

**T.C.  
HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AMUT HAREKETİNİN BİYOMEKANİK MODELİNİN BİR  
GENETİK ALGORİTMAYLA İNCELENMESİ**

**Volkan Dağhan YAYLIOĞLU**

**Spor Bilimleri ve Teknolojisi Programı  
DOKTORA TEZİ**

**ANKARA**

**2023**

**T.C.  
HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AMUT HAREKETİNİN BİYOMEKANİK MODELİNİN BİR  
GENETİK ALGORİTMAYLA İNCELENMESİ**

**Volkan Dağhan YAYLIOĞLU**

**Spor Bilimleri ve Teknolojisi Programı  
DOKTORA TEZİ**

**TEZ DANIŞMANI  
Dr. Öğr. Üyesi Serdar ARITAN**

**ANKARA**

**2023**

Amut Hareketinin Biyomekanik Modelinin Bir Genetik Algoritmayla İncelenmesi  
Volkan Dağhan YAYLIOĞLU  
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Serdar ARITAN

Bu tez çalışması Temmuz, 2023 tarihinde jürimiz tarafından "Spor Bilimleri ve Teknolojisi Programı Programı"nda doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Fatih YAŞAR  
Hacettepe Üniversitesi  
Üye: Prof. Dr. Sadettin KİRAZCI  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Senih GÜRSES  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin ÇELİK  
Hacettepe Üniversitesi  
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Arif Mithat AMCA  
Hacettepe Üniversitesi

Bu tez, Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri tarafından uygun bulunmuştur.

Prof. Dr. Müge YEMİŞÇİ ÖZKAN  
Enstitü Müdürü

## YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*" kapsamına tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü/Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir. <sup>(1)</sup>
- Enstitü/Fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren .... ay ertelenmiştir. <sup>(2)</sup>
- Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir. <sup>(3)</sup>

07/08/2023

(imza)

Volkan Dağhan YAYLIOĞLU

---

*"Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*

1. Madde 6.1. Lisansüstü tezele ilgili patent başvurusu yapılması veya patent sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir.
2. Madde 6.2. Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internette paylaşılması durumunda 3. şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.
3. Madde 7.1. Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir\*. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir. Madde 7.2 Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

\*Tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu tarafından karar verilir.

## ETİK BEYAN

Bu çalışmadaki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, yararlandığım kaynaklara bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu, tezimin kaynak gösterilen durumlar dışında zgn olduğunu, Dr. Öğr. Üyesi Serdar ARITAN danışmanlığında tarafımdan üretildiğini ve Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Yönergesine göre yazıldığımı beyan ederim.

Volkan Dağhan YAYLIOğLU

## TEŞEKKÜR

Doktora sürecim boyunca dalgalandığımda bir çapa, yolumu kaybettiğimde bir deniz feneri olan, dahiyane öngörleriyle ve birikimiyle her sorduğumda yol gösteren danışmanım Serdar ARITAN'a, ufuk açıcı yorumları için jüri üyeleri Fatih YAŞAR, Sadettin KİRAZCI, Senih GÜRSES, Hüseyin ÇELİK, ve Arif Mithat AMCA'ya, dostluğunu esirgemeyen ve hep yanımda olan Nihat Őükrü ÖZGÖREN ve Eren KURTER'e, bu süreç boyunca beni benden fazla destekleyen Sinem Beril SERTOĞLU'na, sabırla beni sevmeye devam eden ailem Serap YAYLIOĞLU ve Özlem DÖNMEZ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatımın bu zorlu aşamasında sizlerle temas ettiğim için çok şanslıyım.

İyi ki varsınız.

## ÖZET

**YAYLIOĞLU, V.D., Amut Hareketinin Biyomekanik Modelinin Bir Genetik Algoritmayla İncelenmesi, Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Spor Bilimleri ve Teknolojisi Programı, Doktora Tezi, Ankara, 2023.** Spor Biyomekaniği alanının temel yöntemlerinden biri insan hareketinin yakalanması ve bunların matematiksel yöntemlerle analiz edilmesidir. Bu tür yöntemler insan hareketi kinematik verilerinden yola çıkarak ters dinamik analizle kuvvetleri ve/veya torkları kestirmeye yarar. Fakat analiz için gereken kuvvetler bu akış ile elde edilmek yerine harekete yol açan kuvvetler doğrudan bilgisayar aracılığıyla sentezlendiğinde bu deneysel verilere bağımlılığın ortadan kalkması sağlanacaktır. Özellikle henüz nasıl yapılacağı bilinmeyen sporcu hareketleri hakkında fikir sahibi olabilmek, sporun ufkunu genişletebilmek için bu tür bir yaklaşımın gerekli olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmanın hedefi amut hareketinin bir genetik algoritmayla sentezlenmesi ve bu sentez sürecinin incelenmesidir. Genetik algoritma ile amut hareketi sentezi gerçekleştirilerek böyle bir sentezin mümkün olduğu belgelenmiş, yöntemin diğer insan hareketleri için de uygulanabilirliğine işaret edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** modelleme, benzeşim, genetik algoritmalar, hareket sentezi

**ABSTRACT**

**YAYLIOĞLU, V.D., Inspection of Biomechanical Model of Handstand Motion via a Genetic Algorithm, Hacettepe University Graduate School of Health Sciences Sport Sciences and Technology Programme, Doctor of Philosophy Thesis, Ankara, 2023.** A basic method of Sports Biomechanics is capturing human motion and analysing them using mathematical methods. These methods provides us with an estimation of forces and/or torques through inverse dynamic analysis, starting from kinematic data of human motion. Though when the forces required for this analysis are synthesized directly using a computer, dependence on these experimental data would be nullified. Such an approach is thought to be necessary to have an opinion about sports motions those which are still not realised, and hence to expand the horizon of sports. Aim of this study is synthesis of handstand motion using a genetic algorithm and inspection of this synthesis process. It has been documented that such a synthesis is possible by realising synthesis of a handstand motion, and it has been pointed out that the method can be applied to synthesis of other human motions.

**Key Words:** modelling, simulation, genetic algorithms, motion synthesis



**İÇİNDEKİLER**

ONAY SAYFASI	iii
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI	iv
ETİK BEYAN	v
TEŞEKKÜR	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER	xiii
TABLolar	xvi
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1 Hipotez	2
1.2 Kısıtlamalar ve Varsayımlar	2
1.3 Akış	3
<b>2. GENEL BİLGİLER</b>	<b>4</b>
2.1 Eniyileştirmeye Giriş	4
2.2 İnsan Hareketi Modellemesi	6
2.3 Bir Eniyileştirme Problemi Olarak İnsan Hareketi	7
2.3.1 İnsan Hareketi Eniyileştirmesi	7
2.4 Eniyileştirme Yöntemleri	14
2.5 Genetik Algoritmalar	16
<b>3. YÖNTEM</b>	<b>18</b>

3.1	Genel Bakış	18
3.2	İnsan Hareket Modeli	20
3.3	Model Parametreleri	29
3.4	Yazılım	30
3.5	Genetik Algoritma Bileşenleri	34
3.5.1	Başlangıç Nesli Üretimi	34
3.5.2	Ebeveyn Seçimi	34
3.5.3	Varyasyon Operatörleri - Geleneksel Operatör Uyarlamaları	34
3.5.4	Varyasyon Operatörleri - Ara Değerlemeli Operatörler	40
3.5.5	Eliminasyon	44
3.5.6	Nişleme	47
3.5.7	Ölçekler	47
3.6	Veri Azaltma	48
3.7	Koşular	50
<b>4.</b>	<b>BULGULAR</b>	<b>51</b>
4.1	Bağımsız Amut Sentezi İçin Yeterli Bir Genetik Algoritma	51
4.1.1	Başlangıç Nüfusu	51
4.1.2	Veri Azaltma	51
4.1.3	Ölçekler	52
4.1.4	Algoritma	52
4.2	Algoritmanın Başarımı	53
4.2.1	Benzeşim Süresi	53

4.2.2	Sabit Birey: Tork, Rotatum, ve Aç	56
4.2.3	En İyi Birey: Tork, Rotatum, ve Aç	58
4.2.4	En İyi Birey: Yer Tepki Kuvvetleri	59
4.2.5	Benzeşim Başarımları	61
4.2.6	Pareto Cephe	66
<b>5.</b>	<b>TARTIŞMA</b>	<b>77</b>
5.1	Literatürde Hareket Sentezi	77
5.2	İnsan Hareketi Sentezinde Önyargı	79
5.3	Amut Sentezinin Eniyileştirme Hedefi	81
5.4	Model Tasarımı	82
5.5	Benzeşim	83
5.6	Genetik Algoritma Tasarımı	83
5.6.1	Başlangıç Popülasyonu	83
5.6.2	Eğri Ara Değerlemesi	84
5.6.3	Simülasyon Yazılımı ve Donanımı	84
5.6.4	Çözüm Sayısı	85
5.6.5	Yöntemin Olası Diğer Hareketlere Uyarlanması	85
5.7	Çıktılar	85
5.7.1	(Henüz) Gerçekleştirilmeyen Hareketler	86
5.7.2	Bir Alt Problem Olarak Takipsel Hareket Sentezi	86
<b>6.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER</b>	<b>87</b>
6.1	Gelecek Çalışmalar için Öneriler	87

	xii
6.2 Genetik Algoritmalarla Hareket Sentezi için Biçimsel bir Başlangıç	88
<b>7. KAYNAKLAR</b>	90
<b>8. EKLER</b>	97
<b>EK-1. Sözlük</b>	98
<b>EK-2. Eniyileştirme</b>	100
<b>EK-3. Koşular</b>	102
<b>EK-4. Etik Kurul İzin Belgesi</b>	110
<b>EK-5. Orijinallik Raporu</b>	111
<b>EK-6. Dijital Makbuz</b>	113
<b>9. ÖZGEÇMİŞ</b>	114

## ŞEKİLLER

2.1	Yerel Maksimum	4
2.2	Küresel Maksimum	5
2.3	Genetik Algoritma Akış Şeması	17
3.1	Veri Akışı	18
3.2	Genişletilmiş Genotip Verisi	19
3.3	Genişletilmiş Fenotip Verisi	20
3.4	Model Parametreleri	21
3.5	Model Eylemsizlik Sensörü	22
3.6	Model Varyasyonu	22
3.7	Model Temas Konfigürasyonu	23
3.8	Model Başlangıç Pozisyonu	24
3.9	Model 1. Kısım	25
3.10	Model 2. Kısım	26
3.11	Model 3. Kısım	27
3.12	Model 4. Kısım	28
3.13	Çapraz Geçiş	36
3.14	Kes ve Doldur	37
3.15	Silme	38
3.16	Yerleştirme	39

3.17 k-nokta Çapraz Geçiş	41
3.18 TNV - Tek Nükleotid Varyasyon	42
3.19 Düzenli Çapraz Geçiş	43
3.20 Ara Değerlemeli Silme	45
3.21 Ara Değerlemeli TNV	46
3.22 Ara Değerleme Örneği	49
4.1 Ortalama Benzeşim Süreleri	55
4.2 Toplam Benzeşim Süreleri	55
4.3 Benzeşim Adımları, El Teması	56
4.4 Sabit Bireyin Tork ve Açı Değerleri	57
4.5 Sabit Bireyin Rotatum Değerleri	57
4.6 Bulunan En İyi Bireyin Tork ve Açı Değerleri	58
4.7 Bulunan En İyi Bireyin Rotatum Değerleri	59
4.8 Yer Tepki Kuvvetleri	60
4.9 Yer Tepki Kuvvetlerinin Toplamı	61
4.10 Benzeşim Başarımları	62
4.11 Denge Ölçeği Sıklık Grafiği	63
4.12 Denge Ölçeği Tekli Isı Haritası	64
4.13 Denge Ölçeği Isı Haritası	65
4.14 KMNİ Ölçeği Isı Haritası	66
4.15 Bütün bireyler	67

4.16 Yakınlaşınca görünen başarılı bireyler	68
4.17 Başarılı bireyler başarısız bireylerden ayrılıyor	69
4.18 Pareto cephe ve komşuluğundaki başarılı bireyler	69
4.19 Son Nesil Pareto Cephesi	70
4.20 Son nesil Pareto cephesi ve ona yaklaşabilen bireyler	71
4.21 En iyi bireyin ölçek değerleri	72
4.22 Benzeşim Modelinin Görüntüsü - 1. Koşu	73
4.23 Benzeşim Modelinin Görüntüsü - 2. Koşu	74
4.24 Benzeşim Modelinin Görüntüsü - 3. Koşu	75

**TABLÖLAR**

2.1	Literatürde karşılaşılan hareket sentezi yöntemleri	9
4.1	Algoritma	53



## 1 GİRİŞ

Spor Biyomekaniği, genel olarak insan hareketine odaklı bir çalışma alanıdır. Sporcuların gerçekleştirdikleri ya da gerçekleştirmek istedikleri hareketlerin gerekliliklerini veya sonuçlarını da inceleyen bu alanın en önemli konularından biri sporcuya özgü en iyi tekniklerin tespiti sayılabilir (Glazier ve Mehdizadeh (1)). Bunun için çeşitli modelleme, benzeşim ve eniyileştirme yöntemleri araştırılmakta ve geliştirilmektedir.

Bazı çalışmalarda katı cisimler ve bunların arasına yerleştirilen eyleyicilerle modellenen sporcular, bazı çalışmalarda ise kas-iskelet sistemleri ile modellenmektedir. Kas-iskelet modelleri gerçekçiliği artırmakta, fakat modeli karmaşıktırarak hesaplamaları yavaşlatmaktadır.

Eniyileştirme için deneysel hareketler takip edilebildiği gibi hiç bir deneysel veri kullanılmadan hareket sentezlenmesi de mümkündür. Bunlar sırasıyla takipsel ve tahminsel benzeşimler olarak adlandırılır. Bu çalışmada eniyileştirme sırasında deneysel verilere başvurulmadan tahminsel hareket sentezi gerçekleştirilecektir. Bu nedenle problemi basitleştirerek daha hızlı sonuç alabilmek adına insan modelimiz katı cisimler ve bunları hareket ettiren eyleyiciler olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada eniyileştirme problemi olarak tanımlanan insan hareketlerini sentezlemek için bir yöntem önerisi sunulacaktır. Yöntemin dayanağı, oldukça temel bir gözlemden doğmaktadır. Émile Borel (2), bir milyon maymunun günde on saat bir daktilonun tuşlarına bastığında, zaman içerisinde *hemen hemen kesinlikle* bir kütüphanedeki kitapların her birini sırasıyla yazabileceğine işaret etmiştir. Sonsuza kadar devam edebilecek böyle bir serüvenin, *rastgeleden daha makul* bir yöntemle *makul sürede* tamamlanabileceği öngörülmektedir. Başka bir ifadeyle, bir eniyileştirme çözümü yöntemi olarak genetik algoritmaların, hareket sentezi amacıyla pratik anlamda kullanılabilmesi öngörülmektedir.

Hareket tanımı olarak bir eniyileştirme hedefi tasarlandıktan sonra bu tanım hipotezini test etmek için eniyileştirmeye yönelik benzeşimler gerçekleştirilecek, ve bu benzeşimlerin başarımına göre önerilen tanımın istenilen hareketi gerçekleştirebileceği gösterilecektir. Dikkat edilmesi gereken nokta; bir eniyileştirme hedefine yönelik

benzeşimlerin istenilen hareketi gerçekleştirememesinin, bu hedefin yanlış olduğu anlamına gelmemesidir. Başka bir deyişle bu çalışma, herhangi bir hareket tanımının *gerekli ve yeterli* olduğuna dair bir iddiada bulunmamaktadır. İki farklı tanım yoluyla aynı harekete ulaşılabilsede bu tanımlardan biri hareketin sentezi için yeterlidir. Geliştirilen yöntem kullanılarak hareketi gerçekleştirmek için *yeterli* bir tanımın bulunabilmesi hedeflenmektedir. Böylece yeterli bir hareket tanımı verildiğinde önerilen yöntemin insan hareketi sentezi yapmak için kullanılmasının mümkün olduğu gösterilmiş olacaktır.

Önerilen yöntem herhangi bir sporcunun herhangi bir hareketinin sentezlenebileceği iddiasında olmamasına rağmen; yöntemin -bir çok diğer yöntem gibi- belirli *koşular* sonucunda başarıya ulaşabileceği, ve yöntemin daha da geliştirilebileceği öngörülmektedir.

### 1.1. Hipotez

Genetik algoritmalarla ileri dinamik benzeşim yönteminin tekrarlı uygulanması sonucunda katı cisimler ve eklemlerle tasarlanmış bir insan modelinin amut hareketini gerçekleştirmesi sağlanabilir.

### 1.2. Kısıtlamalar ve Varsayımlar

İnsan hareketinin bir çok bileşeni vardır. Hareketin gerçekleşmesini sağlayan nörofizyolojik bileşenlerin yanında harekete etki eden insan vücudunun yumuşak doku özellikleri, eklem yapısı gibi diğer bir çok bileşen de bulunmaktadır. Bu çalışmanın yöntemleri arasında modelleme ve benzeşim yer aldığı için bu adımları basitleştirmek adına, bu bileşenler göz ardı edilmektedir. Kullanılan insan modeli, vücut üyelerini katı cisim olarak kabul etmektedir. Ayrıca eklemleri basit menteşe eklemler olarak modellemekte, oldukça karmaşık bir kas sistemi yerine hareketi eyleyiciler aracılığıyla oluşturmaktadır. Bu yöntemin kas sistemi kullanan çalışmalara benzer sonuçlar verebileceği düşünülmektedir (Jiang ve ark. (3)).

Yöntemin uygulanabilmesi için sporcu modelinin eklem hareket ve kas kuvvet sınırları ile vücut kütle kompozisyonunun hesaba katılması gerekmektedir. Belirli bir sporcuya yönelik olmayan çalışmada, bu sınırlamalar gerçekçi fakat oldukça genel bir şekilde belirlenmiştir: Bu değerlerin çalışma kapsamında belirleyici olmadığı varsayılmaktadır.

Teorik bir kısıtlama olmasa da araştırma yöntemi, çok sayıda benzeşim gerçek-

leştirilmesini gerektirdiği için bir zaman kısıtlaması da getirmiştir. Saatler, bazen de günler boyunca süren koşular araştırmanın derinleştirilebilmesinin önündeki en büyük engel olmuştur.

### 1.3. Akış

Genel bilgiler bölümünde (bölüm 2) öncelikle tez boyunca sıklıkla kullanılan *eniyileştirme* kavramına bir giriş yapılacak, sonra insan hareketi benzeşim modellemesi konusuna değinilecektir. Bölümde ayrıca hareket sentezi gerçekleştiren literatür özetlendikten sonra literatürde hareket sentezi üzerine yapılan çalışmalar gözden geçirilecektir. Son olarak da eniyileştirme yöntemlerinden biri olan Genetik algoritmalar hakkında genel bir bakış sunulacaktır.

