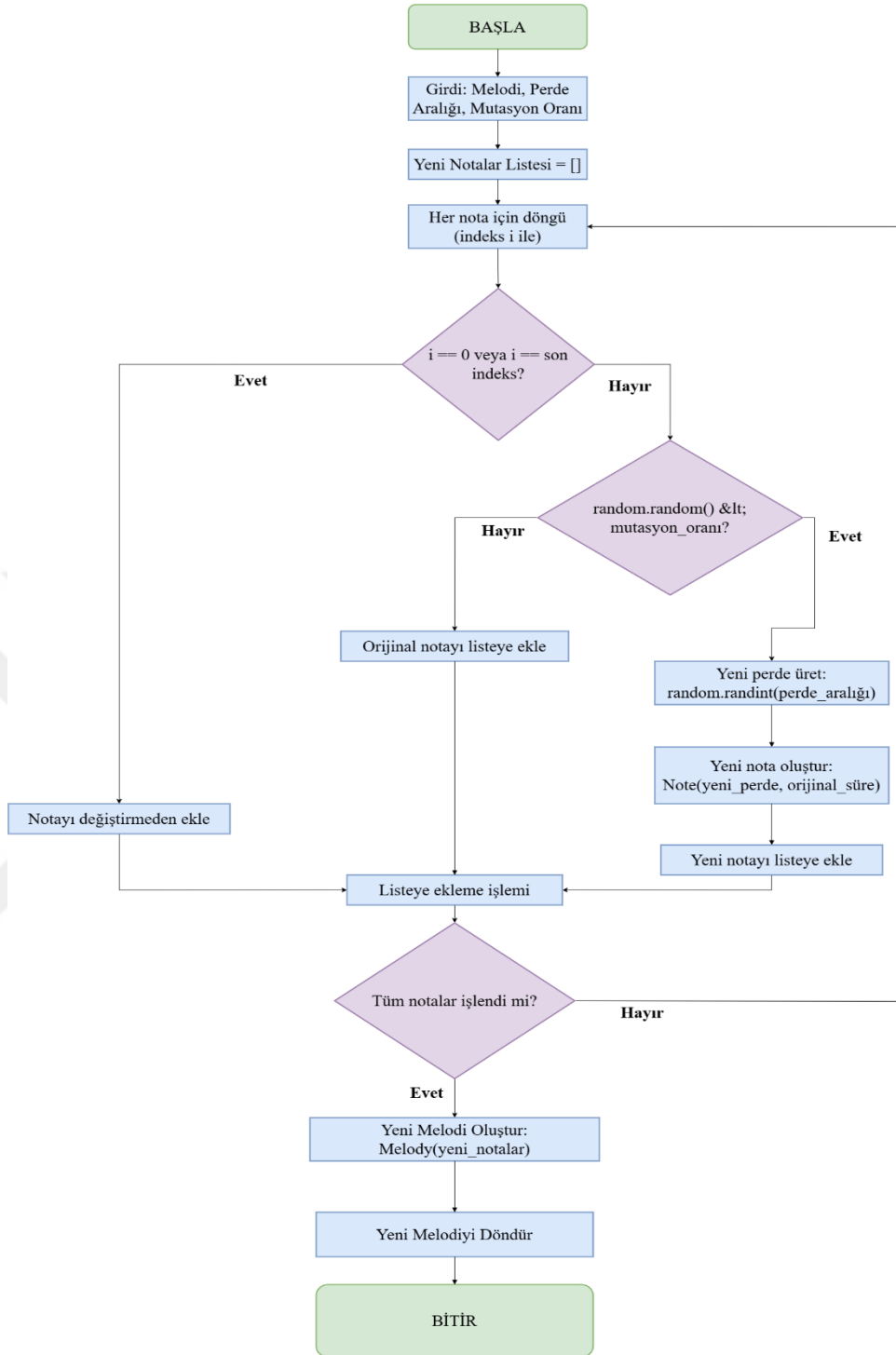


Şekil 3.2.6. Tek Noktalı Çaprazlama İşlemi Akış Diyagramı



Şekil 3.2.7. Yavru Oluşumu Örneği

Mutasyon (Mutation); çaprazlama sonucunda elde edilen yavrulara mutasyon operatörü uygulanır [58]. Mutasyon, belirli bir olasılıkla (*mutasyon_oranı*) kromozomdaki rastgele notalarda küçük değişiklikler yapmayı içerir. Bu tez çalışmasında rastgele nota değişikliği mutasyon türü kullanılmıştır. Bu, seçilen bir notanın perde değerini rastgele olarak değiştirilmesi anlamına gelir. Mutasyon, popülasyona yeni genetik materyal (müzikal fikirler) ekleyerek çeşitliliği korur ve algoritmanın yerel optimumlara takılmasını önlemeye yardımcı olur. Bu tez için geliştirilen mutasyon işlemi yapısı Şekil 3.2.8 ‘de gösterilmiştir.

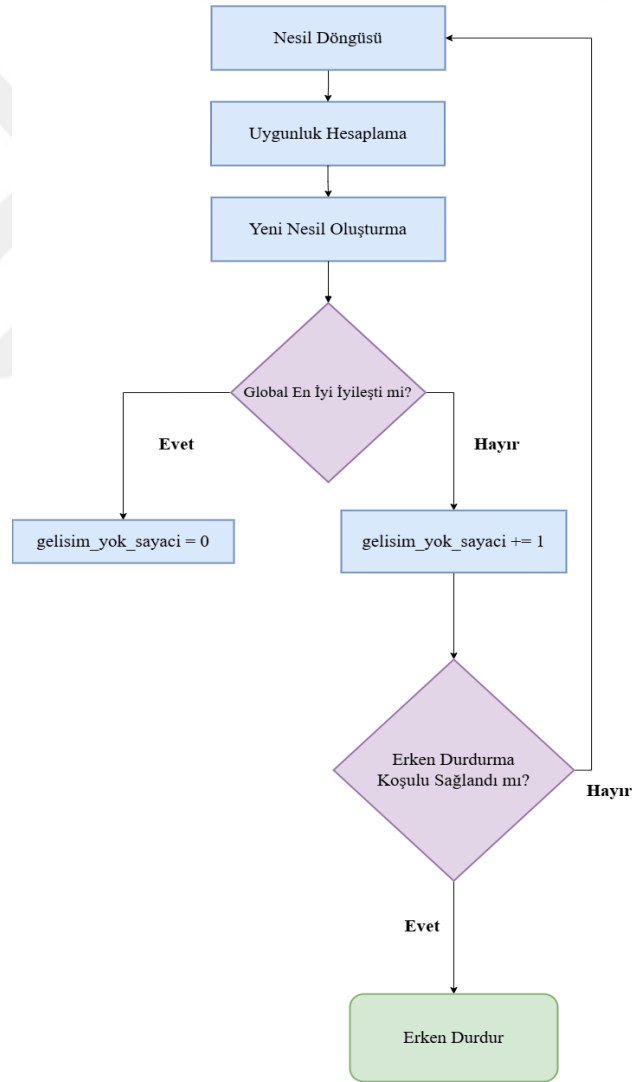


Şekil 3.2.8. Mutasyon İşlemi Akış Diyagramı

Durma kriteri ve tekrarlama; algoritma, belirli bir durma kriteri karşılanana kadar 2. adımdan (Uygunluk Değerlendirmesi) itibaren tekrarlanır [58]. Kullanılan durma kriterlerinden biri, global en iyi skorun belirli sayıda yineleme boyunca değişmemesi olabilir.

Bu tezin deneysel çalışması için oluşturulan kod yapısında durma kriteri $EARLY_STOP=100$; değeri ile gösterilmiştir. Diğer yaygın kriterler arasında maksimum nesil sayısına (*generations*) ulaşılması veya belirli bir uygunluk eşiğinin aşılması bulunur. Eğer durma kriteri karşılanmamışsa, yeni popülasyon bir sonraki nesil olarak kabul edilir ve döngü devam eder.

Bu döngü sayesinde popülasyon zamanla evrimleşir ve müzikal kriterlere göre daha uygun (daha yüksek uygunluk değerine sahip) melodiler baskın hale gelir. Sürecin sonunda, elde edilen en iyi birey (en yüksek uygunluk değerine sahip melodi), optimize edilmiş çözüm olarak kabul edilir. Durma kriteri ve tekrarlama yapısı akış diyagramı yapısı Şekil 3.2.9 'da gösterilmiştir.



Şekil 3.2.9. Durma Kriteri ve Tekrarlama Akış Diyagramı

3.2.3. Kullanılan Parametreler ve Değer Aralıkları

GA performansı ve davranışı, bir dizi parametrenin ayarlanmasına bağlıdır [1]. Bu tezde incelenen ve kullanılan temel parametreler Tablo 3.2.1 'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2.3. Genetik Algoritma Parametreleri

Parametre	Açıklama	Örnek Değer
<i>POPULATION_SIZE</i>	Her nesildeki birey sayısı (kromozom adedi)	100, 200, 300
<i>TOURNAMENT_SIZE</i>	Seçimde turnuva boyutu (kaç birey karşılaştırılacak)	3, 5
<i>GENERATIONS</i>	Algoritmanın çalışacağı maksimum nesil sayısı	1000
<i>MUTATION_RATE</i>	Her genin mutasyona uğrama olasılığı	0.1
<i>CROSSOVER_RATE</i>	Ebeveynlerin çaprazlanma olasılığı	0.9
<i>TONAL_SCALE</i>	Melodilerin bağlı kalacağı tonalite ölçeği (ör. C Majör)	[60, 62, 64, 65, 67, 69, 71]
<i>NGRAM_SIZE</i>	Motif benzerliği için kullanılan n-gram uzunluğu	3
<i>EARLY_STOP</i>	İyileşme olmadan durdurulacak yinleme sayısı	100

POPULATION_SIZE (Popülasyon Boyutu); her nesildeki kromozom (melodi) sayısıdır. Popülasyon boyutu, arama genişliğinin ne kadarının her nesilde örneklediğini belirler. Daha büyük bir popülasyon, genetik çeşitliliği daha iyi koruyabilir ve potansiyel olarak daha iyi veya daha çeşitli çözümler bulma olasılığını artırır, ancak her neslin hesaplama maliyetini ve süresini önemli ölçüde artırır [29]. Bu tez çalışması için belirlenen popülasyon boyutları 100, 200 ve 300 olarak alınmıştır. Popülasyon boyutu ne kadar küçükse hesaplama maliyeti de o kadar düşmektedir.

TOURNAMENT_SIZE (Turnuva Seçimi Boyutu); turnuva seçiminde, ebeveyn seçimi için rastgele seçilen birey sayısıdır. Turnuva boyutu, seçim basıncını belirler. Daha büyük bir turnuva boyutu (örneğin 5), daha yüksek uygunluğa sahip bireylerin seçilme olasılığını artırarak daha elitist bir seçim yaratır. Bu, algoritmanın yakınsamasını hızlandırabilir, ancak popülasyondaki çeşitliliği hızla azaltarak erken veya yerel optimum çözümlere yakınsama riskini artırabilir. Daha küçük bir turnuva

boyutu (örneğin 3), daha az seçim baskısı uygular. Bu, çeşitliliğin daha uzun süre korunmasına yardımcı olabilir, ancak yakınsamanın daha yavaş olmasına neden olabilir. Bu tez çalışması için belirlenen turnuva seçimi boyutları 3 ve 5 olarak alınmıştır.

GENERATIONS (Nesil Sayısı); algoritmanın çalıştırılacağı maksimum nesil sayısıdır. Algoritma genellikle bu sayıya ulaşıldığında veya başka bir durma kriteri (örneğin, uygunluğun iyileşmemesi) karşılandığında durur. Daha yüksek nesil sayıları, algoritmanın arama genişliğinin daha fazla keşfetmesine ve potansiyel olarak daha iyi çözümler bulmasına olanak tanır. Bu tez çalışmasında da nesil sayısı 1000 olarak ele alınmıştır.

MUTATION_RATE (Mutasyon Oranı); popülasyondaki her bir genin mutasyona uğrama olasılığıdır. Genellikle küçük bir değerdir (örneğin %1-%5). Yüksek mutasyon oranı çeşitliliği artırır ancak iyi çözümlerin yapısını bozabilir. Düşük mutasyon oranı yakınsamayı hızlandırabilir ancak yerel optimumlara sıkışma riskini artırır. Bu tez çalışmasında mutasyon oranı 0,1 değerinde sabit tutulmuştur.

TONAL_SCALE (Tonalite Ölçeği); üretilen melodinin hangi müzik ölçeğine (örneğin, C Majör) uyumlu olması gerektiğini belirler. Uygunluk fonksiyonu, melodinin bu ölçekteki notalara ne kadar uyduğunu değerlendirir. Örneğin C Major notasının tonalite ölçeğine karşılık gelen değerlerin gösterimi: C Major: [60, 62, 64, 65, 67, 69, 71] (do, re, mi, fa, sol, la, si)

NGRAM_SIZE (N-gram Boyutu): Motif tekrarı kriterinde, benzerlik aranacak nota grubunun uzunluğunu belirler. Örneğin, *NGRAM_SIZE*=2, ikişerli nota gruplarının tekrarını teşvik eder. Bu tez çalışmasında n-gram boyutu 3 değerinde sabit tutulmuştur.

Crossover Rate (Çaprazlama Oranı): Ebeveynlerin çaprazlamaya uğrama olasılığıdır. Genellikle yüksek bir değerdir (örneğin, %70-%90).

Bu tezde, popülasyon boyutları (100, 200, 300) ve turnuva seçimi boyutları (3, 5) temel bağımsız değişkenler olarak kullanılarak, bu farklı kombinasyonların (3x2 = 6 farklı kombinasyon) GA'nın performansı ve üretilen melodilerin müzikal nitelikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Diğer parametreler (Nesil Sayısı, Mutasyon Oranı, Tonalite vb.) deneyler boyunca sabit tutulmuştur. Her parametre kombinasyonu için birden fazla deney (run) yapılarak sonuçların istatistiksel güvenilirliği sağlanmıştır.

3.3. Melodi Değerlendirme Yöntemleri

GA'da, iyi çözümleri belirlemek ve arama sürecini yönlendirmek için uygunluk fonksiyonları kullanılır [9]. Müzik gibi sübjektif alanlarda objektif bir uygunluk fonksiyonu tasarlamak zorludur [59]. Bu tezde, algoritmik olarak ölçülebilen uyum ve yenilik ölçütleri göz önünde bulundurulmuştur.