Yöntem bölümünde (bölüm 3) öncelikle yöntem üzerine bir özet aktarılacaktır. Ondan sonra tezde kullanılan insan hareketi modeli açıklanacaktır. Daha sonra bölümde eniyileştirme aşamasını yöneten programlar tanıtılacak, genetik algoritmaların tezdeki uygulaması hakkında bilgiler sağlanacaktır. Genetik algoritma tasarımı açıklanacak, çeşitli koşular halinde gerçekleştirilen araştırmanın akışı gözden geçirilecektir.

Bulgular bölümünde (bölüm 4) oluşturulan genetik algoritmanın tasarımının çalışma içerisinde elde edilen bulgular çerçevesinde gelişimi açıklanacaktır. Bölümde ayrıca söz konusu algoritmayla gerçekleştirilen başlıca koşuların analizi de bu bölüm altında işlenecektir.

Tartışma bölümünde (bölüm 5) bulgular literatür çerçevesinde tartışılacak, önyargı kavramı tanımlanacaktır. Çalışmada uygulanan yöntemlerin tartışılması ile bölüm sona erecektir.

Sonuç ve öneriler bölümünde (bölüm 6) tezde elde edilen sonuçlar özetlenecek, sonraki çalışmalar için önerilerde bulunulacaktır.

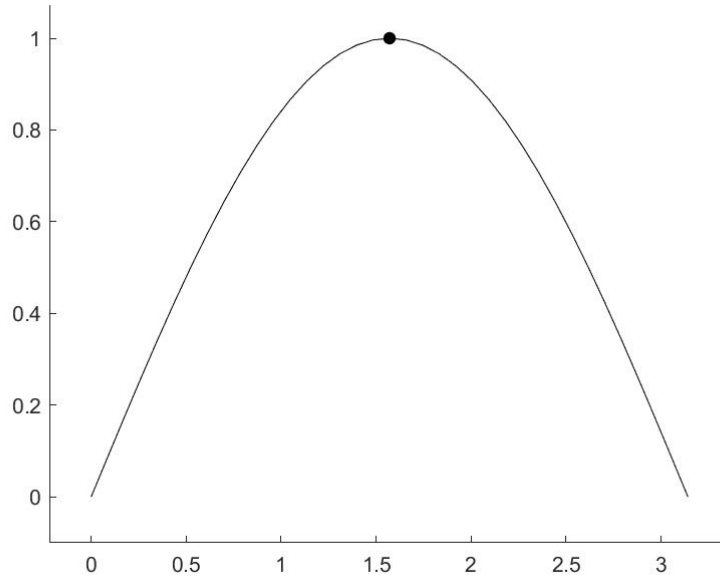
## 2 GENEL BİLGİLER

### 2.1. Eniyileştirmeye Giriş

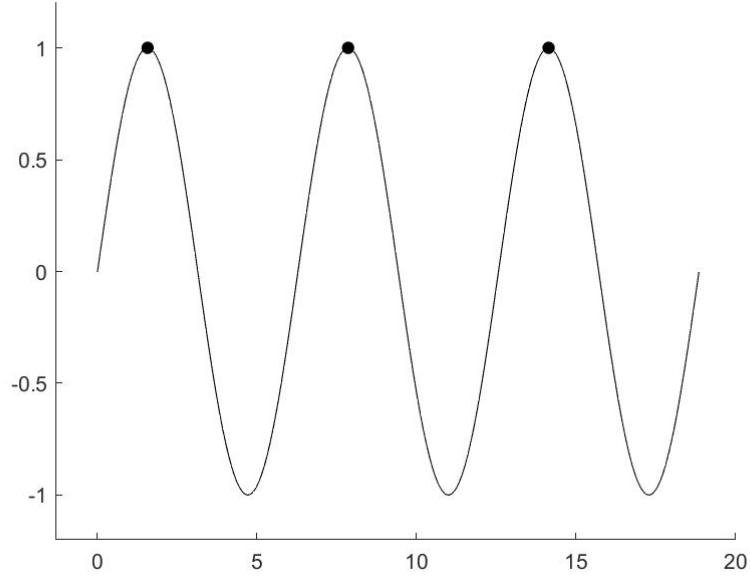
Bu bölümde eniyileştirme kavramına genel bir giriş yapılacak olup, eniyileştirmenin tez kapsamındaki biçimsel tanımlaması için ise EK-2 hazırlanmıştır.

Bir fonksiyonun görüntü kümesinde alabileceği en büyük değer *maksimum*, en küçük değer ise *minimum* olarak tanımlanmaktadır. Maksimum ve minimum değerlere ise büyüklüğünden bağımsız olarak *eniye* ya da kısaca *optimum* denilmektedir.

Eğer bir eniyi, fonksiyonun tanım kümesi içinde eniyi değer ise *küresel eniyi* (Şekil 2.2), tanım kümesinin bir alt kümesi içerisinde eniyi değer ise *yerel eniyi* denilmektedir (Şekil 2.1). Bu tanımlardan anlaşılacağı üzere küresel eniyiler aynı zamanda bir yerel eniyidir.



Şekil 2.1:  $\sin(x)$  fonksiyonu  $(0, \pi)$  aralığında tek bir yerel maksimuma sahiptir.



Şekil 2.2:  $\sin(x)$  fonksiyonu  $(0, 6\pi)$  aralığında üç adet global maksimuma sahiptir. Bu noktalar aynı zamanda birer yerel maksimumdur.

*Eniyileştirme* ya da *optimizasyon* ise bir fonksiyonun görüntü kümesinde alabileceği eniyi değeri almasını sağlayan parametreleri bulmak olarak tanımlanabilir. Eniyileştirilmek istenen fonksiyonun birden fazla eniyisini bulmayı amaçlayan eniyileştirme sürecine ise *çok doruklu eniyileştirme* denilmektedir.

Şu ana kadar yaptığımız tanımlamalarda eniyileştirme fonksiyonunun görüntü kümesini reel sayılar olarak düşünebiliriz. Eğer fonksiyonumuzun görüntü kümesi birden fazla boyutlu bir uzay olsaydı, her bir eksen ayrı ayrı birer eniyileştirme hedefi olabilirdi. Aynı anda birden fazla değer için eniyileştirme yapma sürecine ise *çok amaçlı eniyileştirme* denilmektedir. Bu durumda her bir eniyileştirme değeri *eniyileştirme ölçüğü* olarak adlandırılabilir.

Çok amaçlı eniyileştirme problemlerinin tek bir çözümü olmayabilir. Çok amaçlı eniyileştirme, potansiyel olarak birbiriyle çatışan eniyileştirme ölçükleri tarafından sınırlandırılmış bir eniyileştirme çeşididir. Örneğin bu tez yazılırken

- anlaşılabilirlik,
- kapsayıcılık,
- zaman,

parametreleriyle belirlenen bir yazım sürecinden geçmektedir. Bu süreci bir eniyileştirme süreci olarak düşünürsek bu parametrelerin birbirleriyle çatışan rollere sahip olduklarını görebiliriz:

- anlaşılabilirlik hem kısa sürede yazım, hem de kapsayıcılıkla çelişir,
- kapsayıcı bir yazı ya anlaşılabilirlikten ya da yazım süresinden ödün vermek zorundadır,
- kısa sürede yazmak ise anlaşılabilirlik ve kapsayıcılık ile ters düşer.

Bu çatışmadan sıyrılmanın bir yolu, eniyileştirme ölçeklerine ağırlıklar verilerek bunları tek bir eniyileştirme ölçeğine dönüştürmektir. *Ağırlıklı ölçeklendirme* olarak anacağımız bu yöntem ağırlık değerlerine bağlı olduğu için kısıtlı bir uygulama alanı vardır. Diğer bir yol ise *Pareto eniyileştirme* adı verilen yöntemdir. Bu yöntemde, çözüm adaylarının bütün eniyileştirme ölçekleri hesaplanır ve bu ölçeklere göre adayların *Pareto baskınlıkları* değerlendirilir.

## 2.2. İnsan Hareketi Modellemesi

İnsan hareketi, insan bedeninin ya da bedeninin bir kısmının çeşitli kabuller çerçevesinde matematiksel denklemlerinin oluşturulması yoluyla modellenabilir. Bu denklemlerin yine çeşitli kabuller çerçevesinde değerlendirilmesi ise *benzeşim*, ya da *simülasyon* olarak adlandırılır.

Bu çalışmada insan bedeni, katı cisimler ve bu katı cisimlerin birbirine göre hareketlerinin basit eklem modelleri kullanılarak kısıtlandırılmasıyla modellenmiş ve benzeştirilmiştir. Ayrıca, modelleme için gereken denklemlerin elle hazırlanması yerine MATLAB/Simulink ortamında görsel programlama yoluna gidilmiştir.

Bu çalışma çerçevesinde insan hareketi, hareket için önceden belirlenmiş bir modelin eklemlerine uygulanan tork değerleri ve bu benzeşim sonucunda elde edilen eklem açıları olarak tanımlanmaktadır.

$m$  bir insan hareket modeli olsun. Bu modelin  $n$  adet eklemi

$$\mathbf{m}_e = (e^1, e^2, \dots, e^n) \quad (2.1)$$

olmak üzere, bu eklemlere

$$\boldsymbol{\tau} = (\tau^1, \tau^2, \dots, \tau^n) \quad (2.2)$$

tork dizileri uygulandığında benzeşim yoluyla

$$\alpha = (\alpha^1, \alpha^2, \dots, \alpha^n) \quad (2.3)$$

açı dizileri elde edilmiş olsun. Başlangıç pozisyonu için de

$$\alpha_0 = (\alpha_0^1, \alpha_0^2, \dots, \alpha_0^n) \quad (2.4)$$

açıları tanımlanmış olsun. Bu notasyon çerçevesinde  $\mathfrak{s}_m$  simülasyonu,

$$\mathfrak{s}_m(\alpha_0, \tau) = \alpha \quad (2.5)$$

şeklinde bir fonksiyon ile tanımlanabilir.

Dolayısıyla, başlangıç pozisyonu  $\alpha_0$  sabit olmak koşuluyla her hareket bir  $\tau$  tork vektörü tarafından belirlenmektedir. Yani model ve modelin başlangıç pozisyonu sabitlendiğinde her  $\tau$  bir hareketi temsil etmektedir.

### 2.3. Bir Eniyileştirme Problemi Olarak İnsan Hareketi

Hareket eniyileştirmesi yöntemleri kullanılarak fosil insansıların nasıl hareket ettiğine dair çıkarımlar yapılabilmektedir Nicolas ve ark. (4), Nicolas ve ark. (5).

İnsan hareketi tek başına çok genel bir kavramdır. Belirli bir hareketi tanımlamak için yürüme, koşma ya da amut kelimeleri kullanılsa da bu kavramlar da aslında oldukça genel kalmaktadır: İnsanların çoğu yürür, fakat herkesin yürüyüşü farklıdır. Hareketi gerçekleştiren bireyin fizyolojik özellikleri, yorgunluk derecesi, çevresel faktörler vb. sabitlendiğinde dahi hareketi tanımlamakta güçlük çekilebilir.

Bu tanım sorunundan sıyrılmak için bu çalışmada, hareketin amacını belirleme ve bu amaca uygun bütün hareket çeşitlerini aynı hareket sınıfı içinde değerlendirme yoluna gidilmiştir. Örneğin amut hareketi aslında insanın ağırlık merkezini yerden bildiğince uzakta tutma çabası olarak değerlendirilebilir. Sonuç olarak bu hareket sınıfının her bir elemanını bulabilmek için çalışmada çok doruklu eniyileştirme yöntemleri kullanılması zorunludur.

#### 2.3.1. İnsan Hareketi Eniyileştirmesi

Hareket eniyileştirmesi ile sporcu hareketlerinin anlaşılmasını ya da geliştirilmesini hedefleyen çeşitli çalışmalar mevcuttur Charbonneau ve ark. (6), Yin ve ark. (7), Mizutori ve ark. (8), Yeadon ve Hiley (9). Glazier ve Mehdizadeh (1) genellikle

atletlerin matematiksel modellerinde kullanılan sınırlı organizmaya bağlı kısıtlamalar (örn. vücut kütlesi, üye uzunlukları, kas gücü, eklem açı sınırları) ve küresel eniyilerin bulunmasına dair zorluklar dolayısıyla sporcuya özel eniyi spor tekniklerinin bulunmasının yakın gelecek için muhtemel olmadığını tespit etmişlerdir.

Hareket eniyileştirme için araştırmacılar bir çok yöntem kullanmıştır. Bu yöntemler eniyileştirilen hareketler, eniyileştirme hedefleri ve bu hedeflere ulaşmak için kullanılan algoritmalar açılarından farklılık göstermektedir. Bu farklılıkları özetleyen bir tablo için (bkz. 2.1)



Tablo 2.1: Literatürde karşılaşılan hareket sentezi yöntemleri

Atıf	Hareket	Eniyileştirme hedefi	Eniyileştirme yöntemi	Takipsel (K) / Tahminsel (H)
Rodrigues ve ark. (10)	Yürüme	Gövde ağırlık merkezi takip hatası ↓ Kütle merkezinin ayaklardan uzaklığı ↓	Genetik Algoritmalar	K
Noritake ve ark. (11)	Tai-Chi	Ara değerlendirme	Anahtar pozlar ile ara değerlendirme	K
Lee ve ark. (12)	Yürüme	Denge Enerji Verimliliği Hareketlilik	Çok-amaçlı evrimsel algoritmalar	H
Özyurt (13)	Yürüme	Takipsel hata ↓	Görev düzeyinde kontrol	K
Sapio ve ark. (14)	Çeşitli hareketler	Görev takip hatası ↓	Görev düzeyinde kontrol	K
Wolff ve ark. (15)	Yürüme	Fiziksel deney süresi	Genetik algoritmalar	K
Cardenas-Maciel ve ark. (16)	Yürüme	Harcanan enerji ↓	Genetik Algoritmalar	H
Khatib ve ark. (17)	Yürüme	Takipsel hata ↓ Kas çabası ↓	Görev düzeyinde kontrol	K
Cardenas-Maciel ve ark. (18)	Yürüme	Harcanan enerji	Genetik algoritmalar	K
Parker ve ark. (19)	Dört ayaklı yürümesi	Katedilen mesafe ↑	Döngüsel genetik algoritma	H
Hiley ve Yeadon (20)	Paralel barda amuttan amuta ters takla	Zirve eklem torqları ↓ Kurtulmadan önceki yatay hız ↓ Açısal momentum ↑	Benzetimli tavlama	K

Sonraki sayfada devam edecek

Tablo 2.1: Literatürde karşılaşılan hareket sentezi yöntemleri (Devamı)

Wang ve ark. (21)	Yürütme	Kütle merkezinin kattığı mesafe ↑ Baş dengesi ↑ Üst gövde oryantasyonu ↑ Tork ↓	Kovaryans Matriks Adaptasyonu	H
Agrawal ve van de Panne (22)	Sıçrama	Sıçrama yükseklığı ↑	Evrimsel stratejiler Görev düzeyinde kontrol	K
Cai ve Jiang (23)	Yürütme	Katedilen mesafe	Genetik algoritmalar Evrimsel stratejiler Parçacık Sürü Eniyileştirilmesi Diferansiyel Evrim Sıfır Moment Noktası	H
Huchez ve ark. (24)	Asimetrik barda geçiş	Kütle merkezinin bara olan uzaklığı ↑	Çok başlangıçlı gradyan iniş	K
Gehring, Christian ve ark. (25)	Dört ayaklı yürütmesi	Yer tepki kuvvetleri ↓	Doğrudan prensip öğrenimi	H
Koco ve ark. (26)	Dört ayaklı yürütmesi	Katedilen mesafe başına harcanan enerji ↓ Ortalama hız ↑	Genetik algoritmalar	H
Hiley ve ark. (27)	Atlama tahtasında ileri atlama	Çeşitli hedefler	Genetik Algoritmalar	K
Felis ve Mombaur (28)	Yürütme	Adım boyu başına aktif eylem ↓ Açısal momentum ↓ Baş açılma hızları ↓ Adım süresi ↓	Doğrudan çoklu atış	H

Sonraki sayfada devam edecek

Tablo 2.1: Literatürde karşılaşılan hareket sentezi yöntemleri (Devamı)

Manglik ve ark. (29)	Sakat dört ayaklı yürütmesi	İleri doğru katedilen mesafe ↑ Yatay olarak katedilen mesafe ↓	Genetik algoritmalar	H
Nygaard ve ark. (30)	Dört ayaklı yürütmesi	Hız ↑ Denge ↑	Evrimsel algoritmalar	H
Raj ve ark. (31)	Yürütme	Harcanan enerji ↓ Sıfır moment noktası uyumu ↑	Genetik algoritmalar	H
Yang ve ark. (32)	Merdiven çıkma	Sıfır moment noktası ↓ Hız ↑ Enerji ↓	Genetik algoritmalar	H
Gidley ve ark. (33)	Pedal çevirme	Metabolik maliyet ↓ Pürüzsüzlük ↓ Kas kuvveti türevi ↓ Stres ↓ Kas aktivasyonu ↓	Benzetimli tavlama	H
Kidziński ve ark. (34)	Engelli koşu	Katedilen mesafe ↑	Derin destekli öğrenme	H
Yu ve ark. (35)	Yürütme	Ortalama hız hedefi hatası ↓ Denge ↑ Kullanılan enerji ↓	Derin destekli öğrenme	H
Abdolhosseini (36)	Yürütme Merdiven çıkma	Simetri ↑	Derin destekli öğrenme Müfredat öğrenmesi	H
Lee ve Park (37)	Dört ayaklı yürütmesi	İz takip hatası ↓	Zaman-bağımlı genetik algoritma	H

Sonraki sayfada devam edecek

Tablo 2.1: Literatürde karşılaşılan hareket sentezi yöntemleri (Devamı)

Yeadon ve Hiley (9)	Atlama tahtasından takla	Hedef poz oryantasyon hatası ↓	Benzetimli tavlama	K
Zahn ve ark. (38)	Yürüme	İleri yönde hız ↑ Gövde salınımı ↓	Genetik algoritmalar	K
Kon ve Sahin (39)	Sakat dört ayaklı yürümesi	Eksenlere göre katedilen mesafe ↑, ↓ Dönme ↓	Genetik algoritmalar	K
Kang ve Lee (40)	Yürüme	Dik durma hatası ↓ Yatay hareket ↓ Tork ↓	Sonlu durum makinesi Derin destekli öğrenme	H
Yin ve ark. (7)	Yüksek atlama	Görev tamamlanması ↑ Doğallık ↑ Yenilikçilik ↑ Açısal hızlar ↓ Güvenlilik ↑	Müfredat öğrenmesi Derin destekli öğrenme	H
Davidson ve ark. (41)	Ağrılık kaldırma	Rahatsızlık ↓ Toplam eklem torku ↓ Eklem başına maksimum tork ↓	Ağrılıklı ölççekler Bilinmiyor (Ticari yazılım)	K
Li ve Fey (42)	Yürüme	Adım mesafesi başına metabolik enerji ↓ Tüm-vücut açısal momentum ↓ Kas aktivasyonu ↓	Hesaplanmış Kas Kontrolü Ağrılıklı ölççekler	K
Park ve ark. (43)	Pedal çevirme	Harekete özgü bir hedef ölççeği ↓	Doğrudan tanzim	K

Sonraki sayfada devam edecek

Tablo 2.1: Literatürde karşılaşılan hareket sentezi yöntemleri (Devamı)

Park ve ark. (44)	Yürüme	Baş stabilizasyonu ↑ Adım uzunluğu hedefi takip hatası ↓ Hız hedefi takip hatası ↓ Kullanılan enerji ↓	Derin destekli öğrenme	K
Vice ve ark. (45)	Altı ayaklı yürümesi	Hız ↑ Denge ↑	Evrimsel Algoritmalar	K
Xu ve ark. (46)	Yürüme	İleri yönlü hız ↑ Diklik ↑ İleri yönlü hareket ↑ Kütle merkezi yüksekliği ↑	Derin destekli öğrenme Prensip öğrenimi Ağırlıklı ölççekler	H
Charbonneau ve ark. (6)	Takla	Hareket süresi ↓ Hedeflenen dönme sayısı hatası ↓ Tork ↓	Doğrudan çoklu atış Çoklu başlangıç yaklaşımı Ağırlıklı ölççekler	H
Zhakatayev ve ark. (47)	Yürüme Oturma Ayakta durma Yan adımlama Sıçrama	Torklar toplamı ↓	Anahtar pozlar ile ara değerlendirme	H

Tabloda son sütunda sentez sınıflandırması için tahminsel ve takipsel sentezler sırasıyla H ve K harfleri kullanılmıştır. Literatürde kullanılan takipsel ve tahminsel benzeşim kavramlarıyla karıştırılmaması gereken bu sınıflandırmanın detaylandırılması için 5.2 bölümüne bakınız.

Tez bu sınıflandırmaya göre amut hareketinin kütle merkezinin normalize integralini (KMNI) artırarak açık-döngü tork kontrolüyle genetik algoritmalarla tahminsel sentez gerçekleştirmektedir.

Gong ve ark. (48) evrimsel eniyileştirme ile yürüme sentezini konu alan çalışmaları derlemiştir. Bu çalışmada altı çizilen noktalar;

- eğim temelli eniyileştirme yöntemlerinin yüksek serbestlik dereceli bacaklı sistemler için kullanışlı olmadığı
- ağırlık katsayıları kullanılarak eniyileştirme hedefi belirlemenin rasyonel bir temeli olmadığı,
- problem temsiline ve genotip kodlamasına dikkat edilmesi gerektiği,
- grafik işlemciler ile simülasyon yapılarak hız kazanabileceği

şeklindedir.

#### 2.4. Eniyileştirme Yöntemleri

Eniyileştirme stratejilerini kabaca keşif ve faydalanma stratejileri olarak ikiye ayırabiliriz. **Keşif stratejileri** geniş bir alanda çözüm bulmayı hedefleyen stratejiler, **faydalanma stratejileri** de var olan çözüm adaylarını iyileştirmeyi hedefleyen stratejilerdir. Bu nedenle keşif stratejileri global eniyi taraması için daha uygunken faydalanma stratejileri de yerel eniyilere yakınsamak için daha uygundur (49).

Yang (50) ise çok-amaçlı eniyileştirme çözümlerinde güncel eğilimin Pareto cepheye yaklaşan evrimsel algoritmalar olduğunu tespit etmektedir. Ayrıca aynı çalışmada çok-amaçlı guguk kuşu, çok-amaçlı ateşböceği ve çok-amaçlı çiçek polenlemesi yöntemlerinin de uygunluğu belirtilmektedir.

Stork ve ark. (51) küresel eniyileştirme algoritmalarını sınıflandırmış, bir de algoritma seçim kılavuzu oluşturmuştur. Bu kılavuzda problem çözüm arazi şekline, fonksiyon özelliklerine, mevcut değerlendirme bütçesine ve hesaplama/algoritma karmaşıklığına göre sınıflandırmalar yapılmıştır.

Çözölmeye çalışılan problemin çözümler arazi şekli yazar tarafından bilinmemekle birlikte bir fiziksel benzeşim modeli kullanıldığı için “kara kutu” olarak sınıflandırılmıştır. Elbette ki deterministik bir fiziksel benzeşim, ilgili türevlenebilir denklemlerin oluşturulmasını mümkün kılmaktadır. Fakat kullanıcıların her yeni model için bu zahmetli denklemleri oluşturması beklenmediği için bu benzeşim modeli “kara kutu” olarak sınıflandırılmıştır.

Genel insan hareketi sentezi hedeflendiği için çözümler uzayının çok doruklu olduğu varsayılmıştır. Yapılan diğer çalışmalardan yola çıkarak çok hedefli bir eniyileştirme sürecine ihtiyaç olabileceği öngörölmüştür.

Mevcut değerlendirme bütçesinden bahsederken bir uçta gerçek zamanlı çözümler yer alırken diğer uçta 100 \* (değerışken sayısı)’ndan çok daha büyük bir değerlendirme uzayından bahsedilmektedir. Bu çalışmada gerçek zamanlı çözümler hedeflenmemekle birlikte örneğin 3 eklem ve 256 zaman noktası için hedeflenen  $3*256*100=76800$  benzeşim sayısı oldukça erişilebilir durumdadır. Bu nedenle çalışmanın değerlendirme bütçesi bu sınıflandırmaya göre çok yüksek sayılabilmektedir.

Dolayısıyla bu kılavuza göre; 1. çözümler arazisinin şekli bilinmediği ve kara kutu eniyileştirmesi yapıldığı, 2. çok doruklu ve çok hedefli bir eniyileştirme hedeflendiği, 3. yüksek değerlendirme bütçesine sahip olduğu için nüfus temelli ya da hibrit algoritmalar önerilmektedir.

Aynı makalenin Tablo 1’ine göre nüfus temelli ve hibrit algoritmalarla örnek olarak evrimsel algoritmalar, sürü algoritmaları ailesinden parçacık sürüsü algoritması ve memetik algoritmalar verilmiştir.

Memetik algoritmalar evrimsel algoritmaların geliştirilmesiyle elde edildiği için bu çalışmanın evrimsel algoritmalarla gerçekteştirilmesi, sonraki araştırmalarda bu geliştirilen algoritmaya gerekli eklentiler yapılarak memetik algoritmaların da incelenmesi planlanmıştır.

Stork ve ark. (51) tarafından yazılan makalede başlangıç nüfusu için çeşitli bireylerden oluşan bir aday kümesi oluşturulması önerilse de bu çalışmada başlangıç hareketi bulmak zorlayıcı olmuş, tek çözümler adaylı başlangıç kümesi kullanılmıştır.

## 2.5. Genetik Algoritmalar

Genetik algoritmalar, nüfus temelli bir eniyileştirme yöntemi olarak eniyileştirme için bir çözüm adayları kümeleri oluşturur ve bu kümeyi yöneterek eniyi çözüme ulaşmayı hedefler.

İlk aşamada bir başlangıç kümesi oluşturulur. Bu küme, bu çalışmada olduğu gibi tek bir elemandan oluşabileceği gibi birden fazla elemana da sahip olabilir. İdeal durumda bütün çözüm kümesini temsil edebilen bir başlangıç kümesi tercih edilmekle birlikte bu çalışma kapsamındaki çok boyutlu çözüm uzayı bunu imkansız kılmaktadır.

Başlangıç kümesinin bir alt kümesi seçilmesiyle yeni çözüm adaylarının hangi çözüm adayları kullanılarak üretileceği belirlenmiş olur. Bu alt küme **gen havuzu** denilir. Genetik algoritmalarla ilgili araştırmalarda bu aşama için bir çok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden bir tanesi olan **elitizm**, bir önceki neslin en iyi adaylarını korumayı amaçlamaktadır.

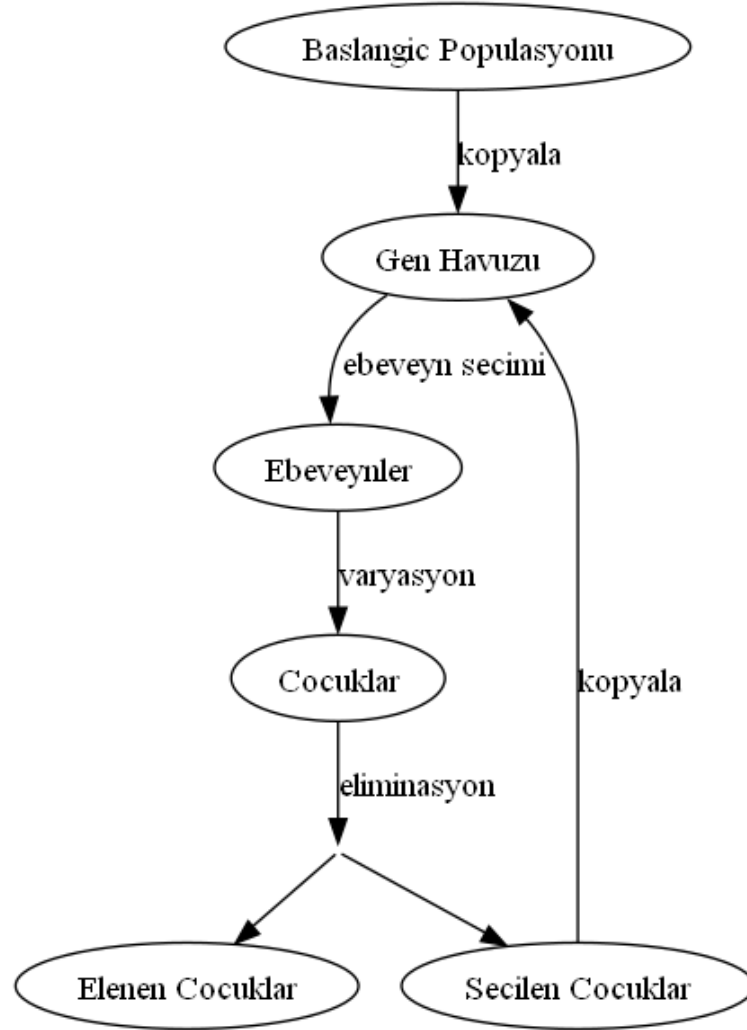
Bir sonraki aşamada ise gen havuzu da diyebileceğimiz bu ebeveyn kümesinden varyasyon operatörüne bağlı olarak alt kümeler seçilmekte, ve bu seçilen bireylerden yine varyasyon operatörleri aracılığıyla yeni bireyler üretilmektedir. Bu aşamaya basitçe **varyasyon** denir.

Varyasyon aşamasından sonra üretilen yeni bireyler **değerlendirilir**. Bu değerlendirme eyleminin bu çalışma kapsamındaki karşılığı benzeşimdir. Bu çalışmada olduğu gibi bazı algoritmalarda bazı bireyler henüz değerlendirme aşamasındayken elenir. Örneğin bir hareketin benzeşimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilemiyorsa buna karşılık gelen birey elenir.

Bu aşamadan sonra da üretilen yeni bireyler önceki nesle eklenerek hangi çözümlerin hayatta kalacağına ve bir sonraki neslin gen havuzuna aktarılacağına karar verilir. Bu aşamaya da **eliminasyon** denir.

Genetik algoritma bu aşamadan sonra gen havuzunun belirlenmesinden başlayarak tekrar yürütülür. Bu yürütmelerin her biri yeni bir **nesil** olarak adlandırılır. Genetik algoritmalar nesiller boyunca her seferinde var olan bireylerden daha iyilerinin üretilerek eniyi bireylere yakınsamayı esas alır. Genetik algoritmalar için şöyle bir akış şeması çizilebilir:





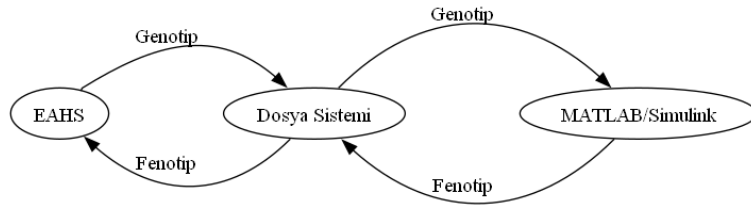
Şekil 2.3: Genetik Algoritma Akış Şeması

### 3 YÖNTEM

#### 3.1. Genel Bakış

Yöntem üç bileşenden oluşmaktadır: Modelleme, benzeşim ve eniyileştirme. İnsan hareket modeli MATLAB/Simulink (52) yazılımıyla oluşturulmuş, aynı yazılım ile benzeştirilmiştir. Eniyileştirme süreci, aynı modelin farklı eklem tork değerleriyle tekrarlı simülasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Bu sürecin yönetimi, yazar tarafından C++23 programlama dili kullanılarak yazılmış bir program EAHS (Evrimsel Algoritmalarla Hareket Sentezi) aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Tezin kalbi olan bu program, genetik algoritmalar yöntemini kullanarak her aşamada bir öncekine göre daha iyi hareket bulmayı amaçlamaktadır.

EAHS tarafından oluşturulup dosya sistemine yazılan tork verileri, MATLAB tarafından okunup Simulink ortamına aktarılmaktadır. Simulink tarafından yapılan benzeşim sonucunda elde edilen açı verileri MATLAB tarafından dosya sistemine yazılmakta ve bu veriler EAHS tarafından okunmaktadır (Şekil 3.1). Veri akışının dosyalar aracılığıyla gerçekleşmesi sayesinde sistem MATLAB'a ya da tek bir bilgisayara bağımlı olmaktan çıkmaktadır: Bu dosyaları okuyup benzeşim gerçekleştirebilen herhangi bir program ile eniyileştirme gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3.1: Veri Akışı: Genotip - fenotip dönüşümünün yazılımsal akışı

Genotip verisi, genetik algoritmalar kapsamında yalnızca tork verilerine denk gelmekle birlikte benzeşim için gereken bütün bilgiler dosya sistemine (genişletilmiş) genotip verisi olarak yazılmaktadır (Şekil 3.2).

```

17  | "genotype": {
18  |   "time": [],
276 |   "alignment": -1,
277 |   "timeout": 30.0,
278 |   "params": {
279 |     "simSamples": 256.0,
280 |     "simStart": 0.0,
281 |     "simStep": 0.01,
282 |     "simStop": 2.5500000000000003
283 |   },
284 |   "masses": {
285 |     "arms": 6.72,
286 |     "feet": 2.24,
287 |     "hands": 0.96,
288 |     "head": 5.2,
289 |     "legs": 22.64,
290 |     "trunk": 40.0
291 |   },
292 |   "contacts": {
293 |     "stiffness": 1000000.0,
294 |     "damping": 500000.0,
295 |     "transitionRegionWidth": 0.0001,
296 |     "staticFriction": 3.0,
297 |     "dynamicFriction": 2.0,
298 |     "criticalVelocity": 0.001
299 |   },
300 |   "torqueSplines": [],
440 |   "torque": []
1216 | },

```

Şekil 3.2: Genişletilmiş Genotip Verisi: Model kütleleri, benzeşim parametreleri, temas parametreleri, ve eklem torkları

Benzer şekilde fenotip verisi eklem açılımlarına denk gelmekle birlikte hesaplama kolaylığı açısından benzeşim sonucunda elde edilen bütün veriler dosya sistemine yazıldığında (genişletilmiş) fenotip verisi altında yer almıştır (Şekil 3.3).

```

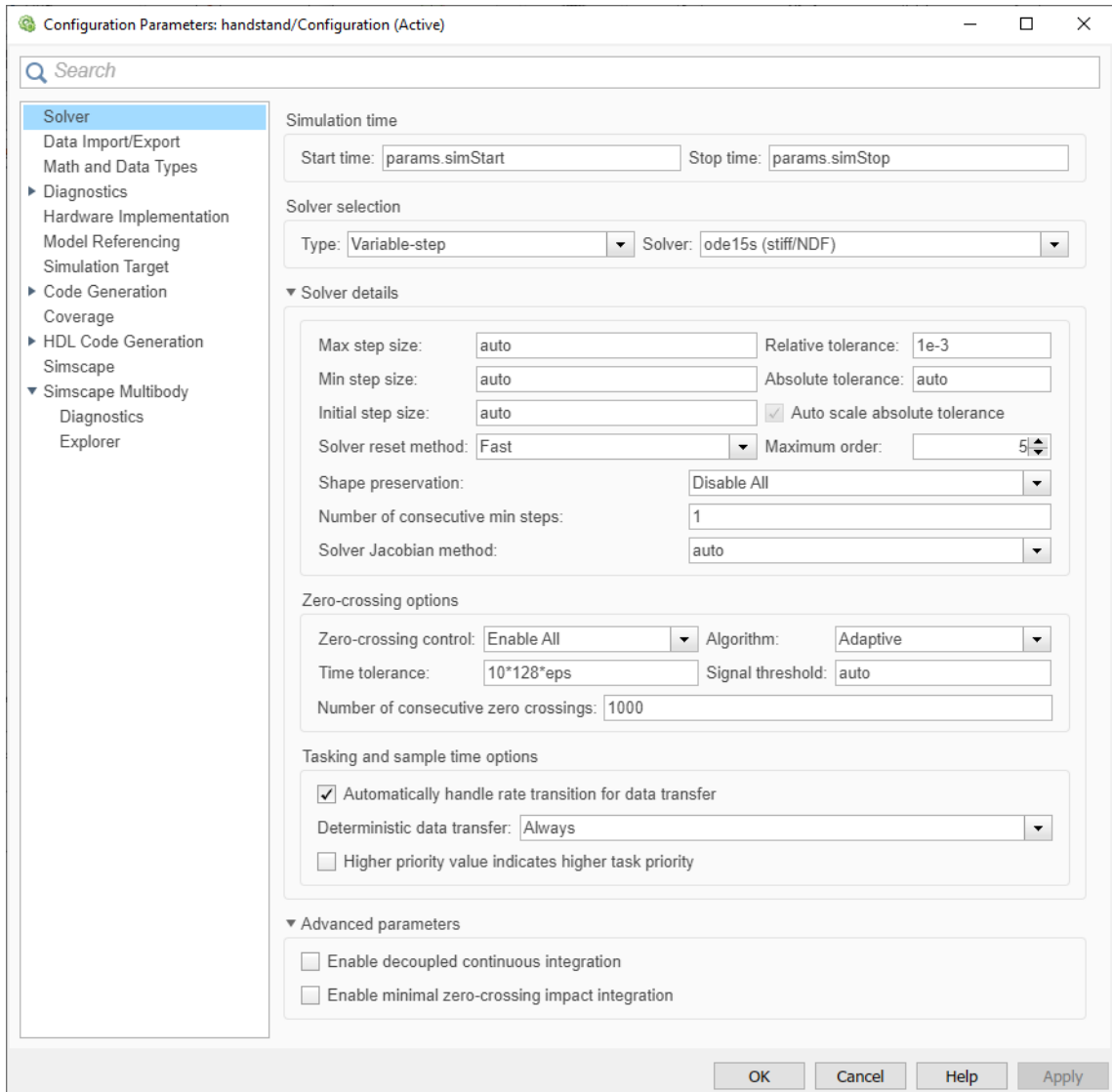
1217  [ ] "phenotype": {
1218  [ ]   "metadata": {
1219      "simulationSteps": 917.0,
1220      "totalTime": 1.2604266
1221    },
1222  [ ]   "angles": {
1223      "hip": [ ],
1481      "shoulder": [ ],
1739      "wrist": [ ]
1997    },
1998  [ ]   "outputs": {
1999      "ankleZ": [ ],
2257      "centerOfMassX": [ ],
2515      "centerOfMassY": [ ],
2773      "centerOfMassZ": [ ],
3031      "fingertipX": [ ],
3289      "fingertipZ": [ ],
3547      "heelZ": [ ],
3805      "palmX": [ ],
4063      "palmZ": [ ],
4321      "toeX": [ ],
4579      "toeZ": [ ]
4837    }
4838  }