3.3.1. Uyum ve Yenilik Ölçütleri

Bu tezin temel melodi değerlendirme yöntemi, kural tabanlı bir uygunluk fonksiyonudur. Çalışmada kullanılan uygunluk fonksiyonları notaların matematiksel gösterimini ve kriterlerini detaylandırmaktadır. Bu fonksiyonlar, bir melodinin müzikal olarak ne kadar "uygun" olduğunu değerlendiren birden çok bileşenin ağırlıklı toplamı olarak hesaplanır. Her bir kriter, melodinin bir özelliğini (tonalite, aralıklar, ritim, vb.) değerlendirir ve belirli kurallara ne kadar uyulduğuna veya ne kadar çeşitlilik gösterdiğine bağlı olarak puan artırır veya düşürür. Uygunluk fonksiyonunun ana bileşenleri ve değerlendirme ölçütleri şunlardır:

Tonalite uyumu; melodinin belirlenen tonal ölçek (örneğin, C Majör) içindeki notalara ne kadar sadık kaldığını ölçer. Ölçek dışı notalar genellikle cezalandırılır. Sağlanan formül, bir notanın tonik (ana) ölçek içinde olup olmadığını kontrol eder. Tonalite uyumu uygunluk fonksiyonu eşitliği gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} scale_matches &= \sum_{i=1}^n \delta(p_i \bmod 12 \in \{s_j \bmod 12 \mid s_j \in scale\}) \\ score+ &= 2 \times scale_matches \end{aligned} \quad (1)$$

Aralık uyumu; melodideki ardışık notalar arasındaki melodik aralıkları (interval) değerlendirir. Genellikle büyük, sıçramalı aralıklar (örneğin, altılıdan büyük) cezalandırılırken, adım adım ilerleyen veya küçük aralıklar teşvik edilir. Bu, melodinin daha akıcı ve şarkı söylenebilir olmasını sağlamayı amaçlar. Sağlanan formül, aralık büyüklüğüne göre farklı puanlar atar (örneğin, 0 aralık (tekrar) veya 1-2 aralık (adım) için pozitif puan). Aralık uyumu uygunluk fonksiyonu eşitliği aşağıda gösterilmiştir.

$$score+ = \begin{cases} 1, & \text{if } interval_i = 0 \\ 2, & \text{if } 1 \leq interval_i \leq 2 \\ 1, & \text{if } 3 \leq interval_i \leq 5 \\ -2, & \text{if } interval_i > 5 \end{cases} \quad \text{for } i = 2 \text{ to } n \quad (2)$$

Motif tekrarı (n-gram); melodide benzer kısa nota gruplarının (motiflerin veya n-gramların) tekrar edip etmediğini kontrol eder. Belirlenen NGRAM_SIZE'a sahip motiflerin (örneğin 2'li veya 3'lü) tekrarlanması olumlu puan getirir. Bu, melodinin yapısal tutarlılığını ve akılda kalıcılığını artırmayı amaçlar. Sağlanan formül, belirli bir motifin popülasyondaki tekrar sayısına göre puan hesaplar. Motif tekrarı uygunluk fonksiyonu eşitliği aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} motif_k &= (p_k, p_{k+1}, \dots, p_{k+n-1}) \\ repeated_motifs &= \sum_{motif \in motif_set} \delta(\text{count}(\text{motif}) > 1) \\ score+ &= 3 \times repeated_motifs \end{aligned} \quad (3)$$

Ritimsel çeşitlilik; melodide kullanılan nota sürelerinin (duration) çeşitliliğini değerlendirir. Sadece aynı uzunlukta notalardan oluşan monoton ritimler yerine, farklı sürelerle sahip notaların kullanılması teşvik edilir. Bu, melodinin daha ilginç ve canlı olmasını sağlamayı amaçlar. Sağlanan eşitlik, melodideki benzersiz nota sürelerinin sayısına dayanır. Ritimsel çeşitlilik uygunluk fonksiyonu eşitliği aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} D &= \{d_1, d_2, \dots, d_n\} \\ U &= \text{benzersiz}(D) \\ score+ &= 1.5 \times |U| \end{aligned} \quad (4)$$

Yön dengelemesi; melodinin genel perde hareketinin (yukarı çıkan veya aşağı inen notaların) dengeli olup olmadığını kontrol eder. Sadece sürekli yükselen veya sürekli alçalan melodiler yerine, iniş ve çıkışların dengeli olduğu yapılar teşvik edilir. Bu, melodinin daha dengeli ve doğal akmasını sağlamayı amaçlar. Sağlanan eşitlik, yukarı ve aşağı doğru adım sayılarının farkına dayanır. Yön dengelemesi uygunluk fonksiyonu eşitliği aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
up &= \sum_{i=2}^n \delta(p_i > p_{i-1}), \quad down = \sum_{i=2}^n \delta(p_i < p_{i-1}) \\
direction_balance &= 1 - \frac{|up - down|}{\max(1, n-1)} \\
score+ &= 4 \times direction_balance
\end{aligned} \tag{5}$$

Kadans benzeri bitiş; melodinin sonunun, belirlenen tonaliteye uygun (örneğin, tonik nota veya güçlü bir nota ile bitmesi) olup olmadığını değerlendirir. Müzikte sonun tutarlı ve çözümlenmiş duyulması önemlidir. Sağlanan eşitlik, melodinin son notasının tonik ölçekteki ilk (ana) nota olup olmadığını kontrol eder ve buna göre puan verir. Kadans benzeri bitiş uygunluk fonksiyonu eşitliği aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
up &= \sum_{i=2}^n \delta(p_i > p_{i-1}), \quad down = \sum_{i=2}^n \delta(p_i < p_{i-1}) \\
direction_balance &= 1 - \frac{|up - down|}{\max(1, n-1)} \\
score+ &= 4 \times direction_balance
\end{aligned} \tag{6}$$

Ritim ve ton uyumu kombinasyonu; notanın süresi ile perde aralığı arasındaki ilişkiyi değerlendirir. Genellikle kısa süreli notalar için küçük melodik adımlar, uzun süreli notalar için daha büyük sıçramalar müzikal olarak daha doğal kabul edilir. Sağlanan eşitlik, nota süresi ve aralık büyüklüğünün belirli kombinasyonlarına göre puan atar. Ritim ve ton uyumu kombinasyonu uygunluk fonksiyonu eşitliği aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
interval_i &= |p_i - p_{i-1}|, \quad d_i = \text{süre}_i \\
score+ &= \begin{cases} -3, & \text{if } d_i \leq 0.5 \wedge interval_i > 5 \\ +2, & \text{if } d_i \geq 1.0 \wedge interval_i \geq 5 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}
\end{aligned} \tag{7}$$

Her bir kromozomun toplam uygunluk değeri, bu yedi bileşenin hesaplanan puanlarının veya cezalarının belirli ağırlıklarla toplanmasıyla elde edilir. Ağırlıklar, hangi müzikal özelliğin daha fazla vurgulanması gerektiğini belirlemek için ayarlanabilir. Bu uygunluk fonksiyonu, GA'nın arama genişliğinde rastgele yürümesini engelleyerek, tanımlanan müzikal kurallara uyan ve bu kurallara göre optimize edilmiş melodiler bulmasını sağlar [60].

Yenilik ise, bu uygunluk fonksiyonunun doğrudan bir bileşeni olmasa da GA sürecinin doğal bir çıktısıdır. Rasgele başlangıç popülasyonu ve mutasyon operatörü, arama genişliğinin farklı bölgelerinin keşfedilmesine olanak tanır. Çaprazlama, mevcut en iyi parçaların yeni kombinasyonlarını yaratır. Bu mekanizmalar, algoritmik olarak oluşturulan müziğin veri tabanındaki örneklerle benzetmekle sınırlı kalmayıp, yeni melodiler üretme potansiyeline sahip olmasını sağlar [61]. Motif tekrarı kriteri, bir dereceye kadar yapısal tutarlılığı teşvik ederken, ritim çeşitliliği ve aralık/yön dengesi gibi kriterler monotonluğu önleyerek çeşitliliğe dolaylı olarak katkıda bulunur.

3.3.2. İnsan Değerlendirmesi ve Yarı Otomatik Yöntemler

Algoritmik olarak üretilen müziğin kalitesini değerlendirmek, sadece algoritmik uygunluk değerine dayanmakla sınırlı kalmamalıdır. Müzik algısı ve estetiği oldukça sübjektif olduğu için, insan dinleyicilerin değerlendirmeleri de büyük önem taşır. Bu tez kapsamında, üretilen melodilerin müzikal niteliklerinin tam olarak anlaşılması için ek değerlendirme yöntemleri aşağıda verilmiştir:

- Subjektif insan değerlendirmesi; uzman müzisyenler veya genel dinleyicilerden oluşan bir panelin, farklı parametre setleriyle üretilen melodileri dinleyerek puanlaması veya yorumlamasıdır. Bu değerlendirme, uygunluk fonksiyonunun doğrudan ölçemediği hoş gitme, yaratıcılık, duygusal ifade gibi nitelikler hakkında değerli bilgiler sağlayabilir. Ancak bu yöntem zaman alıcıdır ve değerlendiricinin sübjektifliğinden etkilenir [9].
- Müzikal analiz; üretilen melodilerin müzik teorisi perspektifinden analizi. Örneğin, kullanılan notaların istatistiksel dağılımı, melodik konturların karmaşıklığı, ritimsel desenlerin çeşitliliği, motiflerin gelişimi gibi özellikler incelenebilir. Bu analizler, farklı parametre setlerinin melodilerin yapısal özelliklerini nasıl etkilediğini daha objektif bir şekilde anlamaya yardımcı olur.
- Yarı otomatik yöntemler; insan değerlendirmesi ile algoritmik analizi birleştiren yaklaşımlar. Örneğin, belirli müzikal özelliklere (örneğin, tonal merkezden uzaklaşma, sıra dışı ritim kalıpları) göre ilginçlik veya yenilik değerlerini hesaplayan otomatik analiz araçları geliştirilebilir ve bunlar insan dinleyicilerin genel değerlendirmeleriyle karşılaştırılabilir. Çalışmalardan biri,

insan puanlarını tahmin etmek için eğitilmiş yapay sinir ağlarını (Bi-LSTM) kullanarak insan değerlendirmesini otomatikleştirmeyi önermiştir [23]. Bu, canlı (insan) ve cansız (algoritmik/yapay) değerlendiricilerin bir kombinasyonunu kullanma fikrine dayanır.



4. UYGULAMA VE BULGULAR

Bu bölümde, GA sisteminin uygulama detayları, farklı parametre setleri altında gerçekleştirilen deneysel çalışma tasarımı ve bu deneylerden elde edilen bulgular sunulmaktadır. Teze ait deneysel çalışma Python programlama diliyle geliştirilen GeneticMelody.py ana modülü aracılığıyla yürütülmüştür. Tezin deneysel çalışması, belirlenen parametre kombinasyonlarına göre rastgele başlatılan başlangıç popülasyonları üzerinden yürütülmüştür.

GA ile elde edilen sonuçların görselleştirilmesi ve dinlenilebilir bir formata dönüştürülmesi için aşağıdaki açık kaynaklı yazılımlardan yararlanılmıştır:

- **MuseScore**, müzik notasyonu oluşturmak ve düzenlemek amacıyla geliştirilen açık kaynaklı bir müzik yazılımıdır. Kullanıcılara MIDI veya MusicXML formatındaki verileri görsel olarak nota biçiminde sunma imkânı sağlar. Bu tez çalışmasında, GA ile üretilen melodilerin görsel analizini gerçekleştirmek ve müzikal yapılarını doğrulamak için MuseScore aracı kullanılmıştır. Üretilen melodiler, MusicXML formatına dönüştürülerek bu yazılım aracılığıyla notaya aktarılmış ve biçimsel kontrol sağlanmıştır.
- **TiMidity++**, MIDI dosyalarını çalabilen ve bunları ses dalgalarına (WAV, MP3 vb.) dönüştürebilen bir açık kaynaklı yazılımdır. Bu tez çalışmasında, GA tarafından oluşturulan melodilerin sesli olarak değerlendirilmesi ve analiz edilmesi amacıyla TiMidity++ kullanılmıştır. Böylece metinsel ya da görsel çıktıların ötesinde, müzikal çıktılar işitsel olarak da test edilmiştir. Yazılımın MIDI desteği, MusicXML'den dönüştürülen içeriklerin gerçek zamanlı çalınmasına olanak tanımıştır.

4.1. Tezin Deneysel Çalışma Tasarımı

Tezin deneysel çalışması, GA ile melodi üretimi ve optimizasyonu için tasarlanan sistem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistem, Python programlama dilinde Visual Studio 2022 platformunda geliştirilmiştir. Deneysel çalışmanın temel amacı, farklı popülasyon boyutları ve turnuva seçimi boyutlarının algoritmanın

performansını ve üretilen melodilerin özelliklerini nasıl etkilediğini ampirik olarak incelemektir.

Deneysel tasarım aşağıdaki adımları içermiştir:

Parametre setlerinin belirlenmesi; tezin odak noktası olan popülasyon boyutu ve turnuva seçimi boyutu için aşağıdaki değerler belirlenmiştir:

- Popülasyon Boyutları: 100, 200, 300
- Turnuva Seçimi Boyutları: 3, 5

Bu iki değişkenin her kombinasyonu ($3 \times 2 = 6$ farklı kombinasyon) ayrı bir deney grubu oluşturmuştur:

- Grup 1: Popülasyon = 100, Turnuva Boyutu = 3
- Grup 2: Popülasyon = 200, Turnuva Boyutu = 3
- Grup 3: Popülasyon = 300, Turnuva Boyutu = 3
- Grup 4: Popülasyon = 100, Turnuva Boyutu = 5
- Grup 5: Popülasyon = 200, Turnuva Boyutu = 5
- Grup 6: Popülasyon = 300, Turnuva Boyutu = 5

Diğer parametrelerin sabit tutulması; deneysel çalışmanın odağındaki parametrelerin etkisini net bir şekilde görebilmek için, diğer GA parametreleri (Nesil Sayısı, Mutasyon Oranı, Tonalite, N-gram Boyutu vb.) tüm deney grupları için sabit tutulmuştur. Örneğin, Mutasyon Oranı 0.1, N-gram boyutu 3, nesil sayısı 1000, Tonalite ise (60, 62, 64, 65, 67, 69, 71) olarak ayarlanmıştır. Nesil sayısı, algoritmanın durma kriterine ulaşmasına yani 1000 sayısına ulaşmasına kadar çalıştırılmıştır. Tonalite olarak C Majör gibi yaygın bir ölçek seçilmiştir. Deneysel çalışmanın parametre ayarları yapılandırma modülünde olup sözde kod yapısı aşağıdaki gibi hazırlanmıştır.

Yapılandırma Modülü (config.py) Sözde Kod Yapısı
<pre>// Genetik Algoritma (GA) Parametreleri POPULASYON_BOYUTU ← 100 JENERASYON_SAYISI ← 1000 TURNUVA_BOYUTU ← 3 MUTASYON_ORANI ← 0.1 // Eğer ardışık 100 nesil boyunca daha iyi birey bulunamazsa algoritma durdurulur ERKEN_DURDURMA_EŞİĞİ ← 100 // Melodi Üretimi Parametreleri MELODI_UZUNLUGU ← 60</pre>

```
PERDE_ARALIĞI ← [60, 72] // C4 (Orta Do) ile C5 arası
SÜRE_DEĞERLERİ ← [1/8, 1/4, 1/2, 1.0] // Nota süreleri

// Tonalite (C Majör Dizisi)
TONAL_DIZI ← [60, 62, 64, 65, 67, 69, 71]

// Motif Analizi için N-Gram Uzunluğu
N_GRAM_UZUNLUĞU ← 3

// MIDI Çalma ve Görselleştirme Ayarları
MIDI_OYNATICI_YOLU ← "C:\TiMidity\timidity.exe" // MIDI dosyalarını ses
dosyalarına (örneğin WAV) dönüştürmek için kullanılan açık kaynaklı bir yazılım
ve ses sentezleyici program
MUESCORE_YOLU ← "C:\Program Files\MuseScore 4\bin\MuseScore4.exe" //
müzik notasyonu oluşturmak, düzenlemek ve paylaşmak için kullanılan ücretsiz ve
açık kaynaklı bir nota yazılımı
ÇALINACAK_ENSTRÜMAN ← "Violin" & "Akustik Piyano"
```

Deneylerin yürütülmesi; her bir parametre kombinasyonu için, elde edilen sonuçların rastgelelikten etkilenmesini azaltmak ve istatistiksel olarak anlamlı bulgular elde etmek amacıyla birden fazla bağımsız deney (run) yürütülmüştür (örneğin, her grup için 10 veya daha fazla run). Her deney, rastgele bir başlangıç popülasyonu ile başlamıştır.