```

Şekil 3.3: Genişletilmiş Fenotip Verisi: Eklem açıları, ölçeklerde kullanılan konum bilgileri

### 3.2. İnsan Hareket Modeli

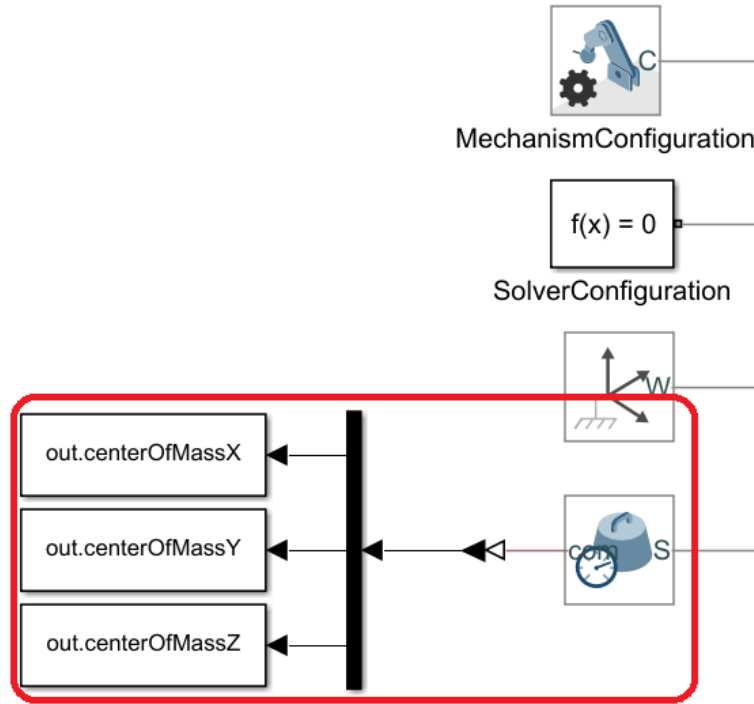
Model dahilinde temas hesaplamaları yapıldığı için katı çözüm gerektiren benzeşimde, değişken adımlı *ode15s* çözücü kullanılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Model benzeşimi için değişken adımli *ode15s* çözücüsü kullanılmıştır.

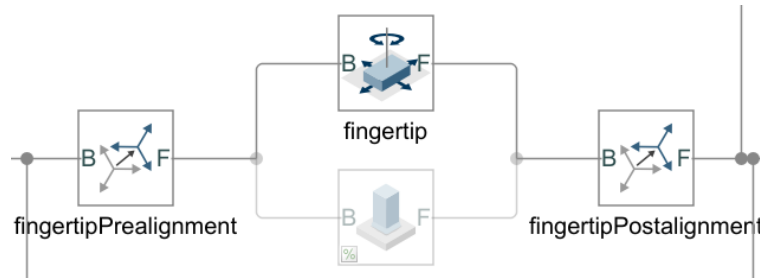
Eklem tork değerleri EAHS tarafından sabit adımli beslenen model, değişken adımli çözüldükten sonra benzeşim sonucunda elde edilen eklem açıları, ve üye konumları gibi değerler kolay işlenmesi için Simulink aracılığıyla tekrar sabit adımli hale getirilmiştir.

Ölçeklerin hesaplanmasında kullanılan kütle merkezi konumu Simulink tarafından bir eylemsizlik sensörü aracılığıyla hesaplanmıştır (Şekil 3.5, ayrıca Bkz. Şekil 3.3). El parmakları ve el bileği konumları da yine Simulink tarafından sağlanmıştır (Bkz. Şekil 3.3).



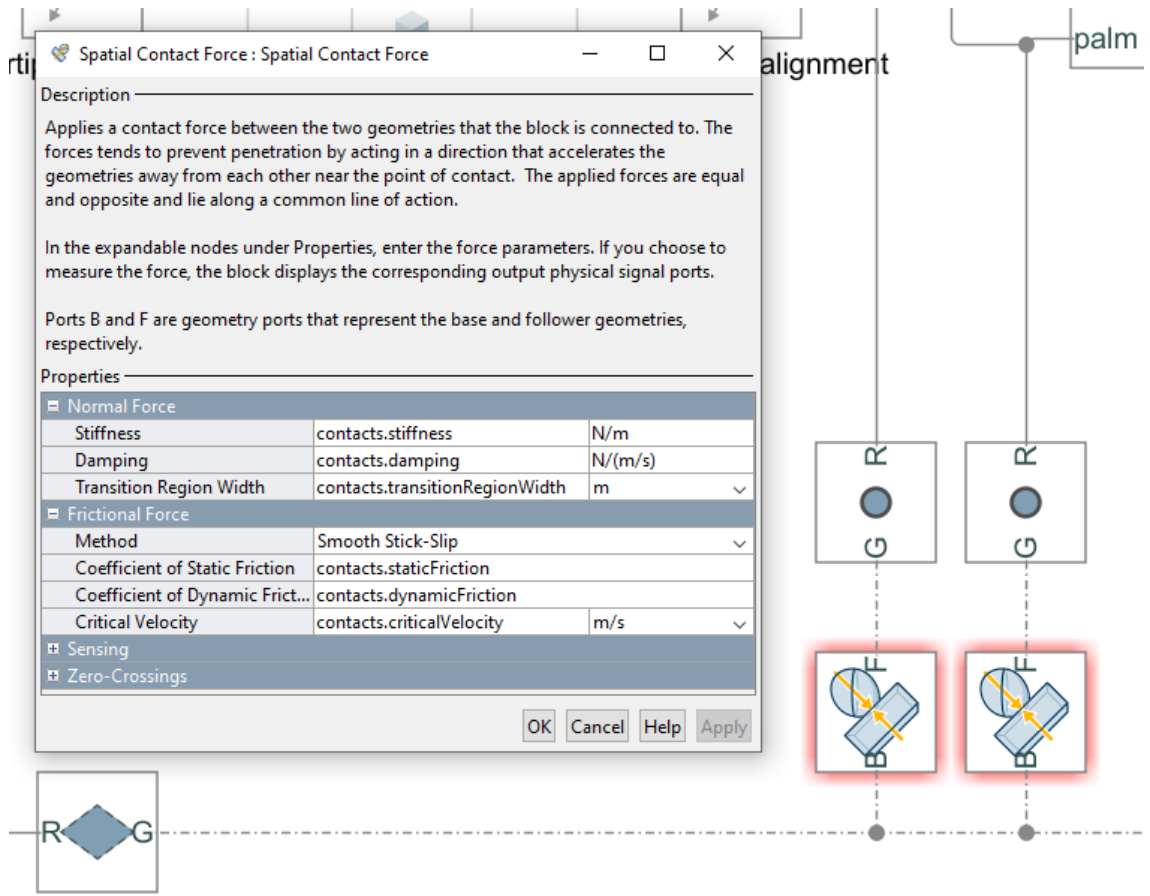
Şekil 3.5: Modelin ağırlık merkezinin konumu Simulink yazılımı tarafından sağlanan eylemsizlik sensörü aracılığıyla elde edilmiştir.

Yöntemin geçerliliğinin kestirebilmesi adına çalışma başlangıcında amut modeli parmak ucundan yere sabitlenmiştir. Bir sonraki aşamada modelin yer ile bağlantısı sadece temas noktaları olarak tasarlandığı için iki farklı model söz konusudur. Değişkenlerin azaltılması için kısıtlanmış amut modeli ile bağımsız amut modeli arasındaki tek farkın el parmak ucunun sırasıyla yere sabitlenmiş ya da yere -Simulink tarafından dikdörtgen eklem adı verilen- bir dönme, iki öteleme serbestlik dereceli eklemle bağlı olmaları sağlanmıştır (Şekil 3.6).



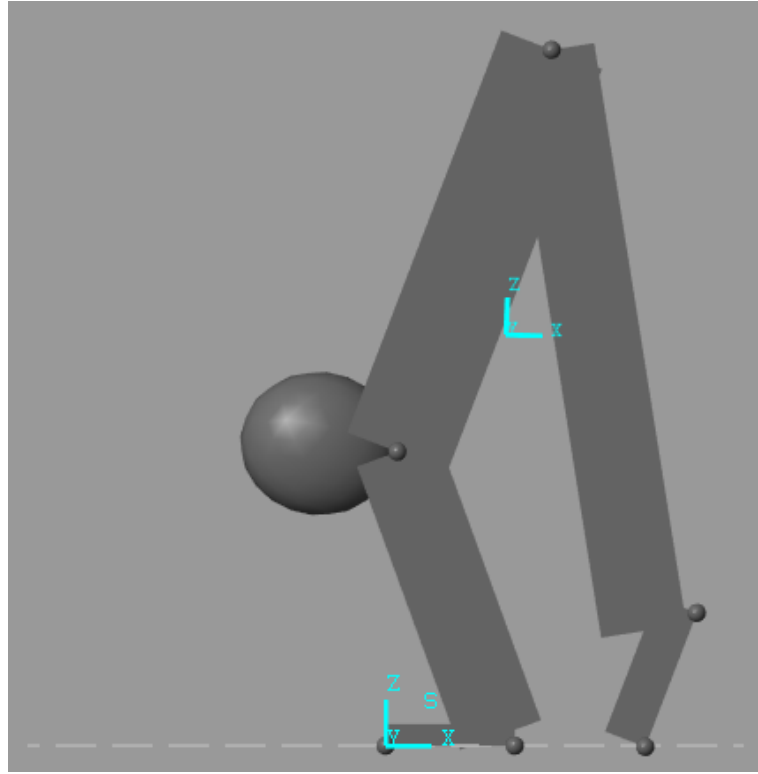
Şekil 3.6: Amut modelleri arasındaki tek fark yere bağlanma şekilleridir.

Temas benzeşimi için nokta-düzlem temas düzeneği kullanılmıştır. Temas parametreleri benzeşimin parçası olarak çözüm boyunca sabit olmak üzere yine EAHS tarafından sağlanmıştır (Şekil 3.7 ayrıca Bkz. Şekil 3.2).



Şekil 3.7: Temas hesaplama konfigürasyonu.

Bütün koşu tekrarlarında modelin başlangıç pozisyonu aynı kabul edilmiştir: Eli yere paralel ve temas halinde, ayak parmak ucu yerle temas halinde (Şekil 3.8).

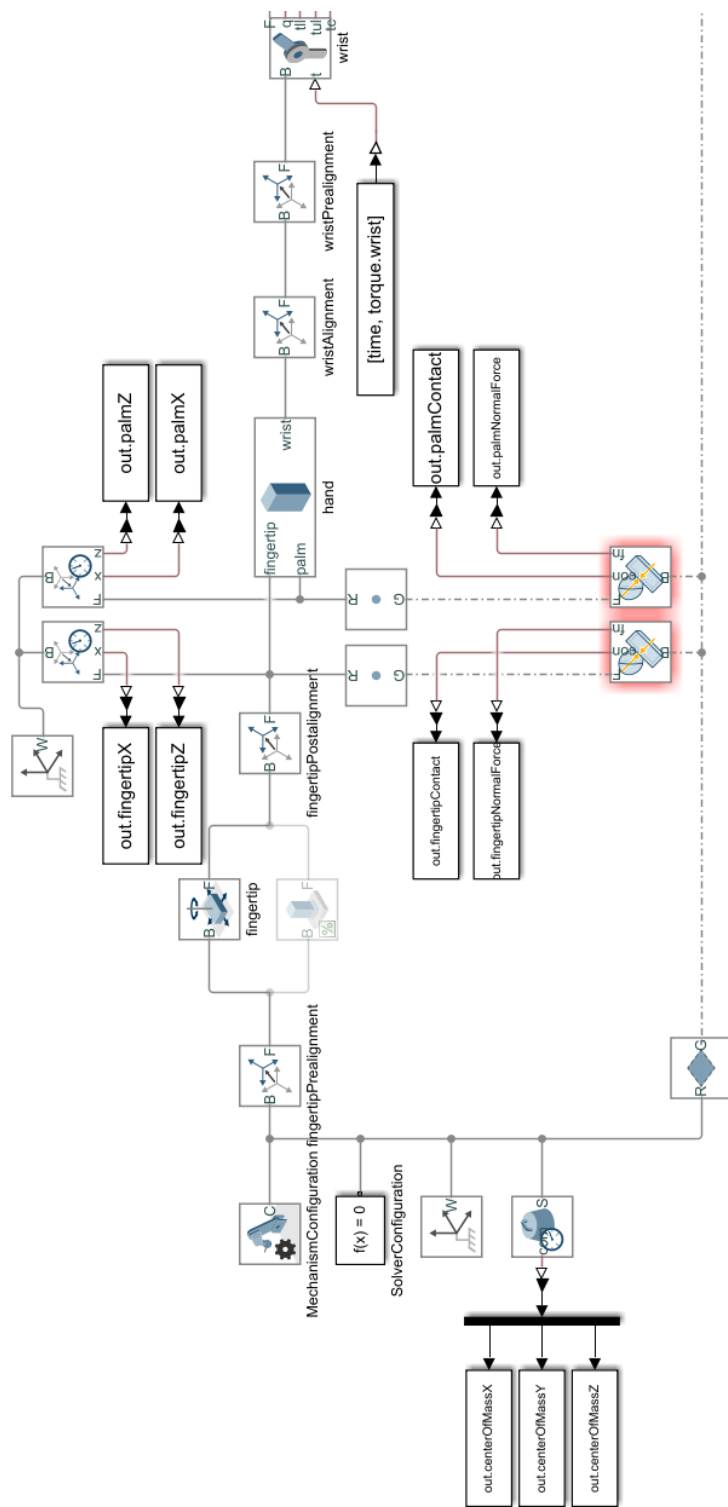


Şekil 3.8: Model başlangıç pozisyonu. Şekilde ağırlık merkezi, temas noktaları ve yer konumuyla örtüşen el parmak ucu konumu görülmektedir.

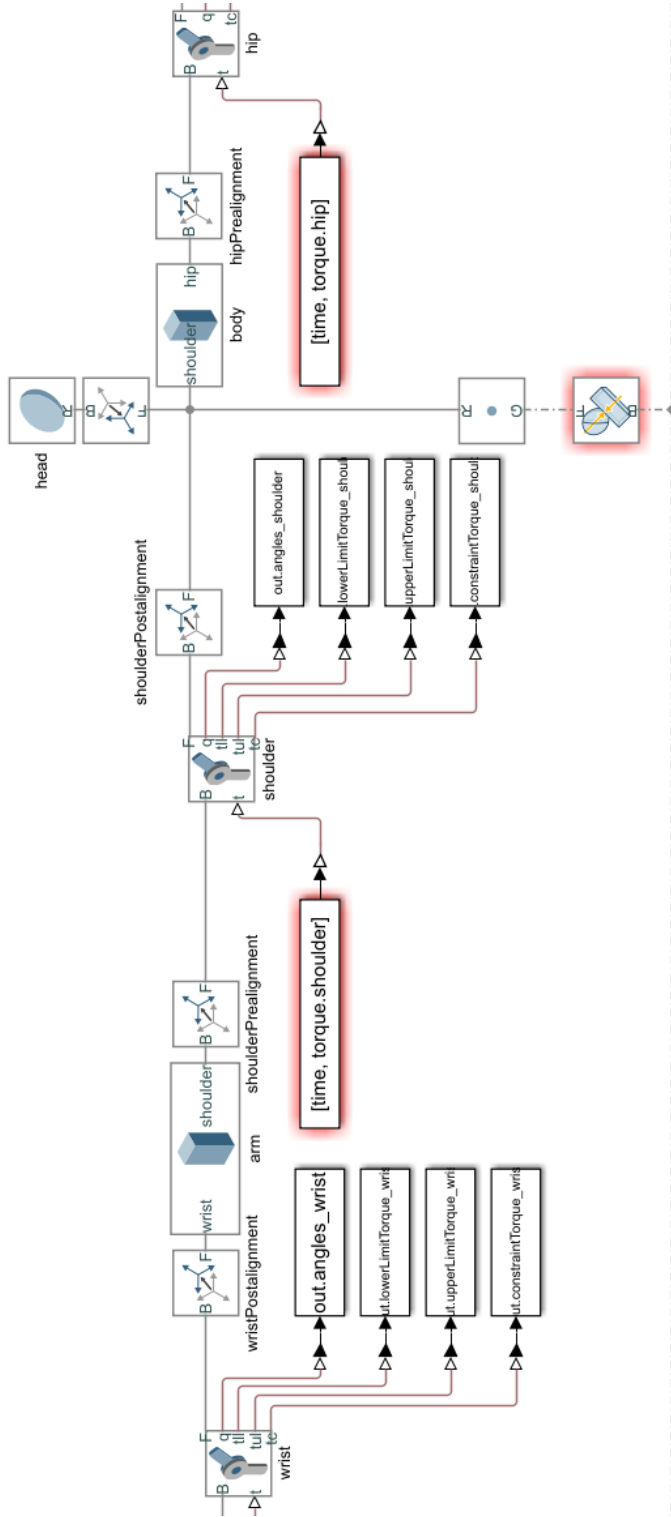
Her bir eklemin başlangıç açıları temas parametrelerinde yapıldığı gibi çözüm boyunca sabit olacak şekilde EAHS tarafından verilmiştir. Temas hesaplamaları çözümü zorlaştırdığı için bazı tork dizileri benzeşimin başarısız olmasına neden olmaktadır. Bu veriler işlenemeyeceği için hata veren benzeşimler Simulink tarafından hata mesajı aracılığıyla işaretlenmektedir.

Benzeşim modeline genel bakış için Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.11, ve Şekil 3.12 incelenebilir.

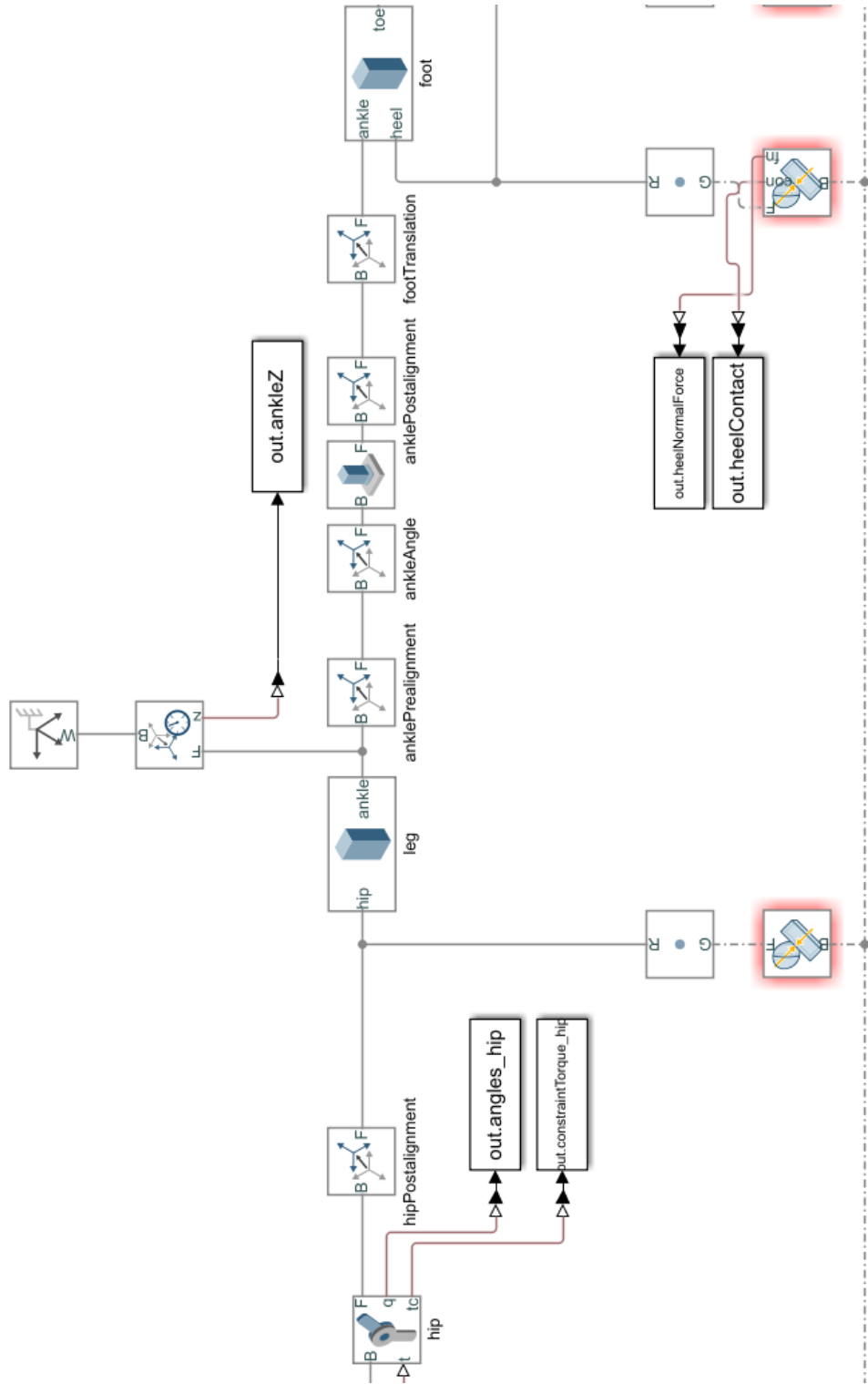




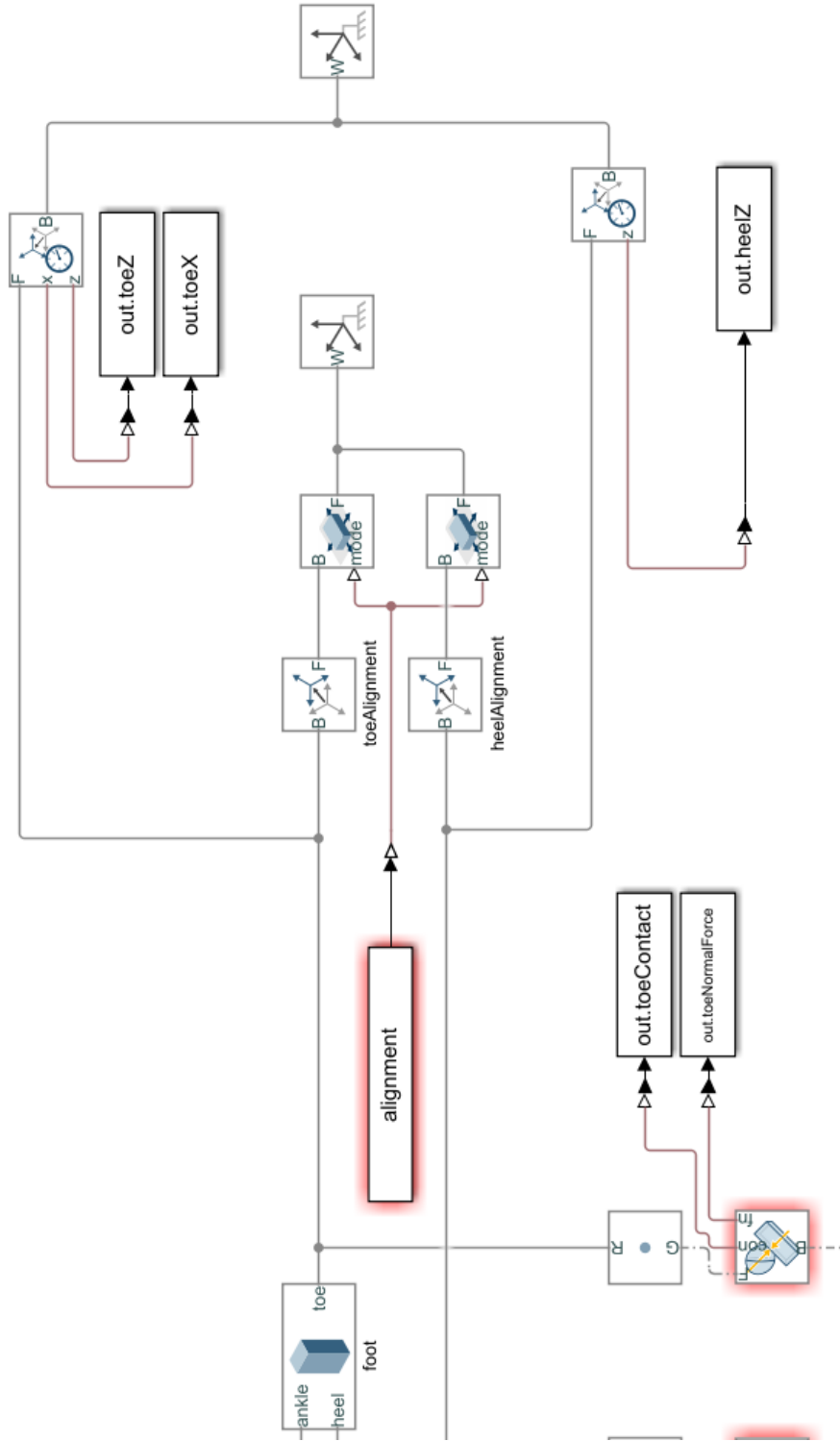
Şekil 3.9: Model 1. Kısım



Şekil 3.10: Model 2. Kısım



Şekil 3.11: Model 3. Kısım



Şekil 3.12: Model 4. Kısım

### 3.3. Model Parametreleri

Benzeşim için eklem açısı sınırları, eklem tork sınırları, temas parametreleri gibi parametreler kullanılmıştır. Bu parametreler çözüm uzayını daraltmakla beraber gerçekçiliği artırmaya da yaramaktadır.

Eklem açısı sınırları,

- bilek için (-90, 125) derece,
- omuz için (-210, 30) derece,
- kalça için (-165, 15) derece

olarak belirlenmiştir. Bütün eklemlerin açısı sınırları için kullanılan yay ve damper katsayıları ile geçiş bölgesi genişliği ise sırasıyla  $1e4 Nm/deg$ ,  $10 Nm/(deg/s)$ , ve  $0.1 deg$  olarak Simulink varsayılan ayarlarında bırakılmıştır.

Eklem tork sınırları,

- bilek için (-15, 7)  $Nm$ ,
- omuz için (-150, 350)  $Nm$ ,
- kalça için (-750, 350)  $Nm$

olarak belirlenmiştir. Bu sınırlar belirlenirken,

- 19  $cm$  el uzunluğuna sahip bir bireyin parmağının ucuyla  $1.5 kg/0.19 \equiv 7.9kg$  kütleyle sahip bir cismi kaldırdığı,
- 60  $cm$  avuç içi-omuz uzaklığına sahip bir bireyin eliyle  $15 kg/0.6 \equiv 25kg$  kütleyle sahip bir cismi yere paralel biçimde tutabileceği,
- 80  $cm$  ayak-kalça uzunluğuna sahip bir bireyin yatarken ayağıyla  $75 kg/0.8 \equiv 93kg$  kütleyle sahip bir cismi yere paralel tutabileceği

varsayılmıştır. Zirve torklar olarak tasarlanan bu değerler bireyin kendi vücut kütlelerini hesaba katınca imkansız görünmemektedir.

Temas parametreleri,

- katılık değeri  $1.000.000 N/m$ ,
- sönümleme katsayısı  $500.000 N/(m/s)$ ,
- geçiş bölgesi genişliği  $0.0001 m$ ,

- statik sürtünme katsayısı 3.0,
- dinamik sürtünme katsayısı 2.0,
- kritik hız 0.001  $m/s$

olarak belirlenmiştir.

Vücut üyeleri,

- el için [0.18, 0.20, 0.03]  $m$  uzunluklara ve 0.96  $kg$  kütleyle sahip bir dikdörtgenler prizması,
- kol için [0.42, 0.12, 0.12]  $m$  uzunluklara ve 8  $kg$  kütleyle sahip bir dikdörtgenler prizması,
- gövde için [0.60, 0.45, 0.15]  $m$  uzunluklara ve 45  $kg$  kütleyle sahip bir dikdörtgenler prizması,
- bacak için [0.82, 0.60, 0.12]  $m$  uzunluklara ve 27  $kg$  kütleyle sahip bir dikdörtgenler prizması,
- ayak için [0.06, 0.18, 0.20]  $m$  uzunluklara ve 2  $kg$  kütleyle sahip bir dikdörtgenler prizması,
- baş için [0.11, 0.06, 0.10]  $m$  yarıçaplara ve 4.5  $kg$  kütleyle sahip bir elips

olarak tasarlanmıştır. Üye kütleleri (53) kullanılarak 90  $kg$  kütleyle sahip bir insan temel alınarak hesaplanmıştır. Üye uzunlukları da 1.71  $m$  uzunluğa sahip bir insan temel alınarak Contini ve ark. (54) makalesinde önerilen yöntemle kestirilmiştir.

### 3.4. Yazılım

Tezde kullanılan yazılım sistemi yazar tarafından geliştirilmiş 4 parça yazılım ve algoritma tasarım dosyalarından oluşmaktadır:

- DEvA kütüphanesi (C++),
- MGEA kütüphanesi (C++),
- MGEA algoritma tasarım dosyası (JSON),
- MGEA örnek programları (C++),
- DDMS (MATLAB)

DEvA evrimsel algoritmalarla ilgili bir şablon kütüphanesi olarak evrimsel algoritmaların iç işleyişini soyutlamaktadır. DEvA kütüphanesini kullanan MGEA kütüphanesi ise evrimsel algoritmaların hareket sentezi için özelleştirilmesi rolünü üstlenmektedir.

MGEA aracılığıyla dosya sistemine yazılan veriler MATLAB üzerinde çalışan DDMS aracılığıyla işlenmekte ve yine dosya sistemine yazılmaktadır. DDMS'ten alınan veriler MGEA tarafından tekrar işlenmekte ve bu şekilde devam etmektedir.

DEvA kütüphanesi ve DDMS, kullanılan merkezi işlemcinin çok çekirdekli mimarisini kullanarak nüfus temelli algoritmaların avantajlarından biri olan paralel işleme uygunluklarından faydalanmaktadır. Bunun yanında DDMS benzeşimlerin birden fazla bilgisayara dağıtılarak gerçekleştirilmesi planlanarak geliştirilmiş olup bu yetisi zaman kısıtından dolayı uygulanamamıştır. Buna rağmen çok çekirdekli merkezi işlemci üzerinde paralel benzeşim gerçekleştirildiği (evrimsel algoritma açısından dönüşüm aşaması) ve evrimsel algoritmanın izin verdiği ebeveyn seçimi, varyasyon gibi aşamalarında da paralel işlem uygulandığı için bir paralel genetik algoritma uygulaması sayılabilir (Umbarkar ve Joshi (55)). Çok çekirdekli bir merkezi işlemci yerine bir grafik işlemci ya da bir bilgisayar kümesi kullanılarak bu performansın daha da iyileştirilebileceği öngörülmektedir.

Bir çok C++20 ve C++23 standart kütüphane özelliği, ve gelişmiş hata ayıklama desteği nedeniyle Microsoft Visual Studio 2022 Community Edition (v17.6) geliştirme ortamında yazılan program, VS ile birlikte gelen CMake 3.26 derleme otomasyon yazılımı ile harici kütüphaneleri yazılıma entegre etmektedir.

Algoritmanın dönüşüm aşamasında, yani benzeşimlerin gerçekleştirilerek genotiplerden fenotiplerin elde edildiği aşamada MATLAB/Simulink ortamının merkezi işlemciyi kapasitesinin altında kullandığı tespit edilmiştir.

Algoritmanın diğer aşamalarından sorumlu yazılım ise oluşturulan bireylerin dosya sistemine yazıldığı aşamalar dışında %100'e yakın merkezi işlemci kullanımına ulaşmaktadır. Genel algoritma performansına etki potansiyelinin az olması nedeniyle araştırmanın öncelikleri arasında yer almayan yazılım eniyileştirmesi uygulanmamıştır. Dolayısıyla algoritma bu açıdan bir gelişim potansiyeli taşımaktadır. Yazılım eniyileştirmesinin araştırma öncelikleri arasında yer almama nedeni, bir koşu boyunca harcanan zamanın aslen benzeşim süreci tarafından belirleniyor olmasıdır. DEvA kütüphanesinde belirlenen genetik algoritmanın bir nesil hesaplaması için kullandığı fonksiyonun yalancı kodu şu şekildedir:

```

yeniNesil= [];
if nesiller.boş() then
    yeniNesil= başlangıçNesliOluştur();
else
    genHavuzu= nesiller.son();
    yeniVaryasyonBilgileri= [];
    while yeniNesil.boyut() < lambda do
        yeterliEbeveynYok= DOĞRU;
        foreach varyasyonOperatörü : varyasyonOperatörleri do
            if yeniNesil.boyut() >= lambda then
                <döngüden çık>;
            if genHavuzu.boyut() < varyasyonOperatörü.ebeveynSayısı then
                <döngüde ilerle ve devam et>;
            varyasyonBilgisi= varyasyonOperatörü.uygula(genHavuzu);
            yeterliEbeveynYok= YANLIŞ;
            yeniGenotipler= varyasyonBilgisi.çocuklar;
            foreach yeniGenotip : yeniGenotipler do
                yeniBirey= bireyOluştur(yeniGenotip);
                yeniBirey.varyasyonBilgisi= varyasyonBilgisi;
                yeniBirey.ebeveynleriBelirle(varyasyonBilgisi.ebeveynler);
                varyasyonBilgisi.çocukKimlikleri.ekle(yeniBirey.kimlik);
                yeniNesil.ekle(yeniBirey);
            yeniVaryasyonBilgileri.ekle(yeniBirey);
        if yeterliEbeveynYok then
            <döngüden çık>;
    bireyleriDönüştür(yeniNesil);
    geçersizBireyleriSil(yeniNesil);
    bireyselÖlçekleriDeğerlendir(yeniNesil);
    if nesilSayısı != 0 then
        nesilleriBirleştir(nesiller.son(), yeniNesil);
    nesiller.ekle(yeniNesil);
    nesliSırala(nesiller.son());
    if varyasyonBilgileri.son().boş() değil then
        varyasyonlarıDeğerlendir();
    bireyleriKaydet(yeniNesil);
    nesiller.son()= yaşayanlarıSeç(nesiller.son());
    nesliSırala(nesiller.son());
    if nesiller.son.boş() then
        AdımSonucu::Tükenme değeriyle çık ;
    if yakınsamaKontrolü() then
        AdımSonucu::Yakınsama değeriyle çık;
    AdımSonucu::Belirsiz değeriyle çık;

```

**Algoritma 1:** DEvA nesil yönetim kodu



MGEA kütüphanesi, yukarıdaki akışta kullanılan fonksiyonları ve veri tiplerini tanımlayarak DEvA kütüphanesini özelleştirmektedir. Örneğin yukarıda kullanılan

- başlangıçNesliOluştur()
- bireyleriDönüştür()
- bireyselÖlçekleriDeğerlendir()
- varyasyonlarıDeğerlendir()
- yaşayanlarıSeç()
- yakınsamaKontrolü()

fonksiyonları kullanıcı tarafından MGEA kütüphanesinin kullanımıyla belirlenmiştir. Bu kullanım üç şekilde olabilmektedir:

- DEvA kütüphanesinde tanımlı genel evrimsel algoritma bileşenlerinden hangilerinin kullanılacağına belirtilmesi,
- MGEA kütüphanesinde tanımlı hareket sentezi ile ilgili bileşenlerden hangilerinin kullanılacağına belirtilmesi,
- Kullanıcı tarafından doğrudan tanımlanması

Çalışma boyunca geliştirilen ilgili fonksiyonlar uygunluğuna göre DEvA ya da MGEA kütüphanelerine eklenmiş, özellikle hareketlere özel ölçek hesaplama fonksiyonları kullanıcı tarafından programlanmıştır. Koşuların tanımlandığı programların genel akışı ise şu yalancı kod ile örneklenebilir:

```
<MGEA kütüphanesini ekle>;
HareketOluşturucu= hareketOluşturucu(<veri klasörü>, <algoritma tanım dosyası>);
hareketOluşturucu.fonksiyonlar.yaşayanlarıSeç(<fonksiyon adı>, <ilgili fonksiyon>);
hareketOluşturucu.ölçekler.bireydenHesaplamaFonksiyonları.ekle(<fonksiyon adı>,
<ilgili fonksiyon>);
hareketOluşturucu.derle();
hareketOluşturucu.lambda= <her nesilde oluşturulacak birey sayısı>;
sonuç= hareketOluşturucu.ara(<nesil sayısı>);
```

### **Algoritma 2:** Bir MGEA örnek programı

Bu tasarımda her koşu için yeni bir program derlemeden MGEA grafik arayüzü ile algoritmaların tanımlanması ve yürütülmesi hedeflenmiş, fakat zaman kısıtından dolayı bu hedefe ulaşılamamıştır. Bu tasarım geliştirildiğinde kullanıcıların çok az bir programlama ile algoritma tasarımı yapmaları mümkün olacaktır.