Veri kaydı; her deney run'ı boyunca, algoritmanın performansı ile ilgili aşağıdaki veriler kaydedilmiştir:

- Nesil başına en iyi uygunluk değeri.
- Nesil başına ortalama uygunluk değeri.
- Algoritmanın durma kriterine ulaşması için geçen nesil sayısı (yakınsama hızı).
- Deneyin tamamlanma süresi (hesaplama maliyeti).
- Deney sonunda elde edilen en iyi birey (en iyi melodi kromozomu).

Çıktıların kaydedilmesi; her deney grubu için, elde edilen en iyi melodiler MIDI formatında ve nota formatında (pdf gibi) kaydedilmiştir.

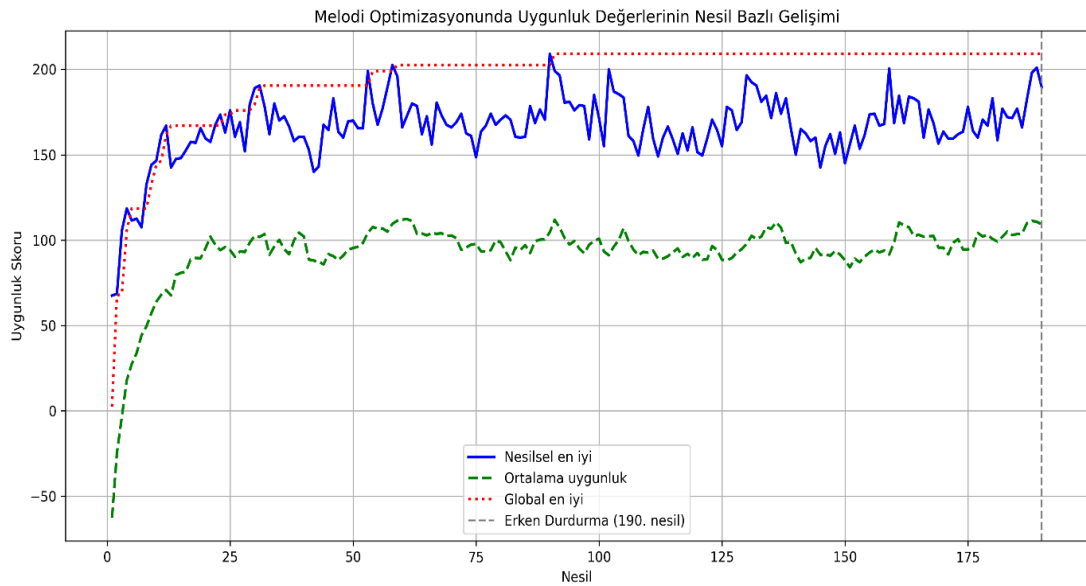
Bu deneysel tasarım, popülasyon boyutu ve turnuva seçimi boyutunun, GA'nın arama süreci (yakınsama davranışı, hız) ve elde edilen sonuçların kalitesi (en iyi uygunluk değeri, üretilen melodilerin müzikal özellikleri) üzerindeki etkilerini sistematik olarak araştırmayı sağlamıştır.

4.2. Parametre Deneyleri ve Sonuçları

Bu bölümde, GA sisteminin farklı popülasyon ve turnuva boyutlarıyla çalıştırılması sonucunda elde edilen deneysel veriler ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir.

Deneysel gruplar, altı farklı konfigürasyon içermektedir: Popülasyon boyutları 100, 200, 300 ve her biri için turnuva seçim boyutları 3, 5. Bu tez çalışmasında mutasyon oranı, çaprazlama türü ve melodi uzunluğu gibi tüm parametreler sabit tutulmuş; yalnızca popülasyon boyutu ve turnuva büyüklüğü değiştirilerek altı farklı deney grubu oluşturulmuştur. Her konfigürasyonda nesil başına en iyi uygunluk değerinin zamanla nasıl değiştiği görselleştirilmiş ve kayıt altına alınmıştır.

Deneysel çalışma tasarımında bahsedilen 1.Grupta 100 popülasyon ve 3 turnuva sayısı ile çalıştırılan uygulamanın uygunluk değeri Şekil 4.2.1. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2.1. 100 Popülasyon ve 3 Turnuva Sayılı Uygunluk Değeri Grafiği

Şekil 4.2.1. 'de deneysel çalışmanın evrimsel performansını üç temel metrik üzerinden göstermektedir; nesilsel en iyi uygunluk değeri, popülasyon ortalaması ve global en iyi uygunluk değeri. İlk nesillerde gözlemlenen hızlı artış, algoritmanın başlangıç aşamasında etkili çözüm keşfi gerçekleştirdiğini göstermektedir. Yaklaşık 30. nesilden sonra ortalama uygunluk değerlerinde görülen durağanlaşma, popülasyon çeşitliliğinin azalması ve evrimsel sürecin yavaşlaması olarak yorumlanmaktadır.

Nesilsel en iyi değerlerdeki periyodik sıçramalar, mutasyon ve çaprazlama oranı operatörlerinin yüksek kaliteli çözümler üretmedeki etkinliğini ortaya

koymaktadır. Global en iyi değer 210 civarında sabitlenmiş olup, algoritmanın optimal çözümü belirli bir nesilde tespit ettiğini ve sonraki nesillerde bu performansın aşılamadığını göstermektedir.

190. nesilde uygulanan erken durdurma kriteri, global uygunluk değerinde anlamlı gelişme gözlenmemesi kriterine dayalı olarak devreye girmiş ve hesaplama verimliliğini artırmıştır. Bulgular, önerilen uygunluk fonksiyonu ve parametre konfigürasyonunun melodi üretiminde etkili olduğunu ve algoritmanın hedeflenen performans düzeyine makul optimizasyon sürede ulaştığını göstermektedir.



Şekil 4.2.2. 1. Grup Optimal Melodi Çıktısı

En iyi melodi dosyaları MuseScore kullanılarak notaya dökülmüş ve çıktılar üretilmiştir. Şekil 4.2.2.'deki gibi bu müzikal gösterim, genetik algoritmanın evrimsel sürecinin sonunda elde edilen optimal melodi kromozomunu temsil etmektedir. Bu melodi, uygunluk fonksiyonu kapsamında en yüksek uygunluk değerine sahip birey olarak tespit edilmiştir. Çıktının tonal ve ritmik analizi, belirli müzikal özelliklerin başarıyla optimize edildiğini göstermektedir.

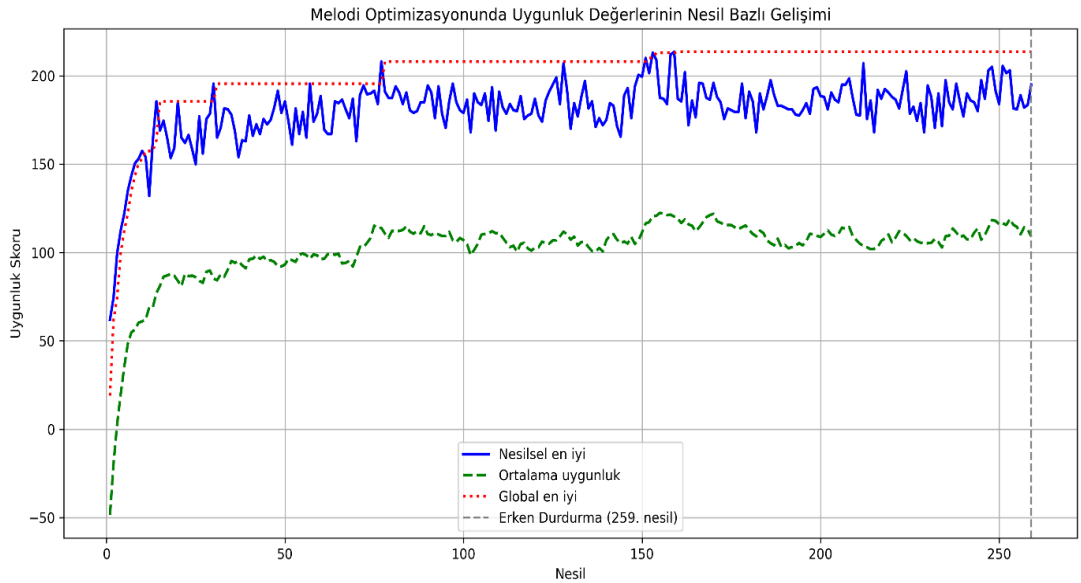
Melodinin ritmik yapısı, dörtlük ve sekizlik nota kombinasyonlarından oluşmakta olup, ritmik çeşitliliğin sağlandığını ve monotonluğun önlendiğini göstermektedir. Perde dağılımı analizi, melodinin orta oktav civarında (G4, A4, B4, D4) yoğunlaştığını ve tonal merkez etrafında dengeli bir seyir izlediğini ortaya

koymaktadır. F#4, C#4 ve G#4 gibi diyezli notaların varlığı melodik çeşitliliği artırmakta ve geçici modülasyon etkisi yaratmaktadır. Melodinin konturlu yapısı, müzikal akışkanlık sağlayan inişli-çıkışlı bir melodik hat oluşturmaktadır.

Melodinin sonlarındaki C5 gibi yüksek perdeler dinamik zirve etkisi oluşturarak müzikal gerilimi artırmakta ve yapının dramatik etkisini pekiştirmektedir. Bu durum, genetik algoritmanın hem yerel geçişler hem de global form açısından dengeli çözümler üretme kapasitesini göstermektedir.

Ritimsel çeşitlilik açısından, nota sürelerindeki varyasyon algoritmanın dinamik bir yapı sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, kullanılan uygunluk fonksiyonunun melodik uygunluğun yanı sıra ritmik estetiği de optimize ettiğini göstermektedir. Sonuç olarak, elde edilen melodi örneği GA'nın müzikal açıdan anlamlı, estetik ve teknik olarak dengeli sonuçlar üretebildiğini ve algoritmik besteleme uygulamaları açısından kullanılabilirliğini desteklemektedir.

2. Grupta 200 bireyli popülasyon ve 3 turnuva sayısı ile oluşan uygunluk değeri grafiği Şekil 4.2.3. 'te gösterilmiştir.



Şekil 4.2.3. 200 Popülasyon ve 3 Turnuva Sayılı Uygunluk Değeri Grafiği

Şekil 4.2.3'te yer alan grafik, 200 bireyli popülasyon ve 3 turnuva sayılı parametreler ile yürütülen deneysel çalışmanın nesil bazlı uygunluk gelişimini göstermektedir. İlk grafikte kullanılan 100 bireyli yapı ile kıyaslandığında, bu konfigürasyon daha yüksek ortalama uygunluk değerlerine ve daha kararlı bir optimizasyon sürecine ulaşmıştır.

Her iki senaryoda da global en iyi uygunluk değeri benzer şekilde 210 civarına ulaşsa da, 200 bireyli yapı sayesinde bu seviyeye daha az dalgalanma ve daha yüksek ortalama değerler eşliğinde ulaşılmıştır. Özellikle 1. Gruba ait grafikte gözlenen dalgalı eğilim, 200 bireyli yapıda daha istikrarlı bir çözüme dönüşmüştür. Ayrıca, ortalama uygunluk çizgisinin daha yüksek ve kararlı seyretmesi, geniş popülasyonun çeşitliliği koruyarak elit çözümler üretme kapasitesini artırdığını göstermektedir.

Erken durdurma kriteri 200 bireyli yapıda 259. nesilde devreye girerken, önceki yapı 190. nesilde sonlanmıştır. Bu da daha büyük popülasyonun daha uzun ama verimli bir optimizasyon süreci sunduğunu ve çözüm kalitesine olumlu katkı sağladığını göstermektedir.

Şekil 4.2.4. 2. Grup Optimal Melodi Çıktısı

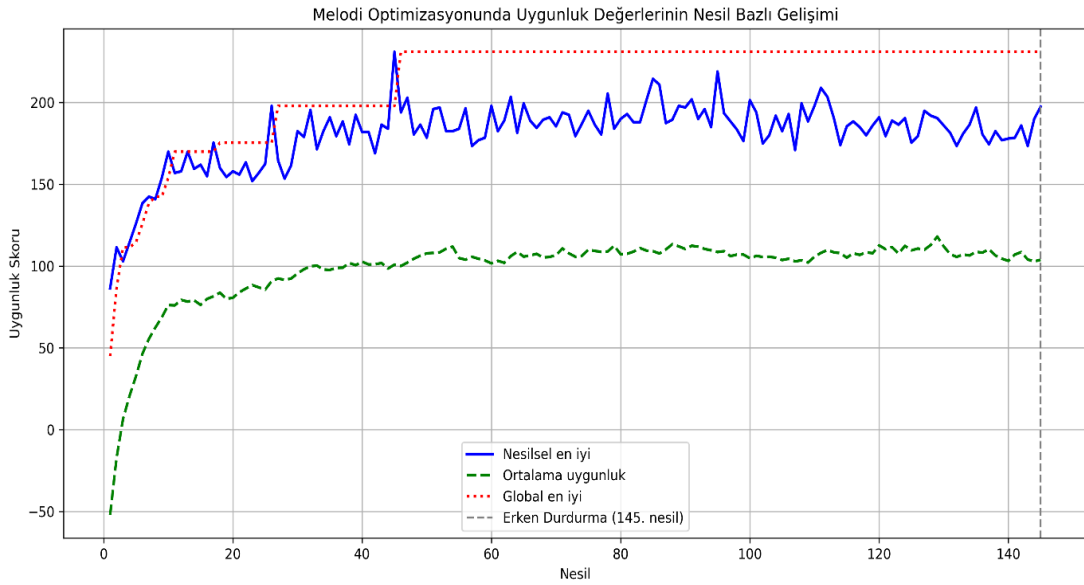
2. Grup konfigürasyonu ile elde edilen melodi, önceki 100 bireyli yapıdan farklı olarak daha geniş bir ses aralığı ve karmaşık melodik geçişler içermektedir. Melodi, C4 ile C5 aralığında daha sık modülasyonlar yaparken, kromatik geçişlerin ve yarım seslik hareketlerin yoğunlaştığı dikkat çekmektedir (örneğin G#4 – A4 – Bb4 sıralamaları). Bu, melodik çeşitliliğin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Ritmik açıdan bakıldığında, 200 bireyli yapıdan üretilen melodi, ritmik olarak daha dengeli ve saf bir yapı sergilemiştir. Sekizlik ve dörtlük notaların düzenli dağılımı, motiflerin daha müzikal ve yapılandırılmış olmasını sağlamıştır. Buna

karşılık, 100 bireyli yapıdaki melodi daha kısa motiflerden oluşmakta ve bazı bölümlerde tekrar eden yapılarla sınırlı bir çeşitlilik sunmaktadır.

Genel olarak, 200 bireyli yapı ile üretilen melodi harmonik açıdan daha zengin, kontur bakımından daha dinamik ve form açısından daha olgun bir yapıya sahiptir. Bu da daha büyük popülasyonun, evrimsel süreçte daha kaliteli bireyler üretme potansiyelini desteklemektedir.

3. Grupta 300 popülasyon ve 3 turnuva sayısı ile oluşan uygunluk değeri grafiği şekil 4.2.5.' te gösterilmiştir.



Şekil 4.2.5. 300 Popülasyon 3 Turnuva Sayılı Uygunluk Değeri Grafiği

Şekil 4.2.5'te, 300 bireyli popülasyon ve 3 turnuva sayılı sayılı parametreler ile yürütülen deneysel çalışmanın nesil bazlı gelişimini göstermektedir. Bu konfigürasyon geniş arama kapasitesi sunmasına rağmen, önceki parametrelerle karşılaştırıldığında erken yakınsama eğilimi sergilemektedir.

İlk 20-30 nesilde hem nesilsel en iyi hem de ortalama uygunluk değerlerinde hızlı artış gözlenmiş, global en iyi birey yaklaşık 40. nesilde tespit edilmiş ve 145. nesilde erken durdurma mekanizması devreye girmiştir. Bu durum, önceki deneylere kıyasla daha kısa süreli ancak hızlı bir yakınsama sürecini göstermektedir.