### 3.5. Genetik Algoritma Bileşenleri

Çalışmada insan hareket modelleri, eklem tork verileri ile beslendiğinde eklem açısı verileri ve belirli noktaların konumlarını hesaplamak için kullanılmıştır. Genetik algoritma jargonuna uyarlıysak; genotipler tork verileri, fenotipler ise açısı/konum verileri olarak kabul edilmiştir. Yani her bir birey bir hareketi temsil etmektedir.

Bireyler üretilirken tork verileri her bir eklem için önceden belirlenmiş bir üst sınır ve bir alt sınır arasında üretilmiştir. Hata veren benzeşimlere yol açan bireyler başka bir işleme tabi tutulmadan gen havuzundan silinmiştir. Yakınsama koşulu olarak maksimum benzeşim sayısı belirlenmiştir.

#### 3.5.1. Başlangıç Nesli Üretimi

Bu çalışma kapsamında **rastgele başlangıç**, belirli sayıda bireyin tork limitleri dahilinde rastgele tork değerleriyle üretilmesi anlamına gelmektedir. **Sınır değerlerle başlangıç** ise belirli sayıda bireyin sadece tork limitleri kullanılarak üretilmesi, **sıfır birey ile başlangıç** ise bütün tork değerleri 0 olan tek bir birey ile başlamak anlamına gelmektedir. Çalışmayı hedeflenen sonuca ulaştıran **sabit duran birey ile başlangıç** ise başlangıç pozisyonunu koruyan birey olarak tanımlanmıştır.

#### 3.5.2. Ebeveyn Seçimi

Bu çalışmada ebeveyn seçim yöntemleri olarak gen havuzundan rastgele bireylerin seçilmesine dayanan **rastgele seçim** ve **ölçek-oranlı seçim** yöntemleri kullanılmıştır. Ölçek-oranlı seçim, belirlenen ölçeğe göre en iyi bireyin %100 olasılıkla, en kötü bireyin ise %0 olasılıkla seçileceği şekilde doğrusal ara değerlendirme kullanılarak her bireye bir seçilme olasılığı tanımlanmasına dayanmaktadır.

#### 3.5.3. Varyasyon Operatörleri - Geleneksel Operatör Uyarlamaları

Eiben ve Smith (49) geleneksel varyasyon operatörlerini tanımlamaktadır. Fakat bu operatör tanımlarının insan hareket sentezi için birebir uygulanması mümkün değildir: Çalışmaya uygun şekilde bir uyarlama yapılmalıdır. Bu bölümde, uyarlanmış yeniden tanımlamalar yer almaktadır.

### Çapraz Geçiş

$\tau_1$  ve  $\tau_2$  iki adet tork vektörü olsun.  $\omega \in (0, 1)$  rastgele bir sayı ise,  $\tau_1$  ve  $\tau_2$ 'nin çapraz geçişi ile

$$\begin{aligned}\tau'_1 &= \tau_1 * \omega + \tau_2 * (1 - \omega) \\ \tau'_2 &= \tau_2 * \omega + \tau_1 * (1 - \omega)\end{aligned}$$

şeklinde iki adet tork vektörü üretilebilir. Buna dayanan varyasyon operatörüne **çapraz geçiş** denilir (Şekil 3.13).

### Kes ve Doldur

$\tau_1 = (t_1^1, t_1^2, \dots, t_1^N)$  ve  $\tau_2 = (t_2^1, t_2^2, \dots, t_2^N)$  iki adet tork vektörü olsun. Rastgele bir  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$  değeri için

$$\begin{aligned}\tau'_1 &= (t_1^1, t_1^2, \dots, t_1^{i-1}, t_2^i, t_2^{i+1}, \dots, t_2^N) \\ \tau'_2 &= (t_2^1, t_2^2, \dots, t_2^{i-1}, t_1^i, t_1^{i+1}, \dots, t_1^N)\end{aligned}$$

olmak üzere iki adet tork vektörü üretilebilir. Buna dayanan varyasyon operatörüne **kes ve doldur** denilir (Şekil 3.14).

### Silme

$\tau = (t^1, t^2, \dots, t^N)$  bir tork vektörü olsun. Rastgele bir  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$  değeri için

$$\tau' = (t^1, t^2, \dots, t^{i-1}, t^{i+1}, \dots, t^{N-1}, 0)$$

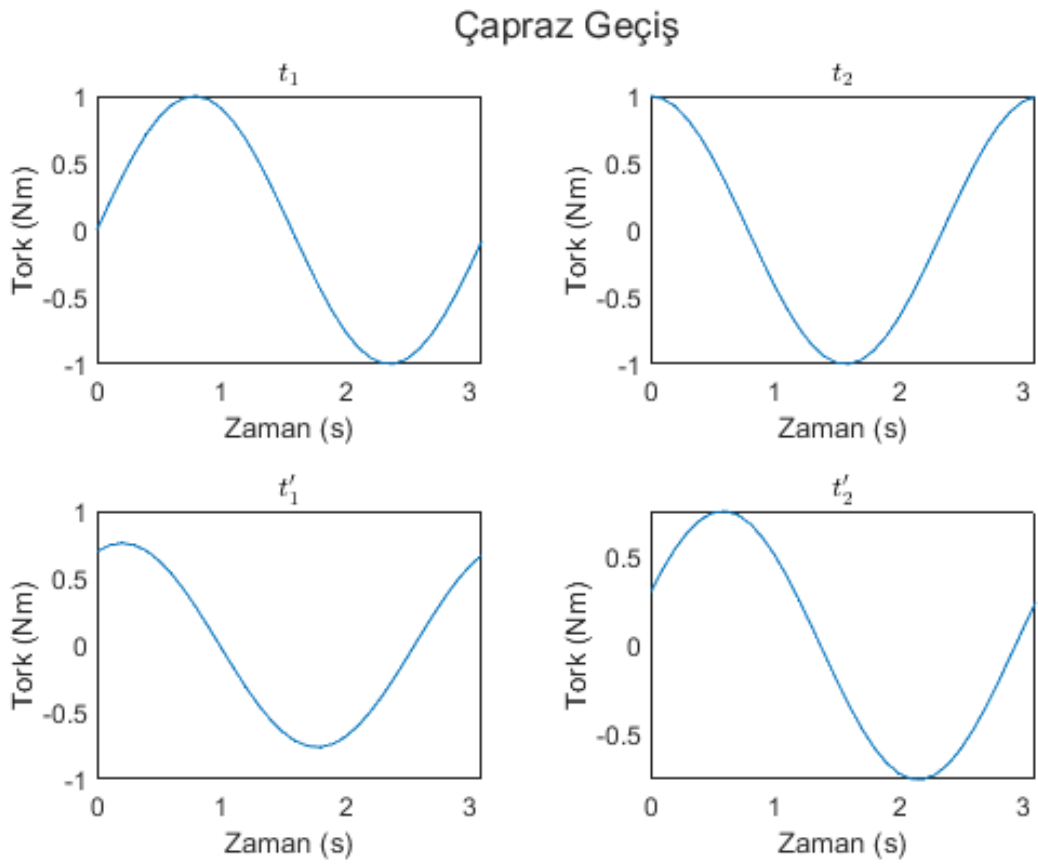
olmak üzere bir tork vektörü üretilebilir. Buna dayanan varyasyon operatörüne **silme** denilir (Şekil 3.15).

### Yerleştirme

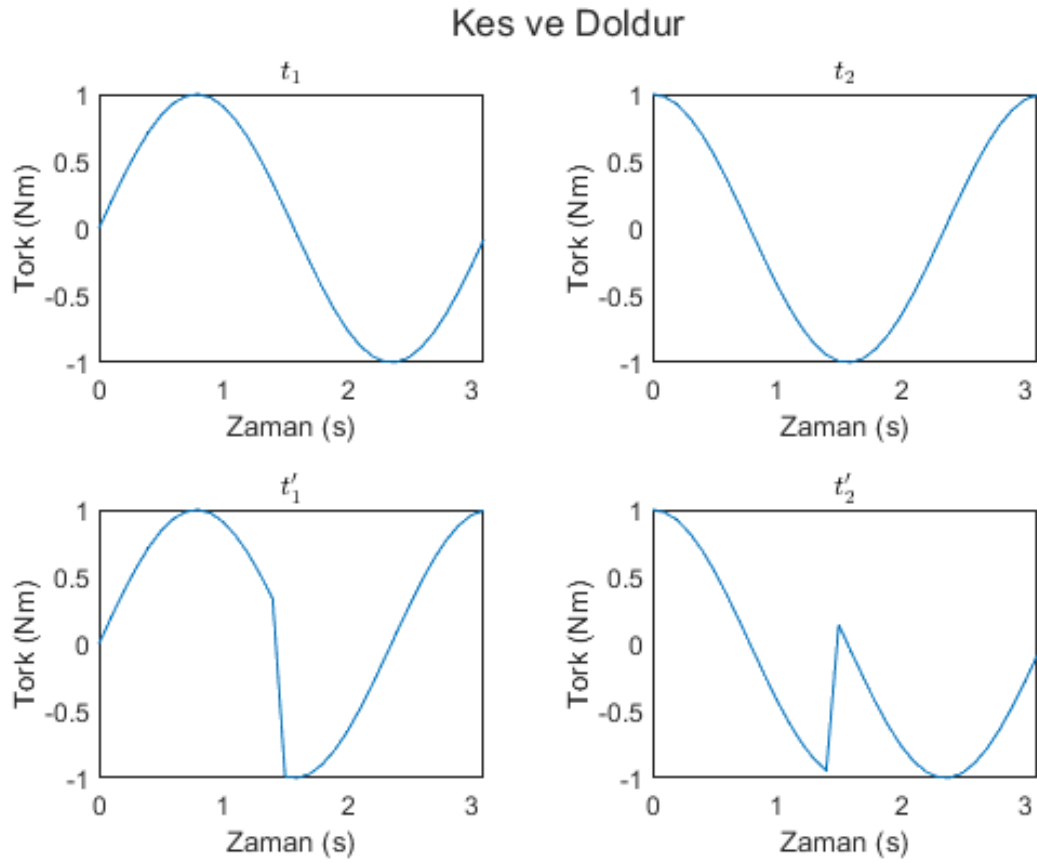
$\tau = (t^1, t^2, \dots, t^N)$  bir tork vektörü olsun. Rastgele bir  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$  ve rastgele bir  $\hat{t}$  değeri için

$$\tau' = (t^1, t^2, \dots, t^{i-1}, \hat{t}, t^i, t^{i+1}, \dots, t^{N-1})$$

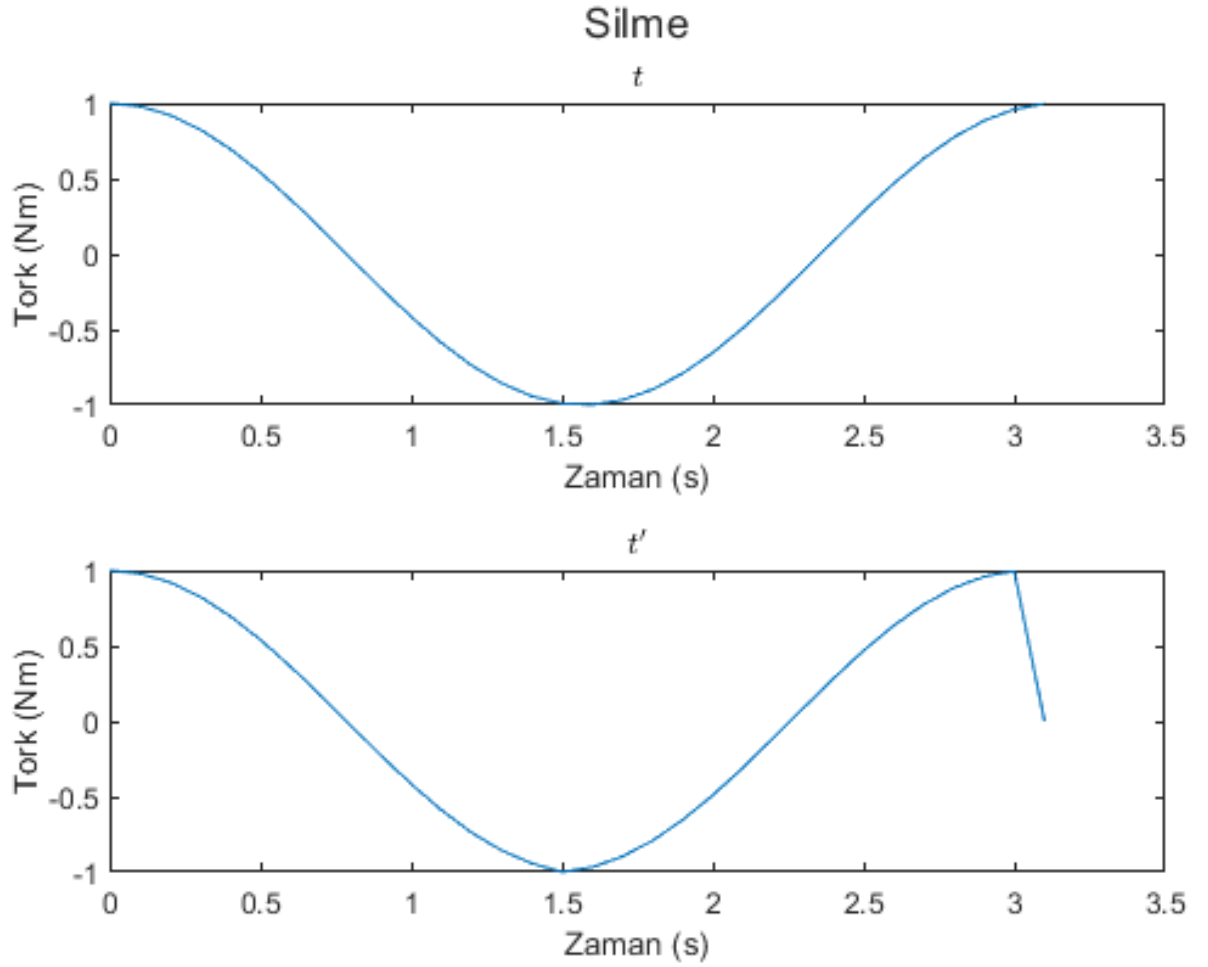
olmak üzere bir tork vektörü üretilebilir. Buna dayanan varyasyon operatörüne **yerleştirme** denilir (Şekil 3.16).



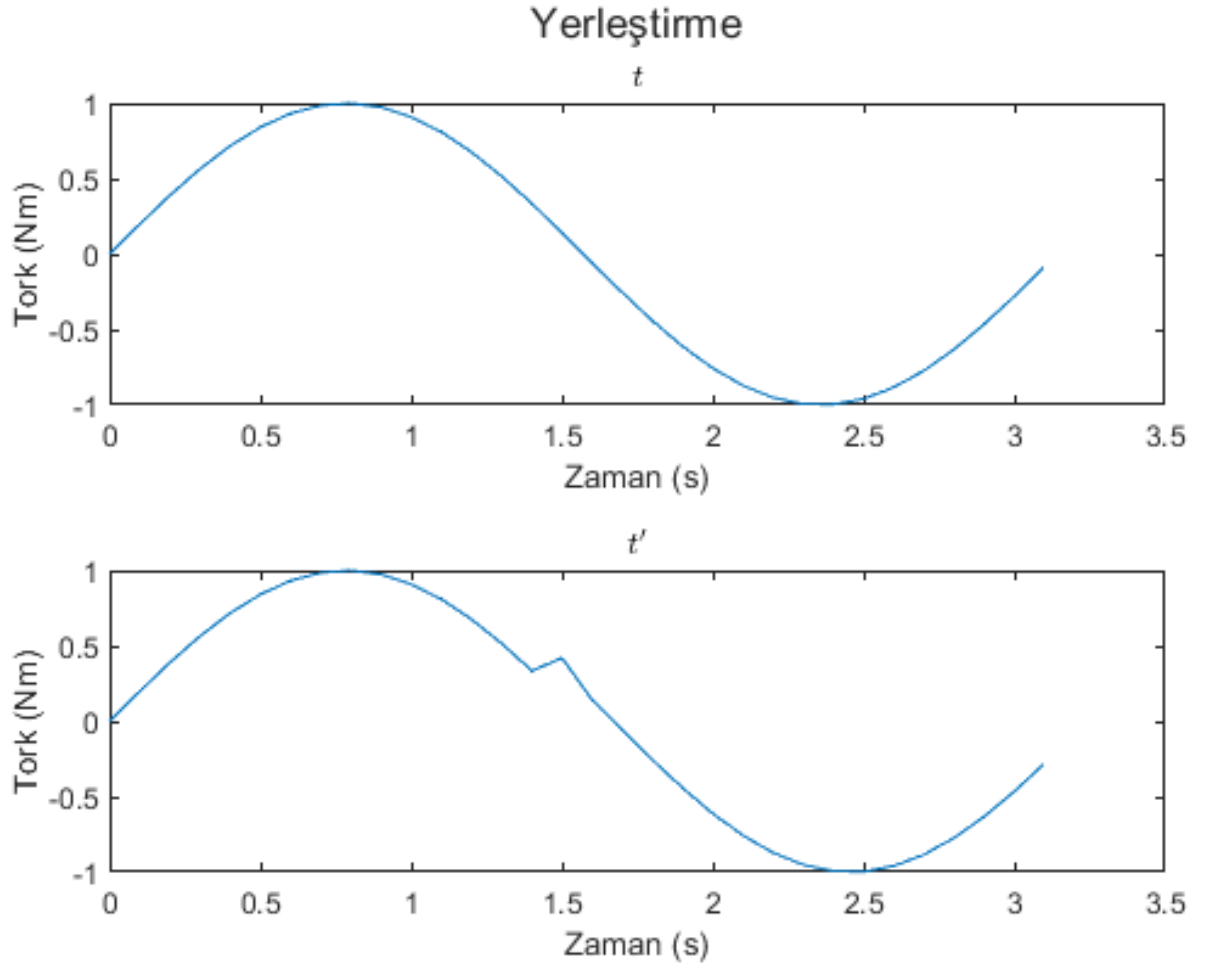
Şekil 3.13:  $\tau_1 = \sin(x)$  ve  $\tau_2 = \cos(x)$  ile tanımlanmış tork dizilerinin  $\omega = 0.3$  ağırlıkla çapraz geçişlerinden  $\tau'_1$  ve  $\tau'_2$  tork dizileri üretilir.