300 bireyli yapı başlangıçta hızlı öğrenme göstermiş ancak erken doygunluğa ulaşarak optimum çözüm arayışında yetersiz kalmıştır. 145. nesilde gerçekleşen erken durdurma, büyük popülasyon boyutuna rağmen ilerleyen nesillerde yeterli çeşitliliğin sağlanamadığını ve mutasyon ile çaprazlama etkilerinin sınırlı kaldığını

göstermektedir. Sonuç olarak, 300 bireyli konfigürasyon kısa sürede yüksek kaliteli çözümler üretebilmesine rağmen ara nesillerdeki keşif kapasitesi sınırlı kalmış ve erken yakınsama riski ile karşılaşmıştır. Bu bulgular, popülasyon büyüklüğünün artmasının her zaman daha başarılı optimizasyon süreç sağlamayacağını ve parametreler arası denge gereksinimini vurgulamaktadır.

The image displays three staves of musical notation in 4/4 time, each with a key signature of one sharp (F#). The notes are written in a treble clef. Below each staff, the corresponding chords are listed in a simplified notation: G4E4F4, B4B-4, G#4E-4, F#4, G4F#4F4F4E-4B-4E4, E4 C#4 E4, A4B4A4, F#4 E4 for the first staff; F4, B-4G#4B4, D4A4C#4F4, G4, C5, B4, A4, A4, A4, F4, A4, G4, E-4F4, E-4, F4 for the second staff; and C#4, G4, G4, F#4C#4, E4, A4, G#4, E4, F#4, F4, E-4, B4, A4, F4, C5 for the third staff.

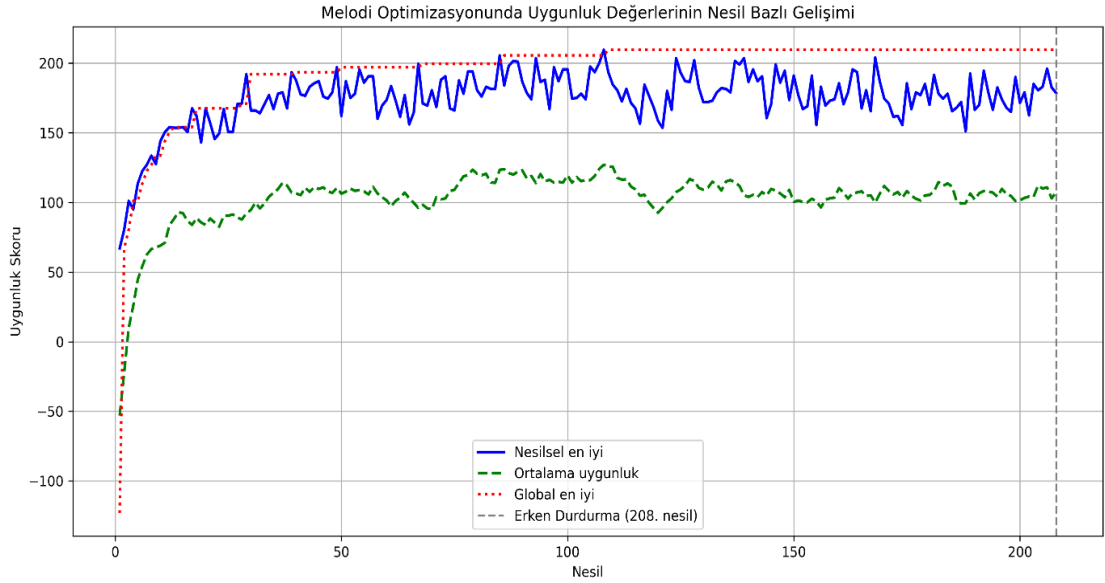
Şekil 4.2.6. 3. Grup Optimal Melodi Çıktısı

300 bireyli yapı ile elde edilen melodi Şekil 4.2.6 'da gösterildiği gibi olup, yapısal olarak tekrarlayan motiflik öğelere sahip, ritmik açıdan düzenli ve orta yoğunlukta melodik çeşitlilik içeren bir form sergilemiştir. Melodi çoğunlukla orta ve üst oktavlarda dolaşmakta olup (C5, B4, F#4 gibi), armonik olarak güvenli ve dengeli bir çizgi izlemektedir. Ancak melodik sıçramalar ve kromatik olmayan geçişlerin ağırlıklı olması, önceki 200 popülasyonlu yapıya kıyasla daha sınırlı çeşitlilik sunduğunu göstermektedir.

Farklı popülasyon boyutlarının karşılaştırmalı analizi, 100 bireyli yapının daha sade ve kısa motifler içerirken ritmik olarak daha az dengeli olduğunu ortaya koymaktadır. 200 bireyli yapı hem perde hem ritim açısından daha zengin ve yaratıcı bir yapı sunmuş, özellikle melodik kontur bakımından öne çıkmıştır. 300 bireyli yapı ise başlangıçta etkili sonuçlar üretmiş ancak kısa sürede yakınsama eğilimiyle melodik derinlik açısından daha yüzeysel kalmıştır.

Sonuç olarak, 300 bireyli yapı yapay olarak daha "güvenli" melodiler üretmiş, ancak 200 bireyli yapı kadar özgünlük ve çeşitlilik sunamamıştır. Bu durum, yalnızca popülasyon büyüklüğünün artırılmasının melodik yaratıcılığı garanti etmediğini ve optimal parametre dengesinin önemini göstermektedir.

4. Grupta 100 Popülasyon ve 5 turnuva boyutu ile oluşan uygunluk değeri grafiği Şekil 4.2.7. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2.7. 100 Popülasyon 5 Turnuva Sayılı Uygunluk Değeri Grafiği

Şekil 4.2.7 'de görüldüğü gibi, 100 popülasyon ve 5 turnuva boyutlu konfigürasyonda, algoritma 208. nesilde erken durdurulmuş; nesil en iyi bireyler 210 civarında global uygunluk değerine ulaşırken, ortalama uygunluk skoru da 100'ün üzerine çıkarak önceki 100 bireyli 3 turnuvalı yapıya göre daha yüksek bir başarı göstermiştir. Turnuva boyutunun artırılması, seçim baskısını güçlendirmiş ve bu sayede yüksek kaliteli bireylerin popülasyonda daha hızlı baskın hale gelmesini sağlamıştır.

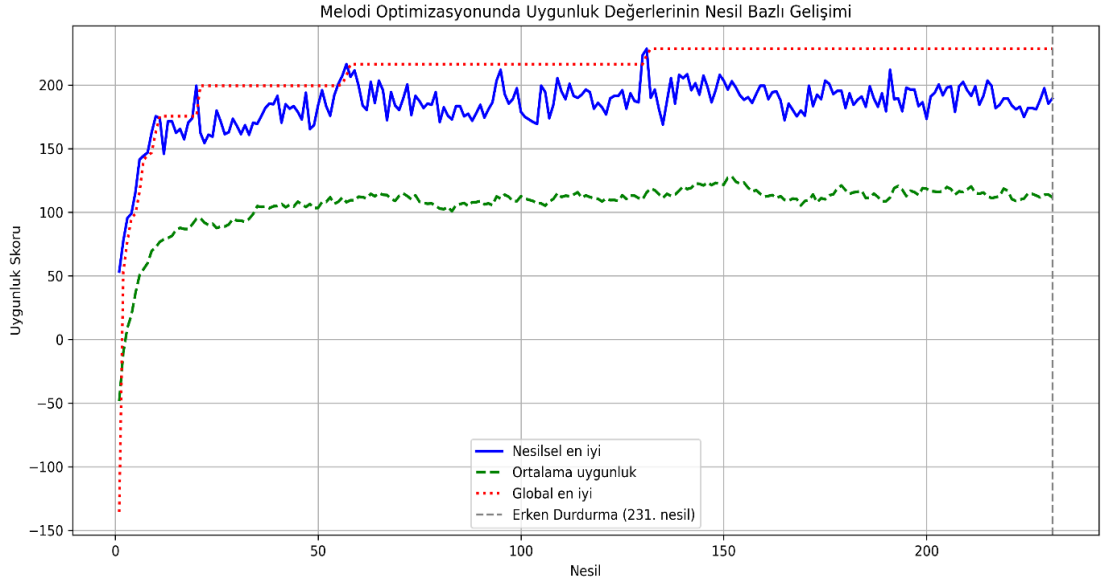


Şekil 4.2.8. 4. Grup Optimal Melodi Çıktısı

Şekil 4.2.8 'de yer alan 4. Grup optimal melodi çıktısı yorumlandığında; melodi, denge ile özgünlük arasında bir geçiş yapısı sergilemektedir. Melodi, genellikle orta perde aralığında (F4–C5) gezinmekte, diatonik yapıya bağlı kalırken zaman zaman G#4, Bb4, C#4 gibi seslerle renklendirilmiş modülasyonlar sunmaktadır. Bu durum, algoritmanın yüksek turnuva baskısına rağmen çeşitlilik üretebildiğini göstermektedir.

Ritmik yapı ise sekizlik ve dörtlük notaların homojen dağılımıyla ölçü bütünlüğünü koruyan, tekrara dayalı ama monoton olmayan bir akış sunmaktadır. Bu özellik, seçim baskısının aşırı standartlaşmaya yol açmadan dengeli çözümler üretebildiğini ortaya koymaktadır.

5. Grupta 200 Popülasyon ve 5 turnuva boyutu ile oluşan uygunluk değeri grafiği Şekil 4.2.9. 'da gösterilmiştir.



Şekil 4.2.9. 200 Popülasyon 5 Turnuva Sayılı Uygunluk Değeri Grafiği

Şekil 4.2.9 ‘da 200 bireyli popülasyon ve 5 bireyli turnuva sayısı ile konfigüre edilen deneysel çalışma, erken nesillerde yüksek kaliteli çözümlere hızlıca ulaşarak 188. nesilde erken durdurulmuştur. Hem nesil en iyi hem de ortalama uygunluk değerleri, önceki konfigürasyonlara kıyasla daha yüksek seviyelere ulaşmış ve daha düşük varyansla istikrarlı bir seyir izlemiştir. Bu durum, yüksek turnuva baskısının elit bireylerin hızlıca seçilmesini sağladığını ve genel çözüm kalitesini artırdığını göstermektedir.

Ancak bu yapı, güçlü seçim baskısı nedeniyle genetik çeşitliliği azaltmış, bu da keşif kapasitesini sınırlamıştır. 2. Gruptaki (200 bireyli popülasyon ve 3 turnuva sayılı) gibi daha uzun süren keşif süreci yerine, daha kısa süreli ve yoğunlaştırılmış bir optimizasyon süreci gerçekleşmiştir. Sonuçlar, popülasyon büyüklüğü ile seçim baskısı arasındaki dengenin hem çözüm kalitesi hem de yakınsama davranışı üzerinde belirleyici olduğunu göstermekle birlikte yüksek başarımla erken doygunluk arasında bir denge kurmanın önemini vurgulamaktadır.

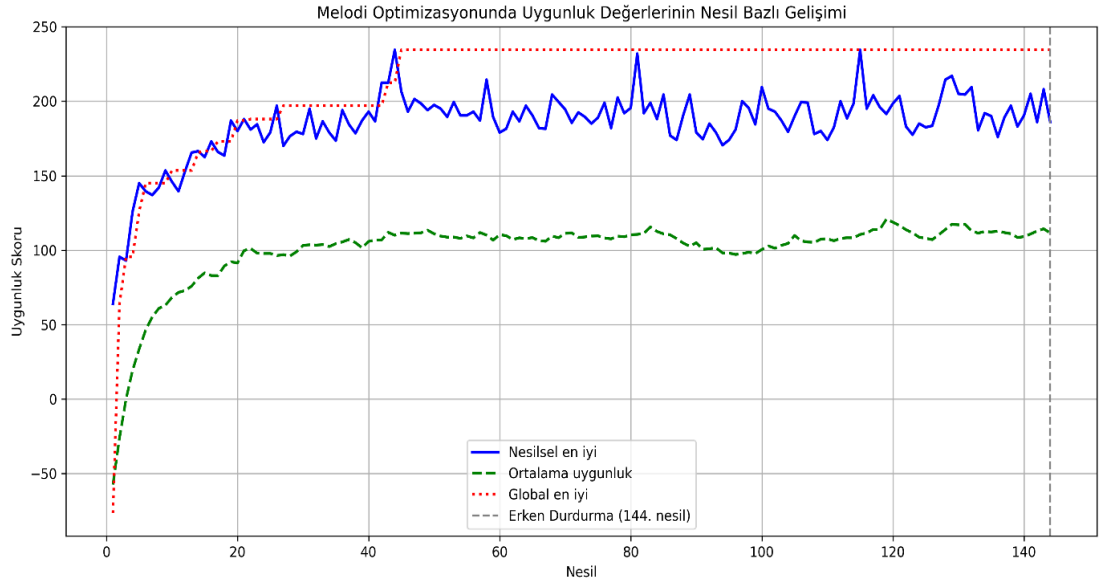


Şekil 4.2.10. 5. Grup Optimal Melodi Çıktısı

Şekil 4.2.10 ‘da görüldüğü gibi 200 bireyli popülasyon ve 5 turnuva sayılı konfigürasyonla üretilen melodi, perde aralığı ve tonal çeşitlilik bakımından oldukça dengeli bir yapı sergilemiştir. C4–C5 aralığında yayılan melodi; G#4, C#4 ve Bb4 gibi altere seslerle zenginleştirilmiş hem tonal hem de estetik açıdan gelişmiş bir form sunmuştur. Ritmik yapı ise sekizlik notaların ağırlıkta olduğu, ölçü bütünlüğü korunmuş bir düzen içerisinde ilerlemekte ve tekrar eden motiflerle tematik sürekliliği desteklemektedir. Bu yapı, yüksek seçilim baskısına rağmen yaratıcı varyasyonların korunabildiğini göstermektedir.

Diğer konfigürasyonlarla karşılaştırıldığında, bu melodi hem çeşitlilik hem de yapısal denge açısından öne çıkmaktadır. 100 bireyli deneysel çalışmaların aksine, burada yaratıcı geçişler ve uyumlu motifler bir arada sunulmuştur. 200–3 konfigürasyonu melodik özgünlük açısından benzer nitelikler taşısa da, bu yapı daha kısa sürede yüksek kalitede çözüme ulaşmıştır. Elde edilen sonuç, yüksek birey sayısı ile etkin seçilim stratejisinin birlikte kullanıldığında hem optimizasyon başarısı hem de müzikal anlamlılık bakımından dengeli sonuçlar üretebileceğini ortaya koymaktadır.

6. Grupta 300 Popülasyon ve 5 turnuva boyutu ile oluşan uygunluk değeri grafiği Şekil 4.2. 11 ‘de gösterilmiştir.



Şekil 4.2.11. 300 Popülasyon 5 Turnuva Sayılı Uygunluk Değeri Grafiği

Şekil 4.2.11’de 300 bireyli popülasyon ve 5 turnuva sayısı ile konfigüre edilen deneysel çalışma, yüksek birey sayısı ve güçlü seçim mekanizması sayesinde erken nesillerde hızlı bir başarı göstermiş, hem nesil en iyi hem de ortalama uygunluk değerlerinde yüksek skorlar elde edilmiştir. Ortalama uygunluk değeri 100 puanın üzerinde sabitlenmiş, global en iyi uygunluk ise yaklaşık 210 seviyesine ulaşmıştır. Ancak algoritma 144. nesilde erken durdurulmuş, bu da optimizasyonun çok kısa sürede doygunluğa ulaştığını göstermektedir. Grafik eğrilerindeki düşük varyans, elit bireylerin hızla sabitlendiğini ve yeni çözüm üretme olasılığının azaldığını ortaya koymaktadır.

Diğer konfigürasyonlarla karşılaştırıldığında, bu yapı en kısa sürede yüksek kaliteli çözüme ulaşmış, ancak keşif derinliği bakımından sınırlı kalmıştır. Özellikle 200 popülasyonlu yapılar daha uzun süreli arama ve daha fazla melodik çeşitlilik üretme potansiyeli taşıırken, bu yapı çözüm kalitesini öne çıkaran, ancak yenilik üretiminde daha dar kalan bir performans sergilemiştir. Bu sonuç, popülasyon büyüklüğü ile seçim yoğunluğu arasındaki dengeye dikkat edilmesi gerektiğini; yüksek başarıma ulaşmanın yanında yaratıcı çeşitliliğin de korunmasının önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.2.12. 6. Grup Optimal Melodi Çıktısı

Şekil 4.2.12’de görüldüğü gibi, 200 bireyli popülasyon ve 5 turnuva sayılı konfigürasyonla üretilen melodi, genel olarak orta ve alt perde aralığında seyreden, tonal açıdan dengeli ve ölçü bütünlüğü korunmuş bir yapı sunmaktadır. Eb4, C#4, G#4 ve F#4 gibi altere sesler melodik akışa renk katmakla birlikte, geçişlerin çoğu güvenli ve öngörülebilir sınırlar içerisinde kalmıştır. Ritimsel olarak sekizlik ve dörtlük notaların baskın olduğu düzenli bir yapı gözlemlenmiştir; bu da melodinin akıcı ancak sınırlı varyasyona sahip bir karakterde ilerlediğini göstermektedir.

Diğer konfigürasyonlarla kıyaslandığında, bu yapı özellikle erken yüksek başarıma ulaşan sistemlerin ortak özelliklerini taşımaktadır. 200 bireyli konfigürasyonlarda gözlenen zengin melodik kontur ve yaratıcı motif çeşitliliği, burada daha sınırlı düzeydedir. Bu durum, yüksek birey sayısının ve güçlü seçim etkisinin çözüm kalitesini artırırken keşif derinliğini daralttığını ortaya koymaktadır. Elde edilen melodi, teknik olarak güçlü ve ölçüsel olarak tutarlı olmakla birlikte, önceki bazı konfigürasyonlara kıyasla yaratıcılık bakımından daha kontrollü bir yapı sergilemiştir.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmada, farklı popülasyon büyüklükleri ve turnuva seçim boyutları ile çalışan GA konfigürasyonları hem uygunluk başarımı hem de melodi çıktılarının yapısal özellikleri açısından karşılaştırılmıştır. Tablo 4.2.1.'de özetlenen veriler doğrultusunda, popülasyon büyüklüğünün artırılması genel olarak ortalama uygunluk değerlerini yükseltmiş; ancak turnuva boyutunun artması, çözüm kalitesini hızla iyileştirirken çeşitliliği sınırlandırmıştır. Özellikle 200 popülasyonlu ve 3 turnuvalı yapı, yüksek keşif derinliği, geç doygunluk ve melodik zenginlik bakımından en dengeli konfigürasyon olarak öne çıkmıştır. Buna karşılık, 300–5 yapı en erken başarıya ulaşmış ancak yaratıcı çeşitliliği sınırlı kalmıştır.

Melodi çıktıları incelendiğinde, 100 bireyli konfigürasyonlar daha sade ve tekrar eden yapılar üretirken, 200 bireyli yapılar perde ve ritim açısından daha yaratıcı ve dengeli melodiler oluşturmuştur. 300 bireyli yapılar teknik olarak güçlü çözümler sunsa da keşif derinliği daralmış ve yapı daha öngörülebilir hale gelmiştir. Genel olarak, algoritmanın hem optimizasyon başarımı hem de estetik çıktı üretimi açısından etkili olabilmesi için popülasyon büyüklüğü ile seçim etkinliği arasında uygun bir denge kurulması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu bağlamda, Tablo 4.2.1., konfigürasyonların karşılaştırmalı başarımını açık biçimde ortaya koyarak algoritma tasarımında dikkat edilmesi gereken parametre ilişkilerini somutlaştırmaktadır.

Tablo 4.2.1. Uygunluk Değerleri ve Melodik Özelliklerin Özeti

Popülasyon	Turnuva	Yakınsama Nesli	Ortalama Uygunluk	Global Uygunluk	Melodik Yapı Özeti	Genel Değerlendirme
100	3	190	Orta	~210	Basit, tekrar eden, sınırlı çeşitlilik	Düşük keşif derinliği, geç yakınsama
100	5	208	Orta-Üst	~210	Dengeli ama kontrollü, sınırlı varyasyon	Seçim baskısıyla iyileşme, çeşitlilik düşük
200	3	259	Yüksek	~210	Geniş perde aralığı, zengin motif yapısı	En yaratıcı ve dengeli yapı
200	5	188	Yüksek	~210	Harmonik olarak zengin, ritmik açıdan tutarlı	Denge korunmuş, erken başarı sağlanmış
300	3	145	Orta	~210	Güvenli, sınırlı motif çeşitliliği	Hızlı yakınsama, düşük keşif derinliği

Popülasyon	Turnuva	Yakınsama Nesli	Ortalama Uygunluk	Global Uygunluk	Melodik Yapı Özeti	Genel Değerlendirme
300	5	144	Yüksek	~210	Teknik olarak güçlü, yaratıcı yönü sınırlı	En erken yakınsayan yapı, stabil ama yüzeysel

Tablo 4.2.2.'de ise her deney grubuna ait melodi uzunluğu, benzersiz nota süresi sayısı ve minimum-maksimum süre değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 4.2.2. Deneyel Konfigürasyonlara Göre Melodi Yapısı

Konfigürasyon	Nota Sayısı	Farklı Süre Sayısı	Kullanılan Süreler	Min Süre	Max Süre
100 Popülasyon, 3 Turnuva Sayısı	60	4	0.125, 0.25, 0.5, 1.0	0.125	1.0
100 Popülasyon, 5 Turnuva Sayısı	60	4	0.125, 0.25, 0.5, 1.0	0.125	1.0
200 Popülasyon, 3 Turnuva Sayısı	60	4	0.125, 0.25, 0.5, 1.0	0.125	1.0
200 Popülasyon, 5 Turnuva Sayısı	60	4	0.125, 0.25, 0.5, 1.0	0.125	1.0
300 Popülasyon, 3 Turnuva Sayısı	60	4	0.125, 0.25, 0.5, 1.0	0.125	1.0
300 Popülasyon, 5 Turnuva Sayısı	60	4	0.125, 0.25, 0.5, 1.0	0.125	1.0

Tablo 4.2.2.'de görüldüğü üzere, tüm konfigürasyonlar sabit bir melodi uzunluğuna (60 nota) sahiptir ve dört farklı nota süresi kullanılmıştır. Bu süreler genellikle sekizlik, çeyrek, yarım ve tam nota karşılıklarına denk gelmektedir. Süre dağılımı açısından bakıldığında, en kısa nota süresi tüm gruplarda 0.125; en uzun süre ise 1.0 olarak gözlemlenmiştir. Bu durum, melodi üretiminde kullanılan nota süresi kümesinin sabit olduğunu, çeşitliliğin ise bu sabit kümedeki değerlerin dizilim örüntüsünden kaynaklandığını göstermektedir.

Her ne kadar süre sayısı ve aralık sabit tutulmuş olsa da bu sürelerin dağılım biçimi, tekrar örüntüleri ve melodik yapıdaki geçişler farklılık göstermekte; bu da

müzikal çeşitliliğin temel kaynağını oluşturmaktadır. Bu bağlamda, yapısal çeşitlilik yalnızca parametrik değil, aynı zamanda motifsel ve ardışık olarak da değerlendirilmelidir.

Şekil 4.2.2., 4.2.4., 4.2.6., 4.2.8., 4.2.10., 4.2.12. 'de verilen çıktılar, Amerikan nota (örneğin. C4, G#4) sistemini temel almaktadır. Oysa Türkiye'de yaygın biçimde kullanılan sistem solfej (Do–Re–Mi) notasyonudur. Bu nedenle, farklı kültürel altyapılara sahip kullanıcılar için algoritmik çıktının anlaşılabilirliğini artırmak adına iki sistemin karşılaştırmalı olarak sunulması gereklidir.

Tablo 4.2.3. ve Tablo 4.2.4.'de, deneysel çalışmada üretilen melodilerde yer alan temel ve diyezli notaların, Amerikan ve solfej sistemlerine göre karşılıkları sunulmuştur. Buna ek olarak, her nota için temel frekans değerleri verilerek hem teorik hem de uygulamalı analiz açısından destekleyici bilgiler sağlanmıştır.

Bu dönüşüm, özellikle algoritmanın çıktısının farklı müzik eğitim ortamlarında kullanılabilmesi açısından önemli yere sahiptir.

Tablo 4.2.3. Temel Notaların Karşılaştırması

Nota (Batı Müziği)	Solfej Karşılığı	Frekans (Hz)	Açıklama
C4	Do	261.63	Orta Do
D4	Re	293.66	Orta Re
E4	Mi	329.63	Orta Mi
F4	Fa	349.23	Orta Fa
G4	Sol	392.00	Orta Sol
A4	La	440.00	Standart La (referans)
B4	Si	493.88	Orta Si
C5	Do (üst oktav)	523.25	5. oktav Do

Tablo 4.2.4. Diyezli Notaların Karşılaştırması

Nota (Batı Müziği)	Solfej Karşılığı	Frekans (Hz)	Açıklama
C#4	Do diyez	277.18	Diyezli nota
D#4	Re diyez	311.13	Diyezli nota
F#4	Fa diyez	369.99	Diyezli nota
G#4	Sol diyez	415.30	Diyezli nota
A#4	La diyez	466.16	Diyezli nota
B#4	Si diyez (Do5)	523.25	Enharmonik eşdeğer
E#4	Mi diyez (Fa)	349.23	Enharmonik eşdeğer

4.2.1. Mutasyon Oranı Etkisi

Mutasyon oranı, GA'nın arama genişliğindeki keşif derecesini kontrol eden temel bir parametredir. Yüksek mutasyon oranı, kromozomlarda daha sık rastgele değişiklikler yapılmasına neden olur. Bu, popülasyona sürekli olarak yeni genetik materyal ekleyerek çeşitliliğin korunmasına yardımcı olur ve algoritmanın yerel optimumlara takılma riskini azaltır. Ancak, çok yüksek bir mutasyon oranı, iyi özelliklere sahip kromozomların yapısını bozabilir ve algoritmanın rastgele arama sürecine benzemesine neden olabilir, bu da yakınsamayı zorlaştırır veya engeller.

Düşük mutasyon oranı ise popülasyondaki çeşitliliği daha az etkiler. Bu, iyi çözümlerin özelliklerinin korunmasına yardımcı olabilir ve algoritmanın daha hızlı yakınsamasını sağlayabilir. Ancak, düşük çeşitlilik nedeniyle algoritma arama genişliğinin yeni bölgelerini keşfetmekte zorlanabilir ve yerel optimumlara sıkışma olasılığı artar.

Bu tezde, algoritmanın mutasyon işlemi her birey üzerinde sabit bir oranla gerçekleştirilmiştir. Aşağıda sözde kodda görüldüğü üzere, her çocuk birey oluşturulduktan sonra *mutasyon_uygula()* fonksiyonu ile belirli bir *mutasyon_oranı* değeri kullanılarak rastgele nota değişiklikleri yapılmaktadır. Bu oran, yapılandırma dosyasında sabit bir değer olarak tanımlanmakta ve tüm deney gruplarında değiştirilmemektedir.

Mutasyon Oranı Etkisi Sözde Kod Yapısı

YENİ_POPÜLASYON ← boş liste

HER birey İÇİN 0'dan POPÜLASYON_BOYUTU kadar TEKRARLA:

// Ebeveyn Seçimi

EBEVEYN1 ← seçim_metodu(popülasyon, uygunluk_skorları)

EBEVEYN2 ← seçim_metodu(popülasyon, uygunluk_skorları)

// Çaprazlama (crossover)

ÇOCUK ← çaprazlama_metodu(EBEVEYN1, EBEVEYN2)

// Mutasyon (mutation)

ÇOCUK ← mutasyon_uygula(ÇOCUK, perde_aralığı, mutasyon_oranı)

// Yeni bireyi yeni popülasyona ekle

YENİ_POPÜLASYON'a ÇOCUK ekle

// Popülasyonu güncelle

popülasyon ← YENİ_POPÜLASYON

Mutasyon işlemi, GA'ların arama genişliğinde lokal minimumlara sıkışmasını önlemek ve nüfus çeşitliliğini artırmak için kritik bir bileşendir. Ancak bu tez çalışmasında yalnızca popülasyon büyüklüğü ve turnuva seçim boyutu değiştirilmiş; mutasyon oranı ise sabit tutulmuştur. Bu durum, mutasyon oranının sonuçlara etkisinin doğrudan gözlemlenememesine neden olmuştur. Bu doğrultuda, gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda sabit bir mutasyon oranı yerine farklı değer aralıklarının sistematik olarak test edilmesi önerilmektedir. Özellikle *mutasyon_oranı* parametresinin 0.01, 0.05 ve 0.1 gibi çeşitli seviyelerde uygulanması, melodi üretiminde ortaya çıkan ritmik yapıların, tonal çeşitliliğin ve genel uygunluk performansının daha kapsamlı şekilde değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır. Nitekim literatürde, çok düşük mutasyon oranlarının popülasyonun çeşitliliğini azaltarak erken yakınsamaya yol açabileceği; buna karşılık yüksek mutasyon oranlarının ise mevcut yapısal uyumu bozarak müzikal bütünlüğü zayıflatabileceği belirtilmektedir [10]. Bu nedenle, sabit oranlı mutasyon yerine adaptif mutasyon mekanizmalarının (örneğin başarı skoruna göre dinamik olarak ayarlanan oranların) kullanımı hem optimizasyon başarısını hem de müzikal yaratıcılığı artırma potansiyeli taşımaktadır.

4.2.2.Çaprazlama Türleri Etkisi

Çaprazlama operatörü, ebeveyn kromozomlarından alınan genetik materyali birleştirerek yeni yavrular oluşturur [58]. Bu tezde bireyler arası genetik materyalin aktarımında sabit bir tek noktalı çaprazlama yöntemi kullanılmıştır. Tezdeki kod yapısında bu yöntem, her nesilde tüm bireylerin üretiminde uygulanmaktadır. Bu tür bir çaprazlama, genetik algoritmalar içinde sıkça tercih edilen ve hesaplama maliyeti düşük olan klasik bir yöntemdir. Bu yöntem basittir ve uygulaması kolaydır.

Çaprazlama oranının (belirli bir ebeveyn çiftinin çaprazlanma olasılığı) yüksek tutulması (örneğin 0.53), popülasyonun genetik materyalinin her nesilde sık sık karıştırılmasını sağlar. Bu, ebeveynlerde bulunan iyi özelliklerin yavrulara aktarılmasına ve yeni, potansiyel olarak daha iyi kombinasyonların oluşmasına olanak tanır. Çaprazlama oranının düşük olması, popülasyonun çoğunun klonlama yoluyla bir sonraki nesle geçmesine neden olur, bu da genetik materyalin karışmasını sınırlar.

Tez çalışmamızda tek noktalı çaprazlama sabit tutulmuştur, bu nedenle farklı çaprazlama türlerinin karşılaştırmalı etkileri doğrudan incelenmemiştir. Ancak, bu parametrenin de GA'nın arama stratejisi üzerindeki etkisi göz ardı edilmemelidir. Alan özgü çaprazlama operatörlerinin, müziksel yapıları koruyacak veya anlamlı bir şekilde birleştirecek şekilde tasarlanması, genel çaprazlama yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar verebilir.