Şekil 3.14:  $\tau_1 = \sin(x)$  ve  $\tau_2 = \cos(x)$  ile tanımlanmış tork dizilerinin  $i = 16$  ( $1.5sn$ )'deki değeri üzerinden kes ve doldur varyasyon operatörü uygulanırsa  $\tau'_1$  ve  $\tau'_2$  tork dizileri üretilir.



Şekil 3.15:  $\tau = \sin(x)$  ile tanımlanmış tork dizisinin  $i = 16$  ( $1.5sn$ )'deki değeri silinir ve son değer olarak  $0 Nm$  atanırsa  $\tau'$  tork dizisi üretilir.



Şekil 3.16:  $\tau = \sin(x)$  ile tanımlanmış tork dizisine  $i = 16$  (1.5sn)'de 0.42 *beginNm* değeri yerleştirilirse  $\tau'$  tork dizisi üretilir.

### k-nokta Çapraz Geçiş

$\tau_1 = (t_1^1, t_1^2, \dots, t_1^N)$  ve  $\tau_2 = (t_2^1, t_2^2, \dots, t_2^N)$  iki adet tork vektörü olsun. Rastgele bir  $J \subseteq \{1, 2, \dots, N\}$  kümesi için,  $J = \{j^1, j^2, \dots, j^M\}$  kabul edersek

$$\tau'_1 = (t_1^1, \dots, t_1^{j^1-1}, t_2^{j^1}, \dots, t_2^{j^2-1}, t_1^{j^2}, \dots)$$

$$\tau'_2 = (t_2^1, \dots, t_2^{j^1-1}, t_1^{j^1}, \dots, t_1^{j^2-1}, t_2^{j^2}, \dots)$$

olmak üzere iki adet tork vektörü üretilebilir. Buna dayanan varyasyon operatörüne **k-nokta çapraz geçiş** denilir (Şekil 3.17).

### TNV - Tek Nükleotid Varyasyon

$\tau = (t^1, t^2, \dots, t^N)$  bir tork vektörü olsun. Rastgele bir  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$  ve rastgele bir  $\hat{\tau}$  değeri için

$$\tau' = (t^1, t^2, \dots, t^{i-1}, \hat{\tau}, t^{i+1}, \dots, t^N)$$

olmak üzere bir tork vektörü üretilebilir. Buna dayanan varyasyon operatörüne **tek nükleotid varyasyon** denilir (Şekil 3.18).

### Düzenli Çapraz Geçiş

$\tau_1 = (t_1^1, t_1^2, \dots, t_1^N)$  ve  $\tau_2 = (t_2^1, t_2^2, \dots, t_2^N)$  iki adet tork vektörü olsun.  $\omega_1, \dots, \omega_N \in (0, 1)$  rastgele sayılar ise,  $\tau_1$  ve  $\tau_2$ 'den

$$\hat{t}_1^i = t_1^i * \omega_i + t_2^i * (1 - \omega_i)$$

$$\hat{t}_2^i = t_2^i * \omega_i + t_1^i * (1 - \omega_i)$$

olmak üzere

$$\hat{\tau}_1 = (\hat{t}_1^1, \hat{t}_1^2, \dots, \hat{t}_1^N)$$

$$\hat{\tau}_2 = (\hat{t}_2^1, \hat{t}_2^2, \dots, \hat{t}_2^N)$$

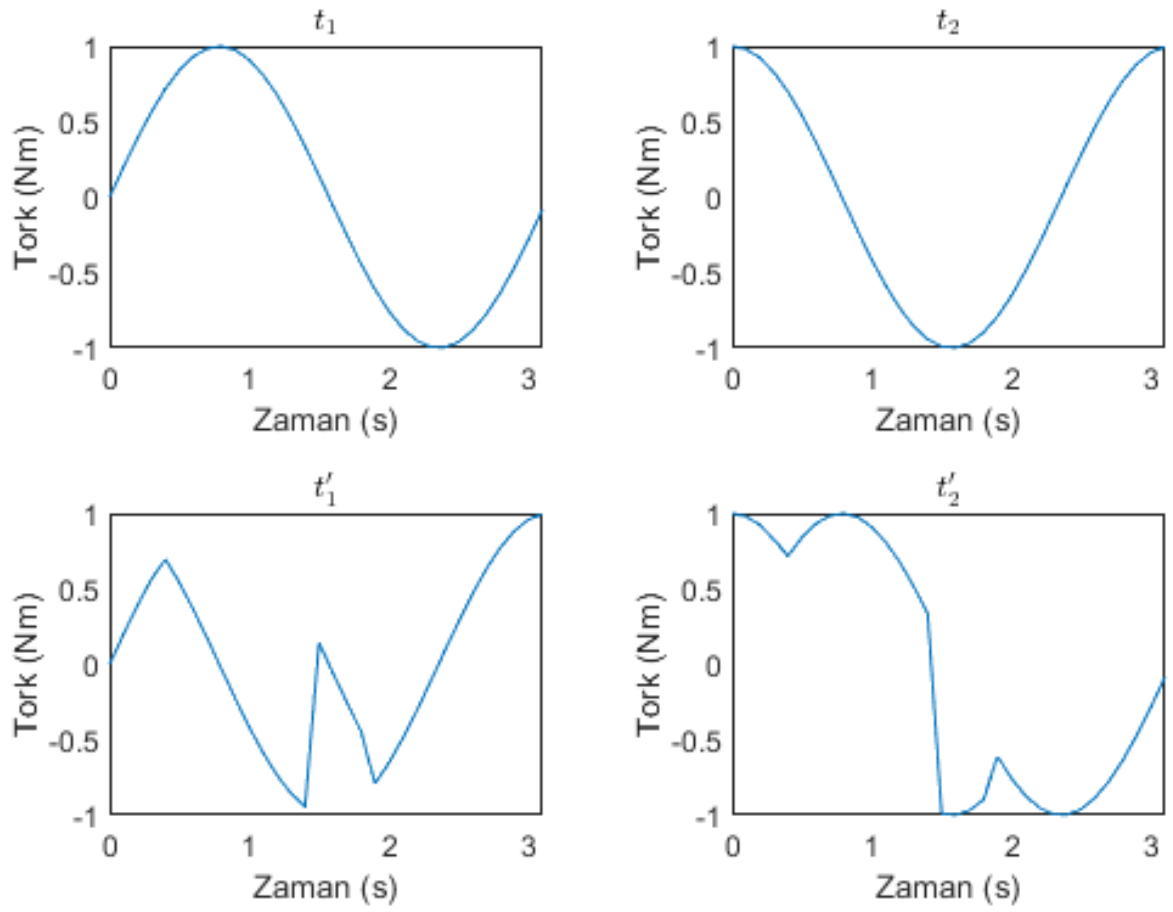
şeklinde iki adet tork vektörü üretilebilir. Buna dayanan varyasyon operatörüne **düzenli çapraz geçiş** denilir (Şekil 3.19).

### 3.5.4. Varyasyon Operatörleri - Ara Değerlemeli Operatörler

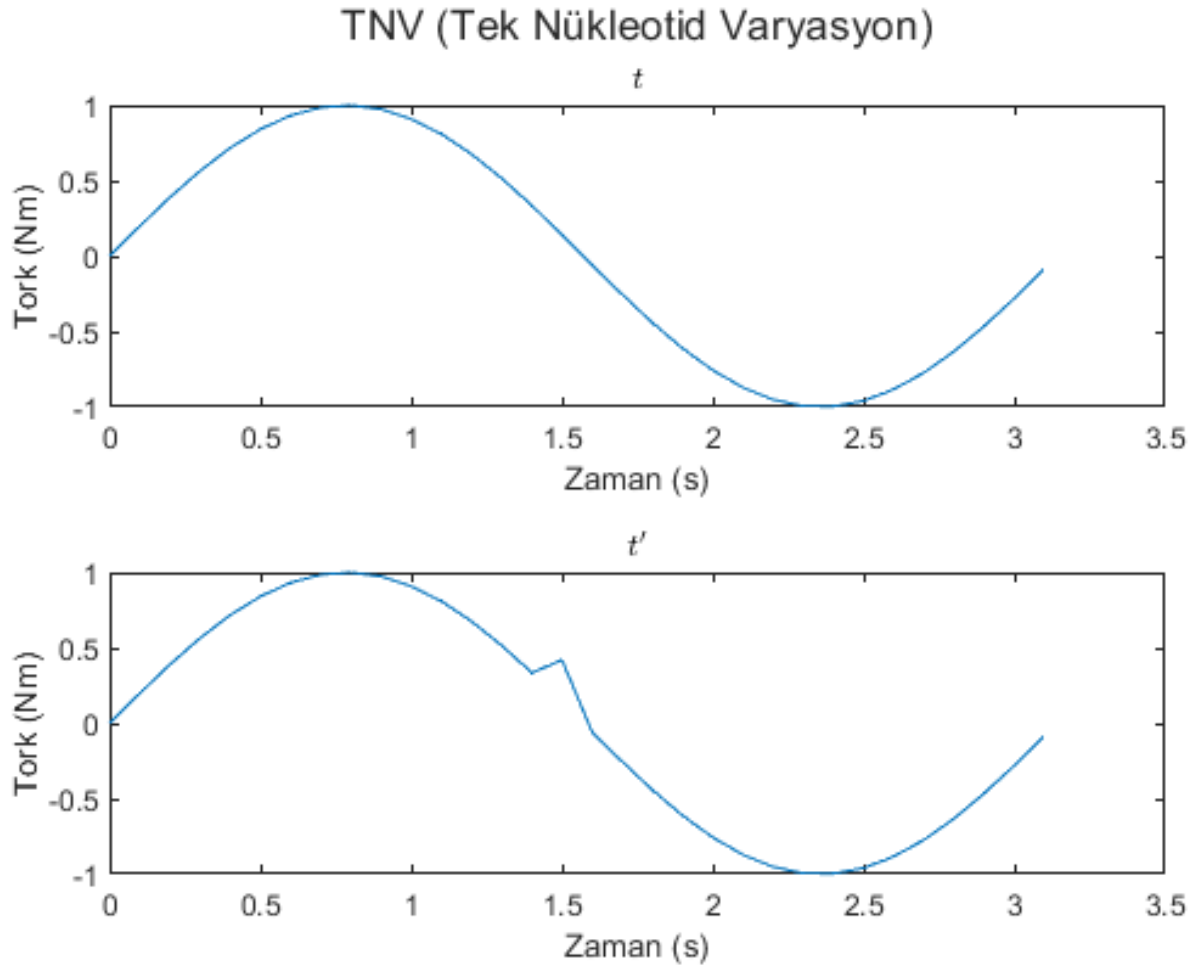
$\tau = (t^1, t^2, \dots, t^{N*M})$  bir tork vektörü olsun. Bu vektörden  $\hat{\tau} = (t^1, t^{M+1}, t^{2M+1}, \dots)$  şeklinde türetilen vektörü,  $\tau$ 'nun **interpolatif indirgemesi** olarak tanımlayalım. Bu çalışmada bir ara değerlendirme kontrol noktaları yeniden değerlendirilmesine bahsedildiğinde  $t^{iM}$ 'nin;  $t^1, \dots, t^{M+1}, t^{2M+1}, \dots, t^{2M+1}$  alt dizilerinin ara değerlendirilmesiyle  $N * M$  boyutlu bir vektöre dönüştürülmesinden bahsedilmektedir.



### k-nokta Çapraz Geçiş

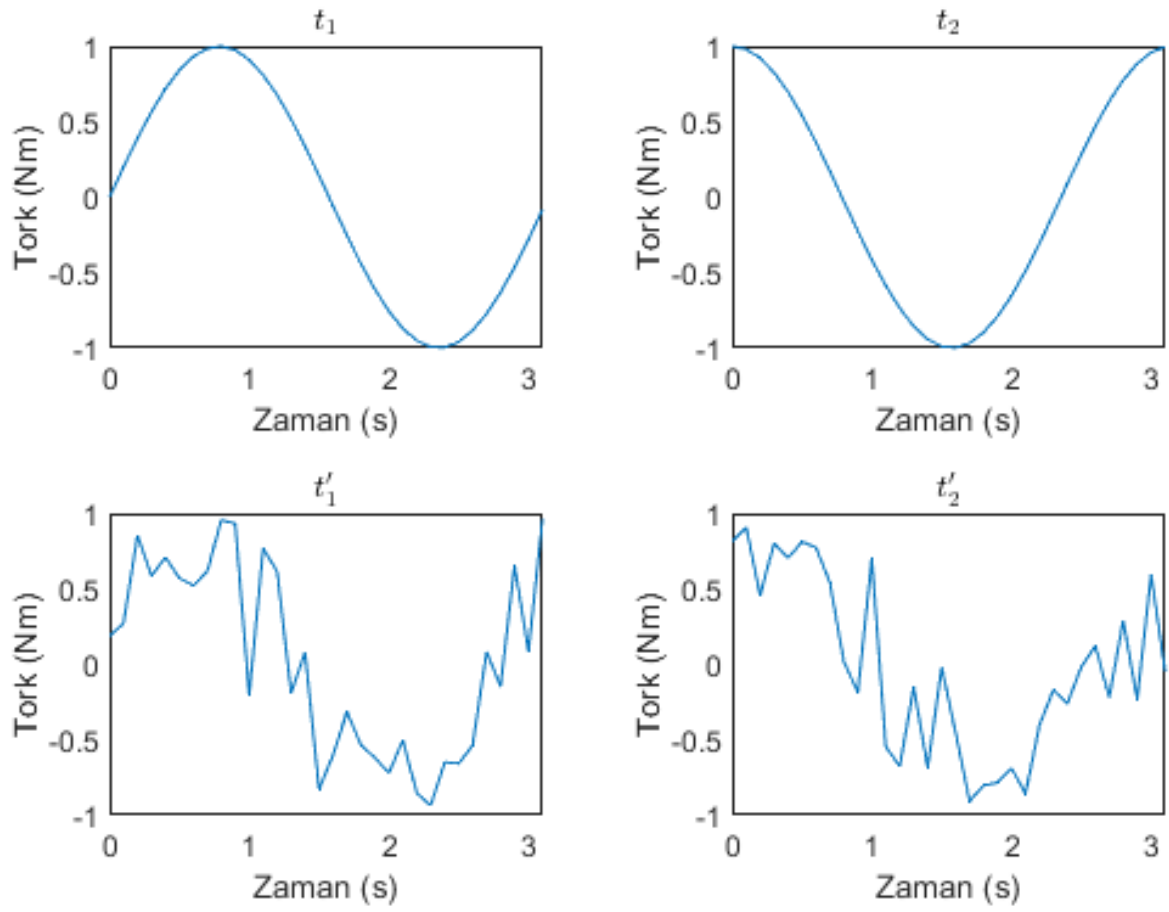


Şekil 3.17:  $\tau_1 = \sin(x)$  ve  $\tau_2 = \cos(x)$  ile tanımlanmış tork dizilerinin  $J = \{5, 16, 20\}$  (sırasıyla  $\{0.4 \text{ sn}, 1.5 \text{ sn}, 1.9 \text{ sn}\}$ )’deki değerleri üzerinden k-nokta çapraz geçiş varyasyon operatörü uygulanırsa  $\tau_1'$  ve  $\tau_2'$  tork dizileri üretilir.



Şekil 3.18:  $\tau = \sin(x)$  ile tanımlanmış tork dizisine  $i = 16$  ( $1.5sn$ )’de  $0.42 Nm$  değeri ile TNV uygulanırsa  $\tau'$  tork dizisi üretilir.

### Düzenli Çapraz Geçiş



Şekil 3.19:  $\tau_1 = \sin(x)$  ve  $\tau_2 = \cos(x)$  ile tanımlanmış tork dizilerinin rastgele  $(\omega_1, \dots, \omega_N)$  değerleri üzerinden düzenli çapraz geçiş varyasyon operatörü uygulanırsa  $\tau'_1$  ve  $\tau'_2$  tork dizileri üretilebilir.

### Ara Değerlemeli Silme

Bir tork vektörü  $\tau$ 'nun ara değerlendirme kontrol noktaları üzerinde silme işlemi uygulandıktan sonra bu vektörün yeniden ara değerlendirilmesine dayanan bir varyasyon operatörüdür (Şekil 3.20).

### Ara Değerlemeli TNV

Bir tork vektörü  $\tau$ 'nun ara değerlendirme kontrol noktaları üzerinde TNV işlemi uygulandıktan sonra bu vektörün yeniden ara değerlendirilmesine dayanan bir varyasyon operatörüdür (Şekil 3.21).

### Ara Değerlemeli Yerleştirme

Bir tork vektörü  $\tau$ 'nun ara değerlendirme kontrol noktaları üzerinde yerleştirme işlemi uygulandıktan sonra bu vektörün yeniden ara değerlendirilmesine dayanan bir varyasyon operatörüdür.