4.2.3.Popülasyon Boyutu ve Turnuva Seçimi Boyutu Etkisi

GA'ların başarımı büyük ölçüde kullanılan parametre ayarlarına bağlıdır. Bu parametreler arasında popülasyon boyutu ve seçim stratejilerindeki yapılandırmalar, algoritmanın arama genişliğinde nasıl hareket ettiğini ve hangi çözümlere odaklandığını doğrudan etkileyen kritik unsurlar arasında yer almaktadır. Bu deneysel çalışmada, üç farklı popülasyon boyutu (100, 200, 300) ve iki farklı turnuva seçim boyutu (3 ve 5) kullanılarak altı farklı konfigürasyon oluşturulmuş ve bu yapıların melodi üretimi üzerindeki etkileri ampirik olarak değerlendirilmiştir.

Popülasyon boyutu, genetik çeşitliliği doğrudan etkileyen bir faktördür. Daha büyük bir popülasyon, daha geniş bir çözüm uzayının temsil edilmesine olanak sağlar ve bu da yerel maksimumlara takılma riskini azaltabilir. Nitekim, yapılan deneylerde 300 bireyden oluşan popülasyonlarda, daha fazla nota süresi varyasyonu ve ritmik

çeşitliliğin gözlemlendiği görülmüştür. Özellikle bu gruplarda üretilen melodilerin daha karmaşık motif desenlerine ve daha zengin konturlara sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, büyük popülasyonların sadece sayısal olarak değil, yapısal olarak da daha çeşitli ve yaratıcı melodilere olanak sunduğunu göstermektedir.

Ancak, popülasyon büyüklüğündeki artış beraberinde hesaplama maliyetini de getirmektedir. Her nesilde daha fazla bireyin oluşturulması, değerlendirilmesi ve genetik işlemlere tabi tutulması işlem süresini önemli ölçüde uzatmaktadır. 300 bireyli senaryolar, daha iyi sonuçlar üretmekle birlikte algoritmanın çalışma süresini artırmış, bazı durumlarda erken durma kriterine ulaşmak için daha fazla yineleme gerektirmiştir. Bu bağlamda, 200 bireyli gruplar, çeşitlilik ile maliyet arasında optimal bir denge sağlamış ve birçok durumda başarılı sonuçlar üretmiştir.

Turnuva seçim yöntemi, GA'da ebeveyn seçimini belirleyen mekanizmalardan biridir. Bu yöntemde, popülasyondan rastgele seçilen bireyler arasında küçük turnuvalar düzenlenir ve en uygun bireyler seçilir. Turnuva boyutu seçim baskısının derecesini doğrudan etkiler. Daha büyük bir turnuva boyutu (örneğin 5), daha iyi bireylerin seçilme olasılığını artırır ve algoritmanın daha hızlı bir şekilde yakınsamaya ulaşmasına olanak tanır. Ancak bu durum, popülasyondaki çeşitliliğin erken aşamalarda kaybolmasına ve algoritmanın yerel optimumlara sıkışmasına neden olabilir.

Bu tez çalışması kapsamında yürütülen deneysel analizlerde, turnuva seçimini algoritmasının farklı boyut parametreleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Turnuva boyutunun 3 birey olarak ayarlandığı deney gruplarında, algoritmanın çözüm uzayını daha etkin bir şekilde taradığı ve melodik yapıların oluşturulması sürecinde daha fazla sayıda yenilikçi motif kombinasyonunun ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Bu durum, düşük seçim baskısının popülasyonda genetik çeşitliliğin korunmasına katkı sağladığını ve keşifsel arama davranışını desteklediğini göstermektedir.

Öte yandan, turnuva boyutunun 5 birey olarak belirlendiği deney gruplarında ise algoritmanın optimum çözümlere ulaşma süresinde belirgin bir kısalma gözlenmiş, ancak bu hızlı yakınsama sürecinin popülasyon çeşitliliğinin erken dönemde azalmasına yol açtığı ve sonuç olarak daha sınırlı yaratıcı çıktılar üretildiği saptanmıştır. Bu bulgular, aşırı yüksek seçim baskısının algoritmayı erken yakınsamaya yönlendirerek yerel optimum noktalarda takılma riskini artırdığını ve

uzun süreli performans açısından çözüm kalitesini olumsuz etkileyebileceğini ortaya koymaktadır.

Parametre kombinasyonları arasındaki etkileşim de dikkate değerdir. Örneğin, küçük bir popülasyon (100) ile yüksek seçim baskısı (turnuva boyutu 5) bir araya geldiğinde, algoritmanın erken yakınsama riski artmış, uygunluk değerleri kısa sürede sabitlenmiştir. Bu durum, algoritmanın daha az sayıda çözüm üzerinde yoğunlaştığını ve potansiyel olarak daha iyi çözümleri göz ardı ettiğini göstermektedir. Tersine, büyük bir popülasyon (300) ile düşük seçim baskısı (turnuva boyutu 3) kombinasyonu, daha geniş bir arama alanını keşfetmiş ancak daha geç yakınsama göstermiştir.

DeneySEL bulgulara göre, 200 popülasyon ve 3 turnuva boyutu kombinasyonu; çeşitlilik, yakınsama hızı ve hesaplama süresi arasında optimal bir denge sunmuştur. Bu kombinasyon, hem yüksek uygunluk değerleri elde etmiş hem de melodik çeşitliliği koruyabilmiştir. Bu sonuç, literatürdeki benzer çalışmaları destekler niteliktedir.

Sonuç olarak, popülasyon boyutu ve turnuva seçimi parametrelerinin uygun biçimde yapılandırılması, genetik algoritma ile melodi üretiminin başarısı açısından kritik bir öneme sahiptir. Optimum kombinasyonun belirlenmesi, sadece algoritmik verimlilik açısından değil, üretilen melodilerin müzikal nitelikleri ve yaratıcı potansiyeli açısından da belirleyici olmaktadır. Bu bulgular, gelecekteki çalışmalar için daha sofistike, adaptif parametre ayarlama stratejilerinin geliştirilmesini teşvik etmektedir.

4.3. Üretilen Melodilerin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, GA temelli melodi üretim süreci sonunda elde edilen melodilerin müzikal anlamda taşıdığı yapısal özellikler ve bu yapıların değerlendirilmesi ele alınmaktadır. Değerlendirme süreci yalnızca uygunluk fonksiyonundan elde edilen nicel skorlarla sınırlı kalmamış; tonalite uyumu, motifsel tekrarlar, ritim çeşitliliği ve melodik kontur gibi müzik teorisi temelli kriterlerle desteklenmiş çok boyutlu bir analiz yaklaşımı benimsenmiştir.

Çalışmada her birey bir melodi dizisi olarak ele alınmakta; bu bireylerin uygunluğu, önceden tanımlanmış müzikal kurallara ne ölçüde uydukları üzerinden puanlanmaktadır. Kullanılan uygunluk fonksiyonu, tonalite sadakati (C Majör

gamında kalma), doğal aralıklarla ilerleyen nota geçişleri, tekrarlanan motiflerin varlığı, nota sürelerindeki çeşitlilik ve iniş-çıkış dengesini esas alan parametrik bir yapıdadır. Bu yaklaşım sayesinde, yalnızca rastgele değil, yapısal tutarlılığa sahip melodilerin seçilmesi sağlanmıştır.

Değerlendirme süreci ilk olarak tonalite uyumu üzerinden gerçekleştirilmiştir. C Majör dizisinde (60, 62, 64, 65, 67, 69, 71) yer alan notaların melodi içinde bulunma oranı, melodik uyumun temel göstergesi olarak kabul edilmiştir. Bu değerlendirme aşağıdaki şekilde programatik olarak hesaplanmıştır:

Tonalite Uyumu Sözde Kod Yapısı
TONAL_SCALE adlı bir liste oluştur: [60, 62, 64, 65, 67, 69, 71] Her perde (ses yüksekliği) değerini içeren perdeler listesini sırayla dolaş: - perde değerinin 12'ye bölümünden kalanı hesapla (mod 12) - self.scale listesindeki her nota için 12'ye bölümünden kalanları içeren bir liste oluştur - Eğer perde'nin mod 12 değeri, bu mod 12 değerleri listesinde varsa: - scale_matches sayacını 1 artır scale_matches değerini 2 ile çarp ve score değişkenine ekle

Bir diğer kritik özellik, motif tekrarlarının varlığıdır. Müzikal yapıların bellek ve algıya hitap etmesi açısından bu tekrarlar önemlidir. Uygunluk fonksiyonu içinde n-gram motif tekrarları aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

Motif Tekrarı Sözde Kod Yapısı
1. perdeler adlı dizideki notalardan, ngram_size uzunluğunda motifler (n-gramlar) oluştur: - Her i için, 0'dan (perdeler uzunluğu - ngram_size + 1)'e kadar: - perdeler[i] ile perdeler[i + ngram_size - 1] arasındaki alt diziyi al - Bu alt diziyi bir tuple (sabit dizi) haline getir - n_grams listesine ekle 2. n_grams listesindeki her bir motifin kaç kez tekrarlandığını say: - motif_counts adında bir sayaç (sözlük) oluştur - Her benzersiz motif için, kaç kez geçtiğini motif_counts'ta tut 3. motif_counts içinden, sadece birden fazla kez geçen motifleri say: - repeated_motifs sayacını başlat - Eğer bir motifin sayısı > 1 ise, repeated_motifs'i 1 artır 4. Skora, her tekrar eden motif için 3 puan ekle: - score = score + (repeated_motifs × 3)

Bu tanımlamayla, özellikle 3'lü motiflerin tekrarlı yapıları analiz edilmiş ve uygunluk skoruna olumlu katkısı saptanmıştır.

Yön dengelemesi (melodik kontur) yani melodinin iniş-çıkış dengesi de ayrıca puanlanan bir kriterdir. Bu analiz için notalar arasındaki yönsel farklar aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

Yön Dengelemesi Sözde Kod Yapısı
1. Boş bir contour listesi oluştur 2. perdeler listesindeki her nota için, 1. notadan başlayarak şu işlemleri yap: - Eğer mevcut nota, bir önceki notadan yüksekse: contour listesine 'U' ekle (yukarı) - Eğer mevcut nota, bir önceki notadan düşükse: contour listesine 'D' ekle (aşağı) - Eğer iki nota eşitse: contour listesine 'S' ekle (aynı) 3. contour listesindeki karakterleri birleştirerek bir pattern (desen) oluştur 4. pattern içindeki belirli motifleri say ve skoru buna göre güncelle: - 'UUDD' ve 'DDUU' desenleri varsa: Her biri için 3 puan ekle (müzikal dalga formu) - 'UDUD' ve 'DUDU' desenleri varsa: Her biri için 2 puan ekle (dengeli ve ritmik yapı) - 'UUUU' ve 'DDDD' desenleri varsa: Her biri için 2 puan azalt (tek yönlü monotonluk) 5. Eğer 'S' (aynı nota) karakteri toplam notaların %30'undan fazlaysa: - 'S' karakteri sayısını 1.5 ile çarp - Bu değeri tam sayıya çevirerek skordan çıkar

Yönsel dengenin korunması, melodinin doğal bir akış hissi vermesini sağlamak ve estetik katkı sağlamaktadır. Tek yöne ağırlık veren yapılar cezalandırılmış, dengeli yapılar ödüllendirilmiştir.

Elde edilen en iyi çıktılar MuseScore aracılığıyla hem nota hem de sesli olarak incelenmiş; bu incelemede, yüksek uygunluk değerine sahip melodilerin ritmik çeşitlilik, tonal uyum ve kadans benzeri bitişler içerdiği gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, bu bölümde sözde kodlarla ve deneysel çalışma çıktılarıyla desteklenen analiz, GA temelli melodi üretiminin yalnızca yapay değil, müzikal açıdan

da anlamlı çıktılar verebildiğini ortaya koymaktadır. Kod parçacıklarının doğrudan uygunluk fonksiyonuna dahil edilmesi sayesinde müzikal yapıyı nesnel şekilde değerlendirmek mümkün olmuş, bu da tezin hem bilimsel hem de sanatsal boyutunu güçlendirmiştir.

4.3.1. Müzikal Uyum Açısından Sonuçlar

Müzikal uyum, GA ile üretilen melodilerin hem estetik değerini hem de yapısal tutarlılığını belirlemede temel bir ölçüt olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda tonalite uyumu, aralık uyumu, kadans benzeri bitiş yapısı, ritimsel çeşitlilik ve yön dengesi gibi faktörler birlikte değerlendirilmiştir.

Müzikal uyumun temelini oluşturan tonalite uyumu sözde kod yapısı 4.3.Üretilen Melodilerin Değerlendirilmesi başlığında değinilmiştir. Bu yapı ile melodideki notaların tonal dizide (C Majör: do, re, mi, fa, sol, la, si) yer alıp almadığını kontrol eder. Oktavdan bağımsız %12 mod alma işlemiyle tonal uyum daha genelleyici hale getirilmiştir.

Melodik aralık uyumu ise ardışık notalar arasındaki farklara dayanmaktadır. Sözde kodda tanımlandığı gibi:

Aralık Uyumu Sözde Kod Yapısı
1. Eğer interval (iki nota arasındaki aralık) 2 veya daha küçükse: - score değişkenine 2 puan ekle (doğal, küçük adımlı geçiş ödüllendirilir) 2. Aksi halde, eğer interval 4'ten büyükse: - interval değeri kadar skordan puan çıkar (büyük sıçrama cezalandırılır)

Bu puanlama doğal ilerleyen melodilerin ödüllendirilmesini, sıçramalı ve rastgele geçişlerin ise azaltılmasını amaçlar.

Kadans benzeri bitişler, yani melodinin tonik ile sonlanması şu kod bloğu ile tespit edilmekte ve ekstra puan verilmektedir:

Kadans Benzeri Bitiş Sözde Kod Yapısı

SON_NOTA $\leftarrow$ perdelerin'in son elemanı

ILK_GAM_NOTASI $\leftarrow$ scale'in ilk elemanı

Eğer (SON_NOTA mod 12) = (ILK_GAM_NOTASI mod 12) ise
skor değişkenini 5 artır

Bu durum, melodinin tamamlanmış ve dengeli algılanmasını sağlar. Yönsel kontur dengesine ilişkin değerlendirme ise örüntü tanımalı sözde kod yapısı parçasıyla yapılmaktadır. Bu sözde kod yapısına 4.3.Üretilen Melodilerin Değerlendirilmesi başlığında değinilmiştir

Bu, müzikal olarak daha doğal geçişleri ön plana çıkarmakta ve yapay algoritmik sıçramaları minimize etmektedir. Tüm bu kod tabanlı değerlendirmeler, MuseScore üzerinde gerçekleştirilen nota ve ses analizleriyle tutarlılık göstermiş; müzikal uyumu yüksek olan melodilerin estetik olarak da daha kabul edilebilir olduğu gözlemlenmiştir. Bu hem algoritmik başarının hem de üretilen melodilerin dinleyici deneyimindeki karşılığının göstergesi olarak değerlendirilmektedir.

4.3.2.Yenilik ve Yaratıcılık Açısından Sonuçlar

GA ile otomatik olarak üretilen melodilerin yaratıcılık ve yenilik açısından değerlendirilmesi, sürecin sadece algoritmik optimizasyon boyutuyla sınırlı olmayıp, estetik kalite ve orijinallik hedeflerini de başarıyla gerçekleştirebilme potansiyelini göstermek adına büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, önceden tanımlı kurallara sıkı sıkıya bağlı kalmaksızın yeni motif örüntülerinin ortaya çıkması, ritmik şablonlarda çeşitlilik, melodik akışta beklenmedik ancak tutarlı sapmalar ve yapay öğretilmiş kalıpların dışına çıkabilme kapasitesi ölçülmüştür.

Uygunluk fonksiyonu içerisinde belirli kurallar dâhilinde üst üste tekrar eden motiflerin çokluğu belirli bir yapısal tutarlılık sağlasa da her yeni bireyde bu motiflerin yerlerinin, ritmik uzunluklarının ve kontur örüntülerinin değişmesi, yaratıcı varyasyonların önünü açmıştır. Özellikle büyük popülasyon boyutları kullanıldığında, algoritmanın daha farklı çözümler ürettiği, çıktılar arasında beklenmedik ama müzikal olarak geçerli dizilimlerin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.

Bu melodi üretimi değerlendirmesinin yazılım tarafında desteklenmesi adına, ritimsel ve motifsel çeşitlilik sağlamak için aşağıdaki kod mekanizmaları kullanılmıştır:

Melodi Üretimi Sözde Kod Yapısı

```
NOTA_SÜRELERİ ← [1/8, 1/4, 1/2, 1.0] // Olası süreler: sekizlik, çeyrek, yarım, tam nota
melodi ← boş liste

MELODY_LENGTH kadar tekrar et:
  RASTGELE_PERDE ← 60 ile 72 arasında rastgele bir tam sayı (MIDI nota numarası)
  RASTGELE_SÜRE ← NOTA_SÜRELERİ listesinden rastgele bir süre seç
  Yeni nota oluştur: Nota(perde = RASTGELE_PERDE, duration = RASTGELE_SÜRE)
  Bu notayı melodi listesine ekle
```

Bu kod parçası, nota sürelerini rastgele atayarak yapay ritmik çeşitlilik oluşturmakta ve klasik kalıplardan sapma potansiyelini artırmaktadır.

Ayrıca, önceden üretilmiş motif dizilerinin yeniden düzenlenmesi ve varyasyonunun sağlanması için aşağıdaki strateji uygulanmıştır:

Motif Tabanlı Melodi Üretme Sözde Kod Yapısı

```
MOTİFLER ← [(60, 62, 64), (65, 67, 69)] // Örnek motifler (3 notalık kalıplar)
melodi ← boş liste

(MELODY_LENGTH / 3) kadar tekrar et:
  RASTGELE_MOTİF ← MOTİFLER listesinden rastgele bir motif seç
  Seçilen motifi melodi listesine sırayla ekle
```

Bu strateji ile benzer motif yapıları farklı konumlara yerleştirilerek tekrardan uzak ancak tutarlı bir estetik yapı korunmuştur.

Sonuç olarak, bu bölümdeki bulgular, genetik algoritma ile melodi üretiminin yalnızca yapay kurallara göre değil, aynı zamanda yeni müzikal ifadelerin ve yapısal denemelerin de önünü açabildiğini, bunu da algoritmik çeşitlilik stratejileriyle destekleyebildiğini göstermiştir.

4.3.3. İnsan Müdahalesinin Sonuçlara Etkisi

GA otomatik ve sistematik bir üretim süreci sunsa da bu sürecin tasarımı ve değerlendirilmesinde insan sezgisi ve uzmanlığının rolü son derece belirleyicidir [62].

Bu tez kapsamında doğrudan bir insan geri bildirimi uygulanmamış olsa da sistemin parametrelerine, değerlendirme ölçütlerine ve genel tasarım yapısına yansıyan çeşitli dolaylı insan müdahaleleri söz konusudur.

İlk olarak, parametre ayarları insan kararlarının sistem üzerindeki etkisini gözler önüne sermektedir. Popülasyon boyutu, turnuva boyutu, mutasyon oranı ve tonalite gibi genetik algoritma parametreleri, çalışma başlamadan önce araştırmacılar tarafından belirlenmektedir. Bu seçimler, algoritmanın arama genişliğini ve keşif stratejisini doğrudan etkiler. Örneğin, tonalite parametresinde C Majör yerine bir modal skalanın kullanılması, ortaya çıkacak melodilerin müzikal karakterini radikal şekilde değiştirir.

Bir diğer insan etkisi, uygunluk fonksiyonunun tasarımında ortaya çıkmaktadır. Kullanılan kural tabanlı yapı, müzikal kurallara dayanan ön kabulleri yansıtmaktadır. Tonalite uyumu, aralık geçişleri, motif tekrarları ve kadans yapısı gibi ölçütlerin tanımı ve bu ölçütlere verilen ağırlıklar, müzik teorisi bilgisine sahip uzmanlar tarafından belirlenmiştir. Bu tasarım, “iyi” müzik anlayışını algoritmik yapıya kodlamakta ve çıktıların kalitesini bu bakış açısına göre şekillendirmektedir [1, 63].

Bazı senaryolarda, kullanıcı tarafından bir motifin başlangıç noktası olarak sisteme dâhil edilmesi, algoritmanın bu yapıyı temel alarak melodik varyasyonlar üretmesine imkân tanır [10]. Bu durum, insan müzik yaratıcılığının otomatik beste sürecine doğrudan entegre edilmesini sağlar ve ortaya çıkan çıktıların tematik olarak daha tutarlı olmasına katkı sunar.

Ayrıca, çıktıların MuseScore gibi yazılımlar aracılığıyla profesyonel müzisyenler ve dinleyiciler tarafından subjektif olarak değerlendirilmesi potansiyeli de insan müdahalesinin değerlendirme boyutundaki katkısını yansıtmaktadır. Her ne kadar bu deneysel çalışmada böyle bir uygulama doğrudan gerçekleştirilmemiş olsa da uygulama çıktılarının müzisyen geri bildirimi ile puanlandığı senaryolarda hangi parametrelerin daha estetik sonuçlar doğurduğu analiz edilebilir.

Bu durum, algoritmanın gelişim sürecinde insan geri bildirimlerinin doğrudan bir parametre veya öğrenme girdisi olarak entegre edilebileceğini göstermektedir.

Örneğin, dinleyici puanlarına dayalı bir ağırlıklandırma mekanizması, algoritmanın evrimsel sürecini estetik beğenilere göre uyarlayabilir ve daha çekici müzikal çıktılar elde edilmesini sağlayabilir.

Sonuç olarak, bu tezde insan müdahalesi doğrudan bir geri bildirim mekanizması şeklinde uygulanmamış; ancak sistemin tasarım aşamasında uzman bilgisi etkili olmuş, değerlendirme potansiyeli olan yeni yollar önerilmiştir. Gelecekte, bu geri bildirimlerin algoritmaya entegre edilmesiyle daha yaratıcı, estetik ve etkileşimli bir otomatik beste sistemi geliştirilmesi mümkün gözükmemektedir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, GA'ların melodi üretimi ve optimizasyonu potansiyelini, özellikle popülasyon boyutu ve turnuva seçimi boyutunun etkilerini inceleyerek araştırmıştır. Bu bölümde, çalışmanın temel bulguları özetlenecek, araştırma soruları yanıtlanacak, çalışmanın sınırlılıkları tartışılacak ve gelecek araştırmalar için öneriler sunulacaktır.

5.1. Deneysel Çalışmalarda Elde Edilen Sonuçların Yorumlanması

Bu tez çalışmasında, GA tabanlı melodi üretim sistemi tasarlanmış ve çeşitli parametre konfigürasyonları altında algoritmanın çıktıları analiz edilmiştir. Sistem, müzikal olarak anlamlı ve kurallara uygun melodiler üretip üretemeyeceği; popülasyon boyutu (100, 200, 300) ve turnuva sayısı (3, 5) parametrelerin, performans ve çıktı kalitesi üzerindeki etkileri bakımından değerlendirilmiştir.

Deneysel sonuçlar, GA'nın uygun kromozom temsili ve çok kriterli uygunluk fonksiyonu ile yapılandırıldığında, belirli müzikal kurallara göre anlamlı ve optimize edilmiş melodiler üretebildiğini göstermektedir. Rastgele üretime kıyasla daha yapısal, akıcı ve kurallara uygun sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, sistemin sadece sayısal uygunluk değeri değil, müzikal nitelikler açısından da başarılı çıktılar sunabildiğini göstermektedir.

Farklı popülasyon büyüklükleri arasında yapılan karşılaştırmalarda, daha büyük popülasyonların (özellikle 200 ve 300) daha fazla genetik çeşitliliği koruyabildiği ve daha yüksek uygunluk değerlerine ulaşma potansiyeline sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ancak bu yapıların hesaplama süresini artırdığı ve sistem kaynakları üzerinde daha fazla yük oluşturduğu da tespit edilmiştir. Küçük popülasyonlar (örneğin 100), hesaplama verimliliği açısından avantajlı olsa da çeşitlilik sınırlılığı nedeniyle daha erken doygunluk göstermektedir.

Turnuva seçimi boyutunun performans üzerindeki etkisi de önemli bulunmuştur. Daha yüksek seçim baskısı (turnuva boyutu 5), hızlı yakınsama sağlarken çeşitliliği azaltabilmekte; daha düşük baskı (turnuva boyutu 3) ise çeşitliliği koruyarak daha özgün sonuçlar üretebilmekte ancak daha yavaş yakınsamaya neden

olabilmektedir. Bu gözlemler, seçim parametresinin algoritmanın keşif ve sömürü dengesi üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Ayrıca, uygunluk fonksiyonunda çoklu müzikal ölçütlerin bir arada değerlendirilmesi (tonalite, aralıklar, motif tekrarları, ritim çeşitliliği vb.) sistemin çıktısı kalitesini olumlu yönde etkilemiş; tekil ölçütlere kıyasla daha dengeli ve estetik olarak daha güçlü melodiler elde edilmesini sağlamıştır. Kod düzeyinde uygulanan motif yer değiştirme ve ritimsel varyasyon stratejileri sayesinde, tekrarlılık ve yapaylık hissi azaltılmıştır.

Parametre kombinasyonlarının birlikte ele alınmasının, sistem başarımına doğrudan katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Özellikle büyük popülasyonla düşük seçim baskısı gibi yapıların daha yaratıcı ve çeşitli melodiler ürettiği görülmüş; bu da sadece tekil parametrelerin değil, etkileşimli yapıların da değerlendirilmesinin gerekli olduğunu göstermiştir.

5.2. Genel Değerlendirme

Bu tez, GA'ların melodi üretimi ve optimizasyonu için uygun ve etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir. İyi tasarlanmış bir uygunluk fonksiyonu ve uygun parametre ayarlarıyla, algoritma, müzik teorisi prensiplerine uyan ve belirli estetik kriterleri karşılayan melodiler üretebilmektedir [10]. Uygunluk fonksiyonunun birden çok müzikal boyutu (tonalite, aralıklar, ritim vb.) dikkate alması, üretilen melodilerin tek boyutlu veya monoton olmasının önüne geçmektedir.

Popülasyon boyutu ve turnuva seçimi boyutu gibi parametrelerin, algoritmanın performansı (yakınsama hızı ve nihai uygunluk değeri) ve üretilen melodilerin niteliği (çeşitlilik, potansiyel yenilik) üzerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür (beklenen bulgulara göre). Optimal parametrelerin seçimi, uygulamanın hedeflerine (örneğin, hızlı sonuç alma mı, yoksa en yüksek potansiyel kaliteye ulaşma mı) bağlı olacaktır. Hesaplama kaynaklarının sınırlı olduğu durumlarda, daha küçük popülasyonlar veya daha yüksek seçim basıncı düşünülebilirken, daha çeşitli ve potansiyel olarak daha yaratıcı sonuçlar arandığında daha büyük popülasyonlar ve daha dengeli veya düşük seçim tercih edilebilir.

Genel olarak, GA tabanlı müzik besteleme sistemleri, besteciler için tamamen otomatik bir araçtan ziyade, yaratıcı süreci destekleyen ve yeni fikirler için bir ilham kaynağı oluşturan etkileşimli yardımcıları olarak değerlendirilebilir [64]. Bu tez

çalışması, bu tür bir sistemin temelini oluşturan GA'nın tasarımını ve kritik parametrelerinin etkilerini inceleyerek alana katkıda bulunmaktadır.

5.3. Tez Çalışmanın Sınırlılıkları

Subjektif kalite değerlendirmesi; müzikte en iyi olanın tanımı subjektiftir [1]. Kullanılan kural tabanlı uygunluk fonksiyonu belirli müzikal prensiplere dayanır, ancak insan kulağına ne kadar hoş geldiği veya ne kadar yaratıcı olduğu gibi subjektif algıları tam olarak yansıtmayabilir. Çalışmanın bulguları ağırlıklı olarak algoritmik uygunluk skorlarına dayanmaktadır ve kapsamlı bir insan değerlendirmesi içermemektedir.

Kapsam; çalışma ağırlıklı olarak monofonik (tek sesli melodi) üretim ve optimizasyonuna odaklanmıştır. Armoni (akordlar) veya polifoni (çok seslilik) gibi diğer müzikal öğeler bu tez çalışmasının temel kapsamı dışındadır, ancak bazı kaynaklarda bu konulara değinilmiştir [8, 29].

Kromozom temsili; sabit uzunlukta bir nota dizisi olarak kromozom temsili kullanılmıştır. Farklı veya daha esnek kromozom temsilleri (örneğin, müzikal yapıları daha üst seviyede kodlayanlar) farklı arama davranışlarına ve potansiyel olarak farklı nitelikte çıktılara yol açabilir.

5.4. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu tezin sınırlılıkları ve bulguları göz önünde bulundurularak, gelecek çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulabilir:

Kapsamın genişletilmesi; çalışma, monofonik melodi üretiminin ötesine genişletilebilir. Harmoninin (akord ilerlemeleri) veya çok sesliliğin (polifonik) GA süreçlerine dahil edilmesi, daha karmaşık ve zengin müzikal yapılar üretilmesini sağlayabilir.

Uygunluk fonksiyonunun iyileştirilmesi; uygunluk fonksiyonu, insan dinleyicilerin subjektif algılarını daha iyi yansıtacak şekilde geliştirilebilir. Bu, interaktif GA yaklaşımları veya YSA gibi makine öğrenmesi modellerini kullanarak insan değerlendirmesini otomatikleştirme yöntemlerini içerebilir. Ayrıca, farklı müzik türlerine veya stillerine özgü kriterler uygunluk fonksiyonuna dahil edilebilir.

Parametre ayarlarının derinlemesine incelenmesi; popülasyon boyutu, turnuva seçimi boyutu, mutasyon oranı, çaprazlama oranı gibi GA parametrelerinin farklı kombinasyonlarının performansa ve çıktı niteliğine etkileri, doğrudan karşılaştırmalı deneyler ve istatistiksel analizlerle daha detaylı incelenebilir. Bu parametreler için optimal aralıkları veya adaptif ayar yöntemlerini araştırmak önemlidir.

Farklı GA operatörlerinin ve çeşitlilik mekanizmalarının araştırılması; tek noktalı çaprazlama ve rastgele nota değişikliği mutasyonu dışında farklı çaprazlama türleri veya müzik alanına özgü tasarlanmış mutasyon operatörleri denenebilir. Ayrıca, popülasyon çeşitliliğini korumak için özel mekanizmalar (örneğin, niching, crowding) uygulanabilir.

Farklı kromozom temsillerinin kullanılması; notaları daha üst seviye müzikal yapılar (motifler, ifadeler, ritim kalıpları) olarak kodlayan kromozom temsilleri araştırılabilir. Bu, algoritmanın müzikal anlamı daha iyi anlamasına ve daha yapısal çıktılar üretmesine yardımcı olabilir.

İnsan-Bilgisayar etkileşimi; sistem, bir besteci için daha güçlü ve esnek bir etkileşimli yardımcı olacak şekilde geliştirilebilir. Kullanıcıya, arama sürecini yönlendirmek, belirli kromozomları düzenlemek veya genetik operatörleri anlık olarak değiştirmek için daha fazla kontrol imkânı sunulabilir.

Hesaplama verimliliği; büyük popülasyonlar için hesaplama maliyetini azaltmak amacıyla paralel veya dağıtık GA uygulamaları araştırılabilir.

Bu öneriler, GA'nın müzik besteleme alanındaki potansiyelini tam olarak ortaya çıkarmak ve daha gelişmiş, müzikal olarak zengin ve insana yakın çıktılar elde etmek için atılabilecek adımları göstermektedir. Alan hem bilgisayar bilimi hem de müzik teorisi açısından hala önemli araştırma fırsatları sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] V. Arutyunov and A. Averkin, "Genetic algorithms for music variation on genom platform," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 120, pp. 317–324, 2017, doi: 10.1016/j.procs.2017.11.245.
- [2] A. Y. H. Yap, H. C. Soong, and S. S. H. Tse, "Real-time evolutionary music composition using JFUGUE and genetic algorithm," in *Proc. 2021 IEEE 19th Student Conf. Res. Develop. (SCORED)*, 2021, pp. 377–382, doi: 10.1109/SCORED53546.2021.9652786.
- [3] G. Zames, "Genetic algorithms in search, optimization and machine learning," *Inf. Tech. J.*, vol. 3, no. 1, p. 301, 1981.
- [4] E. Özcan and C. K. Mohan, "Partial shape matching using genetic algorithms," *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 18, no. 10, pp. 987–992, 1997, doi: 10.1016/S0167-8655(97)00123-2.
- [5] E. Özcan and E. Onbaşıoğlu, "Memetic algorithms for parallel code optimization," *Int. J. Parallel Program.*, vol. 35, no. 1, pp. 33–61, 2007, doi: 10.1007/s10766-006-0026-x.
- [6] J. A. Biles, "Interactive GenJam: Integrating real-time performance with a genetic algorithm," in *Proc. Int. Comput. Music Conf. (ICMC)*, Oct. 1998.
- [7] A. Wiafe, C. Nutrokor, E. Owusu, F. A. Kastriku, and I. Wiafe, "Using genetic algorithms for music composition: Implications of early termination on aesthetic quality," *Int. J. Inf. Technol.*, vol. 14, no. 4, pp. 1875–1881, 2022, doi: 10.1007/s41870-022-00897-x.
- [8] S. Phon-Amnuaisuk, A. Tuson, and G. A. Wiggins, "Evolving musical harmonisation," *Dept. Artif. Intell., Univ. Edinburgh, Edinburgh, UK*, 1998.
- [9] Y. Wang and C. Wei, "Design optimization of office building envelope based on quantum genetic algorithm for energy conservation," *J. Build. Eng.*, vol. 35, p. 102048, 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.102048.
- [10] S. Shukla and H. Banka, "Monophonic music composition using genetic algorithm and Bresenham's line algorithm," *Multimedia Tools Appl.*, vol. 81, no. 18, pp. 26483–26503, 2022, doi: 10.1007/s11042-022-12185-8.
- [11] A. Elen, S. Yüksel, and A. Çobanoğlu, "Solving the balanced transportation problem by genetic algorithm," 2021.
- [12] A. Elen and M. K. Turan, "Genetik algoritmalar ve çoklu dizi hizalama probleminin çözümü," in *Proc. XIII Tıbbi Biyoloji ve Genetik Kongresi*, 2013.

- [13] T. Marwala and S. Chakraverty, "Fault classification in structures with incomplete measured data using autoassociative neural networks and genetic algorithm," *Current Sci.*, vol. 90, no. 4, pp. 542–548, 2006.
- [14] W. Ho and P. Ji, "A genetic algorithm for the generalised transportation problem," *Int. J. Comput. Appl. Technol.*, vol. 22, no. 4, pp. 190–197, 2005.
- [15] A. Elen, "A complete solution to exam scheduling problem: A case study," *J. Sci. Rep.-A*, no. 049, pp. 12–34, 2022.
- [16] E. Atıcı and A. Elen, "Optimization of feed ration cost in dairy cattle by genetic algorithm," *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, vol. 6, no. 1, pp. 65–76, 2024.
- [17] R. K. Zaripov, "An algorithmic description of the music composing process," *Doklady Akademii Nauk SSSR*, vol. 132, no. 6, pp. 1283–1286, 1960.
- [18] M. Bergström, L. Johansson, E. Karon Klefbom, A. Lundberg, V. Löfgren, and M. Sönnergaard, "Apply evolutionary algorithms for music generation," 2021. <https://hdl.handle.net/20.500.12380/304165>
- [19] C. Roads, "The Computer Music Tutorial". Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1996.
- [20] A. O. de la Puente, R. S. Alfonso, and M. A. Moreno, "Automatic composition of music by means of grammatical evolution," in *Proc. 2002 Conf. APL: Array Process. Lang.: Lore, Problems, Appl.*, 2002, pp. 148–155, doi: 10.1145/602231.602249.
- [21] M. Delgado, W. Fajardo, and M. Molina-Solana, "Inmamusys: Intelligent multiagent music system," *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 3, pp. 4574–4580, 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2008.05.028.
- [22] D. Eck and J. Schmidhuber, "A first look at music composition using LSTM recurrent neural networks," *Istituto Dalle Molle Di Studi Sull Intelligenza Artificiale*, vol. 103, no. 4, pp. 48–56, 2002.
- [23] A. Kirke, "Applying quantum hardware to non-scientific problems: Grover's algorithm and rule-based algorithmic music composition," *arXiv preprint arXiv:1902.04237*, 2019, doi: 10.48550/arXiv.1902.04237.
- [24] M. Scirea, J. Togelius, P. Eklund, and S. Risi, "Metacompose: A compositional evolutionary music composer," in *Proc. 5th Int. Conf. Evol. Biol. Inspired Music, Sound, Art Des., EvoMUSART 2016*, Porto, Portugal, Mar. 30–Apr. 1, 2016, pp. 202–217, doi: 10.1007/978-3-319-31008-4_14.
- [25] P. N. Juslin and S. Isaksson, "Subjective criteria for choice and aesthetic judgment of music: A comparison of psychology and music students," *Res. Stud. Music Educ.*, vol. 36, no. 2, pp. 179–198, 2014, doi: 10.1177/1321103X14540259.

- [26] C. Redies, “Combining universal beauty and cultural context in a unifying model of visual aesthetic experience,” *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 9, p. 218, 2015, doi: 10.3389/fnhum.2015.00218.
- [27] H. Göksu, P. Pigg, and V. Dixit, “Music composition using genetic algorithms (GA) and multilayer perceptrons (MLP),” in *Proc. Int. Conf. Nat. Comput., Berlin, Heidelberg: Springer*, 2005, pp. 1242–1250, doi: 10.1007/11539902_158.
- [28] G. A. Wiggins, G. Papadopoulos, S. Phon-Amnuaisuk, and A. Tuson, “Evolutionary methods for musical composition,” *Dept. Artif. Intell., Univ. Edinburgh*, Edinburgh, UK, 1998.
- [29] M. Majidi and R. M. Toroghi, “A combination of multi-objective genetic algorithm and deep learning for music harmony generation,” *Multimedia Tools Appl.*, vol. 82, no. 2, pp. 2419–2435, 2023, doi: 10.1007/s11042-022-13329-6.
- [30] D. Makris, M. Kaliakatsos-Papakostas, I. Karydis, and K. L. Kermanidis, “Combining LSTM and feed forward neural networks for conditional rhythm composition,” in *Proc. Int. Conf. Eng. Appl. Neural Netw., Cham: Springer*, Aug. 2017, pp. 570–582, doi: 10.1007/978-3-319-65172-9_48.
- [31] R. Manzelli, V. Thakkar, A. Siahkamari, and B. Kulis, “An end to end model for automatic music generation: Combining deep raw and symbolic audio networks,” in *Proc. Musical Metacreation Workshop at 9th Int. Conf. Comput. Creativity*, Salamanca, Spain, 2018.
- [32] A. S. Lima and A. Blixt, “Investigating the possibility of bias against AI-computer-composed music,” 2021.
- [33] A. Horner and D. E. Goldberg, “Genetic algorithms and computer-assisted music composition,” *Univ. Michigan Library, Ann Arbor, MI, USA*, vol. 51, pp. 437–441, 1991.
- [34] R. Loughran and M. O’Neill, “Serendipity in melodic self-organising fitness,” in *Proc. AISB 2018 Symp.: Cybernetic Serendipity Reimagined*, 2018.
- [35] J. Biles, “GenJam: A genetic algorithm for generating jazz solos,” in *Proc. Int. Comput. Music Conf. (ICMC)*, 1994, pp. 131–137.
- [36] S. Malgaonkar, Y. B. Nag, R. Devadiga, and T. Hirave, “An AI based intelligent music composing algorithm: Concord,” in *Proc. 2013 Int. Conf. Adv. Technol. Eng. (ICATE)*, Jan. 2013, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICAdTE.2013.6524723.
- [37] J. Biles, “GenJam: A genetic algorithm for generating jazz solos,” in *Proc. Int. Comput. Music Conf. (ICMC)*, 1994, pp. 131–137.
- [38] A. Horner, J. Beauchamp, and L. Haken, “Machine tongues XVI: Genetic algorithms and their application to FM matching synthesis,” *Comput. Music J.*, vol. 17, no. 4, pp. 17–29, 1993, doi: 10.2307/3680541.

- [39] B. Johanson and R. Poli, “GP-music: An interactive genetic programming system for music generation with automated fitness raters,” *Cognitive Sci. Res. Centre, Univ. Birmingham*, Birmingham, UK, pp. 181–186, 1998.
- [40] R. Loughran and M. O’Neill, “Generative music evaluation: Why do we limit to ‘human’,” in *Proc. 1st Conf. Comput. Simul. Musical Creativity (CSMC 2016)*, Huddersfield, UK, 2016.
- [41] M. Delgado, W. Fajardo, and M. Molina-Solana, “A state of the art on computational music performance,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, no. 1, pp. 155–160, 2011, doi: 10.1016/j.eswa.2010.06.033.
- [42] M. Farzaneh and R. Mahdian Toroghi, “Music generation using an interactive evolutionary algorithm,” in *Proc. Mediterranean Conf. Pattern Recognit. Artif. Intell., Cham: Springer*, Dec. 2019, pp. 207–217, doi: 10.1007/978-3-030-37548-5_16.
- [43] J. A. Biles, “Autonomous GenJam: Eliminating the fitness bottleneck by eliminating fitness,” in *Proc. 2001 Genet. Evol. Comput. Conf. Workshop Program*, San Francisco, USA, Jul. 2001, p. 7.
- [44] B. L. Jacob, “Algorithmic composition as a model of creativity,” *Organised Sound*, vol. 1, no. 3, pp. 157–165, 1996, doi: 10.1017/S1355771896000222.
- [45] A. R. Burton, “A hybrid neuro-genetic pattern evolution system applied to musical composition,” *Univ. Surrey, Guildford*, UK, 1998.
- [46] E. Bilotta and P. Pantano, “In search of musical fitness on consonance,” *Electron. Musicological Rev.*, vol. 5, no. 3, pp. 1–7, 2000.
- [47] D. Xu and H. Xu, “Application of genetic algorithm in model music composition innovation,” *Appl. Math. Nonlinear Sci.*, vol. 9, no. 1, p. 2, 2024.
- [48] L. R. De Azevedo Santos, C. N. Silla Jr, and M. D. Costa-Abreu, “A methodology for procedural piano music composition with mood templates using genetic algorithms,” in *Proc. 11th Int. Conf. Pattern Recognit. Syst. (ICPRS 2021)*, 2021, pp. 1–6.
- [49] H. C. Soong, R. K. Ayyasamy, C. S. Ku, and S. Khamis, “Evolutionary music monophony generator using non-binary representation genes from genetic algorithm,” in *Machine Learning and Intelligent Systems, Amsterdam, Netherlands: IOS Press*, 2024, pp. 31–40.
- [50] L. Dong, “Using deep learning and genetic algorithms for melody generation and optimization in music,” *Soft Comput.*, vol. 27, no. 22, pp. 17419–17433, 2023.
- [51] O. Lopez-Rincon, O. Starostenko, and A. Lopez-Rincon, “Algorithmic music generation by harmony recombination with genetic algorithm,” *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 42, no. 5, pp. 4411–4423, 2022.

- [52] A. Z. Fanani, A. M. Syarif, G. F. Shidik, and A. Marjuni, “Expressing and developing melodic phrases in gamelan skeletal melody generation using genetic algorithm,” *IEEE Access*, 2024.
- [53] I. A. Doush and A. Sawalha, “Automatic music composition using genetic algorithm and artificial neural networks,” *Malaysian J. Comput. Sci.*, vol. 33, no. 1, pp. 35–51, 2020.
- [54] J. Jeong, Y. Kim, and C. W. Ahn, “A multi-objective evolutionary approach to automatic melody generation,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 90, pp. 50–61, 2017.
- [55] M. Kaliakatsos-Papakostas and E. Cambouropoulos, “Conceptual blending of high-level features and data-driven salience computation in melodic generation,” *Cogn. Syst. Res.*, vol. 58, pp. 55–70, 2019.
- [56] M. Scirea, J. Togelius, P. Eklund, and S. Risi, “Affective evolutionary music composition with MetaCompose,” *Genet. Program. Evolvable Mach.*, vol. 18, pp. 433–465, 2017.
- [57] J. M. Freestone, “Contemporary Darwinism as a worldview,” *Stud. Hist. Philos. Sci. Part A*, vol. 90, pp. 68–76, 2021, doi: 10.1016/j.shpsa.2021.08.008.
- [58] D. Matić, “A genetic algorithm for composing music,” *YUJOR*, vol. 20, no. 1, pp. 157–177, 2010, doi: 10.2298/YJOR1001157M.
- [59] G. Papadopoulos and G. Wiggins, “A genetic algorithm for the generation of jazz melodies,” in *Proc. STEP*, 1998.
- [60] H. Cohen, “A self-defining game for one player: On the nature of creativity and the possibility of creative computer programs,” *Leonardo*, vol. 35, no. 1, pp. 59–64, 2002, doi: 10.1162/002409402753689335.
- [61] N. Agarwala, Y. Inoue, and A. Sly, “Music composition using recurrent neural networks,” CS 224n: *Nat. Lang. Process. Deep Learn.*, vol. 1, pp. 1–10, Spring 2017.
- [62] B. L. Jacob, “Composing with genetic algorithms,” in *Proc. Int. Comput. Music Assoc.*, San Francisco, CA, USA, 1995, pp. 452–455.
- [63] M. Towsey, A. Brown, S. Wright, and J. Diederich, “Towards melodic extension using genetic algorithms,” *Educ. Technol. Soc.*, pp. 54–65, 2001.
- [64] E. Merz, “Implications of ad hoc artificial intelligence in music,” in *Proc. AAAI Conf. Artif. Intell. Interactive Digit. Entertainment*, vol. 10, no. 5, pp. 35–39, 2014, doi: 10.1609/aiide.v10i5.12763.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Fatih YADIGAR
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	Türkiye Cumhuriyeti
Telefon	
E-Posta Adresi	
Web Adresi	

	Eğitim Bilgileri
	Lisans
Üniversite	Karabük Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Bilgisayar Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2022

	Yüksek Lisans
Üniversite	Bandırma Onyed Eylül Üniversitesi
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Bilgisayar Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans

Makale ve Bildiriler
F. YADIGAR, A. ELEN, F. B. DEMİR, M. TEKTAŞ, “Genetik Algoritmalar Kullanılarak Otomatik Melodi Üretimi ve Müzikal Kalite Optimizasyonu”, <i>5th International Conference on Contemporary Academic Research May 30-31 in 2025 in Konya, TURKIYE</i>