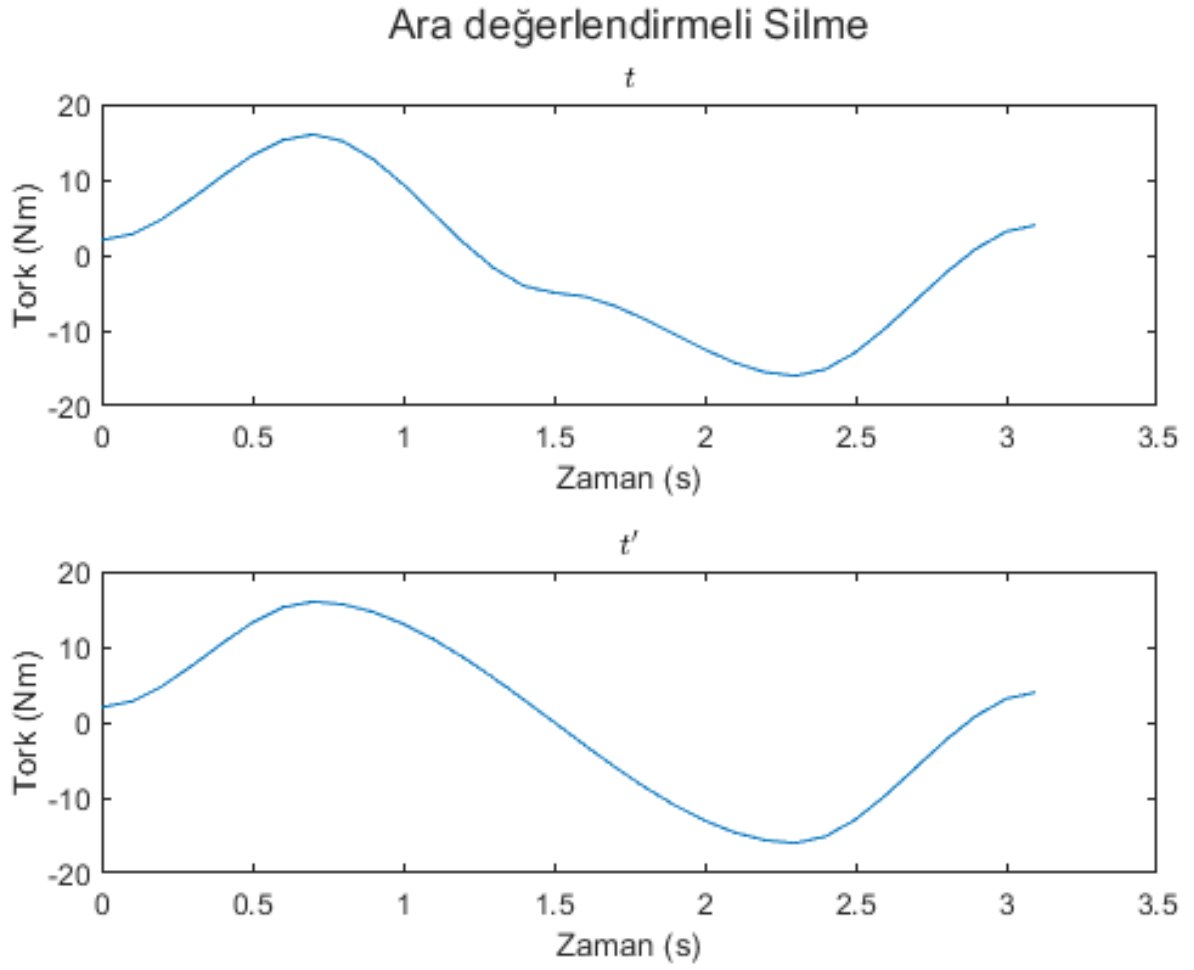
### Yönlü Ara Değerleme

Bir bireyin eklem torklarını temsil eden  $\tau_1, \dots, \tau_E$  tork vektörleriyle bu bireyin tek ebeveyninin eklem torklarını temsil eden  $\tau'_1, \dots, \tau'_E$  tork vektörleri ele alalım. Bu vektörlerin interpolatif indirgemeleri sırasıyla,  $\hat{\tau}_1, \dots, \hat{\tau}_E$  vektörleri ile  $\dot{\tau}'_1, \dots, \dot{\tau}'_E$  vektörleri olsun.  $\forall i \in 1, \dots, E$  ve rastgele bir  $\omega$  için  $\hat{\tau}_i = \omega * (\dot{\tau}'_i - \hat{\tau}_i)$  şeklinde tanımlanan vektörlerden yeni bir birey üretelim. Basitçe ifade etmek gerekirse bu birey, ebeveyn ile çocuk arasındaki değişimi kullanarak üretilmiş olacaktır. Başka bir deyişle bu operatör, bir faydalanma stratejisi olarak çalışmaktadır.

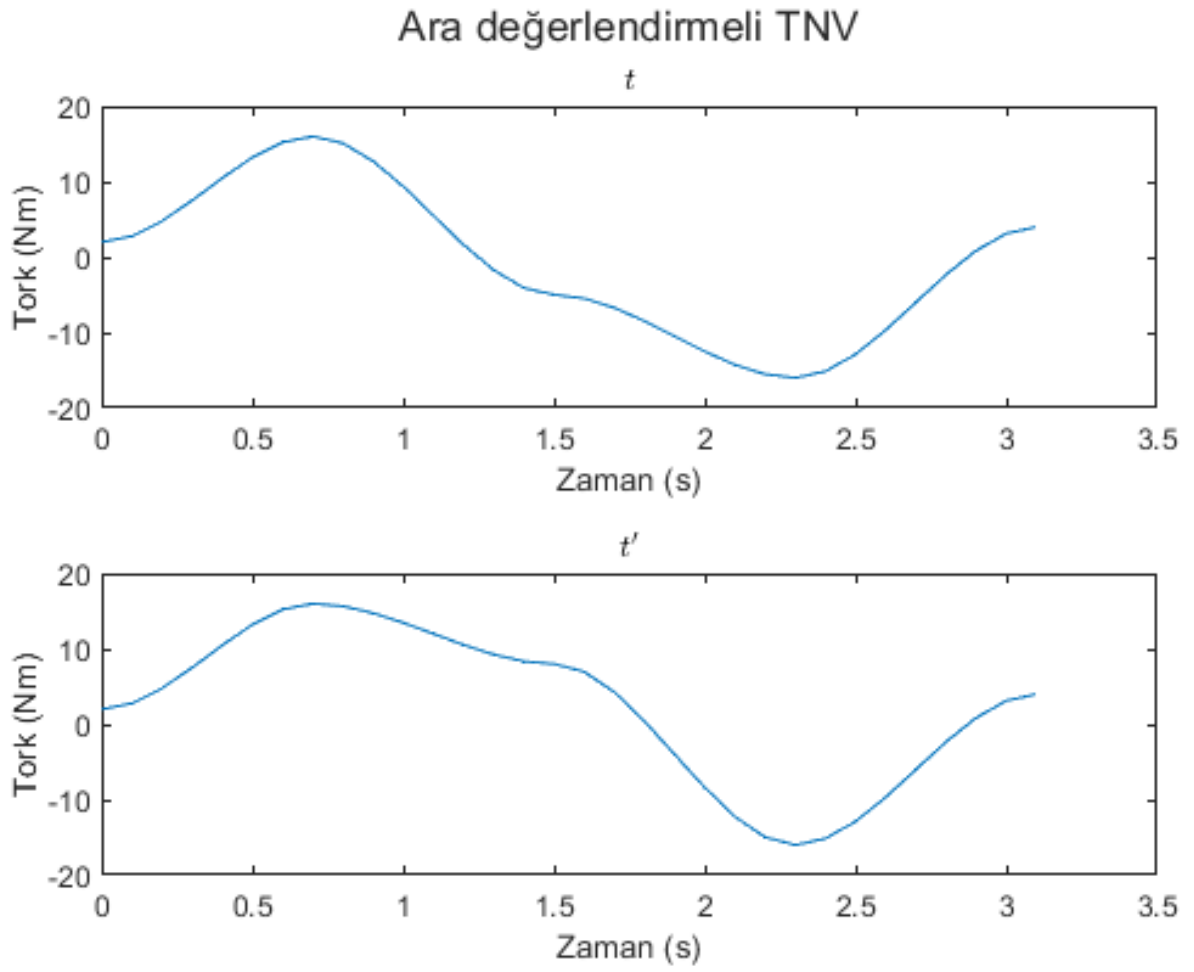
### 3.5.5. Eliminasyon

Bu çalışmada ebeveynler, sadece elitist yöntemlerle seçilmiştir. Başka bir deyişle her nesilde "en iyi" bireyin bir sonraki nesle aktarılması sağlanmıştır. Aşağıda verilen bütün yöntemler bu hedefe uygun olarak tasarlanmıştır.

**UYB (Uygunluk-Yenilik-Başarım)** Bu eliminasyon çeşidinde bireylerin uygunluğu (ölçek değeri), yeniliği (diğer bireylere uzaklığı), ve başarımı (ebeveyniyle arasındaki ölçek değer farkı) kullanılarak bu kriterlere en uygun bireyler seçilmiştir.



Şekil 3.20:  $\kappa = ((0,2), (0.7, 16), (1.5, -5), (2.3, -16), (3.1, 4))$  kontrol noktaları ile ara değerlendirilmiş  $\tau$  tork dizisinin,  $\kappa' = ((0, 2), (0.7, 16), (2.3, -16), (3.1, 4))$  kontrol noktaları ile ara değerlemesi  $\tau'$  tork dizisi olacaktır.



Şekil 3.21:  $\kappa = ((0,2), (0.7,16), (1.5,-5), (2.3,-16), (3.1,4))$  kontrol noktaları ile ara değerlendirilmiş  $\tau$  tork dizisinin,  $\kappa' = ((0,2), (0.7,16), (1.5,8), (2.3,-16), (3.1,4))$  kontrol noktaları ile ara değerlemesi  $\tau'$  tork dizisi olacaktır.

**Varsa Sadece Pozitifleri Alma** Bir ölçek için, kabul edilebilir bir ölçek değerine sahip bireyler olduğu durumda, sadece bu bireyleri koruyup geri kalanı gen havuzundan silmek için uygulanan bir yöntemdir. Örneğin bağımsız amut modelinde, bir birey için ellerin yerden yüksekliği kabul edilebilir değilse (eller yerden ayrılmışsa) ellerin yerden yüksekliği  $-1$  ile çarpılarak ölçek değeri yerine kullanılmıştır, ve bu yolla negatif ölçek değerine sahip bireyler elenerek ellerin yerle teması sağlanmıştır.

**Eşitleri Silme** Aynı genotipe sahip bireylerin silinmesini sağlayan bu yöntem, gen havuzunda -özellikle sıfır bireyle başlangıç uygulandığında- fazla sayıda aynı genotipe sahip birey olduğunun fark edilmesi üzerine tekrardan kaçınmak amacıyla eklenmiştir.

**Pareto Cephe** Bir birey kümesinin verili ölçekler dahilinde Pareto cephesini koruyan, diğerlerini göz ardı eden bir yöntemdir.

**Kısmi Baskınlanmışları Silme** Verilen her ölçeğin en yüksek değerine sahip bireyleri koruyup, diğerlerini göz ardı eden bir yöntemdir.

### 3.5.6. Nişleme

Bu çalışmada nişleme yöntemi algoritmaya doğrudan entegre edilmek yerine eliminasyonun bir parçası olarak bir denklik ilişkisi üzerinden kurgulanmıştır. Verili bir ölçek için aynı ölçek değerine sahip bireylerin gruplanmasını sağlayan bir **ölçek eşleme** yöntemi oluşturulmuştur. Ölçek olarak açılarının türevlerinin işaretleri kullanılarak hareketler sınıflandırılarak bir nişleme denemesi yapılmıştır.

### 3.5.7. Ölçekler

Çalışma boyunca çeşitli ölçekler denenmiş, bir çoğu beklenen başarıyı gösterememiştir. Aşağıda çalışma sonucunu belirleyen, çalışmanın tekrarlanması için gerekli ve yeterli ölçekler sunulmuştur.

**KMNİ (Kütle Merkezinin Normalize İntegrali)** Simulink yazılımı tarafından sağlanan eylemsizlik sensörü tarafından hesaplanan kütle merkezinin yüksekliği (Bkz. Şekil 3.5) verisinin integralinin zamana göre normalizasyonunu ifade etmektedir.

**Ellerin Yerden Yüksekliği** El parmak (temas) noktasını  $P$  ile, el bilek (temas) noktasını  $B$  ile gösterelim.  $P$  ve  $B$  noktalarının  $t$  anında konumlarını sırasıyla  $P^t$  ve  $B^t$ ,  $z$  ekseninde aldığı değerleri de sırasıyla  $P^t|z$  ve  $B^t|z$  ile gösterelim. Ellerin yerden yüksekliğini temel alan bu ölçek  $\max(P^t|z) + \max(B^t|z)$  şeklinde tanımlanmaktadır.

**Birleşik KMNİ** KMNİ ve ellerin yerden yüksekliği ölçeklerinin birleştirilerek, başarısız (elleri yerden kesilen) bireylerin tespitinde kullanılan bir ölçek geliştirilmiştir. Bu şekilde başarısız bireylerin doğrudan reddedilmesi yerine ne kadar başarısız oldukları ölçeye dahil edilmiştir.

$$y = \begin{cases} -\max(P^t|z) - \max(B^t|z), & \text{eğer } \max(P^t|z) > 0.001 \text{ veya } \max(B^t|z) > 0.001 \\ -\max(P^t|z), & \text{eğer } \max(P^t|z) > 0.001 \\ -\max(B^t|z), & \text{eğer } \max(B^t|z) > 0.001 \\ \text{KMNİ}, & \end{cases}$$

**Denge** Ellerin yerden yüksekliğini temel alan ölçek için yukarıda tanımladığımız  $t$  anındaki  $P^t$  ve  $B^t$  konumlarını hatırlayalım. Aynı şekilde model kütle merkezinin  $t$  anındaki konumunu  $M^t$  ile gösterelim. Bu konumların  $x$  düzlemindeki (yatay düzlemdeki) bileşenini veren bir  $\chi$  fonksiyonu tanımlayalım. Denge ölçegini şu şekilde tanımlayabiliriz:

$$\sum_t \min(|\chi(M^t - P^t)|, |\chi(M^t - B^t)|)$$

### 3.6. Veri Azaltma

Hesaplamaları bilgisayar aracılığıyla yaptığımız ve bunun sonucu olarak ayrı bir sayısal temsil kullandığımız için  $\mathcal{T}$  hareket kümesi sonlu bir küme olmaktadır: Hem zaman eksenimiz, hem de her zaman diliminde sonlu sayıda eklemdeki tork değerleri sonlu sayıda değer alabilmektedir. Örneğin 64 bitlik bir sayısal temsil kullanırsak bir eklemde bir ekseninde tek bir andaki alabileceği en fazla  $2^{64}$  farklı değer vardır.

Hareket süresini kısıtlarsak ve 2.56 saniye sürecek bir hareketi her 0.01 saniyede eklem başına bir tork değeri ile beslersek, yine eklem başına  $2^{64 \cdot 2.56 / 0.01} = 2^{64 \cdot 256} = 2^{16384}$  farklı değerden bahsetmekteyiz. Tek ekseninde dönebilen  $n$  adet eklem hesaba katıldığında çözüm kümesinde  $2^{n \cdot 16384}$  farklı hareket söz konusudur. Bu büyüklükteki çözüm kümesinin kontrolü nüfus temelli bir algoritma için çok zordur.

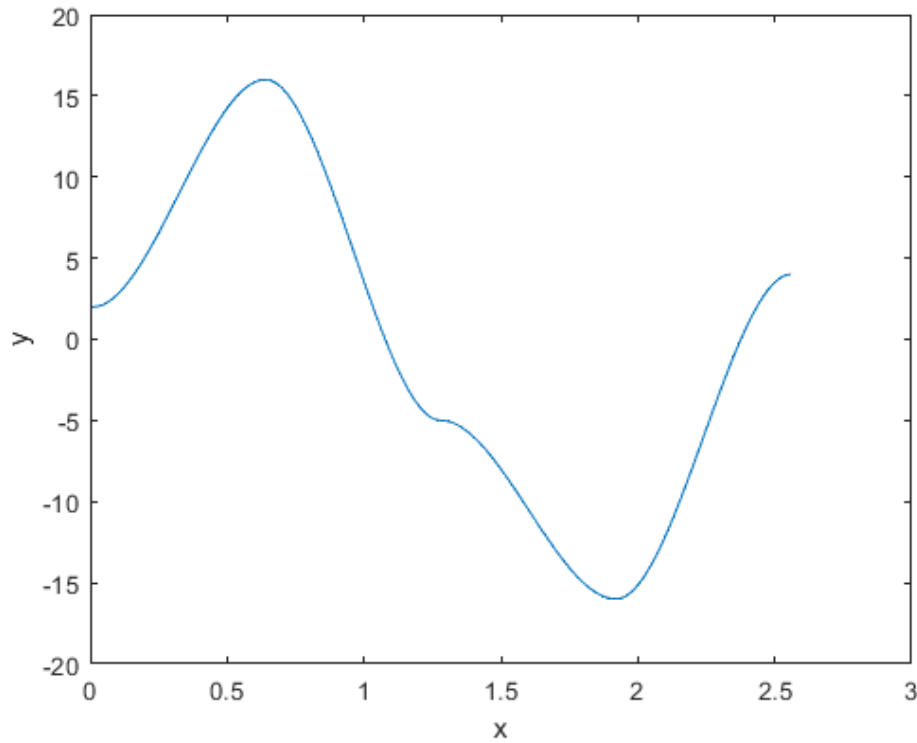


Bu nedenle, eklem torklarını sınırlamak hem gerçekçiliği artıracak hem de çözüm kümesini daraltacaktır. Çözüm kümesinin devasa boyutu veri azaltma yoluna gidilmesini işaret etmektedir.

Çalışmanın ilk aşamalarında tork sınırlandırması dışında bir yöntem kullanılmamış olsa da son aşamada 256 zaman noktası için eğri ara değerlemesi uygulanmıştır (Bkz. EK-3). Bunun için;

- ilk ve son anlarda aldığı değerler belirlenmiş,
- belirtilen bütün değerlerden geçen,
- her aldığı değerde türevi 0 olan,
- ardışık iki değer aralığına sınırlandırılmış

bir ara değerlendirme yöntemi kullanılmıştır (Şekil 3.22).



Şekil 3.22: Ara Değerleme Örneği:  $(x, y) \in \{(0, 2), (0.64, 16), (1.28, -5), (1.92, -16), (2.56, 4)\}$  noktalarından geçen bir eğrisel ara değerlendirme. Eğrinin  $x \in \{0, 0.64, 1.28, 1.92, 2.56\}$  noktalarında türevi 0'dır. Ayrıca y ekseninde verilen değer aralıkları içerisinde kalmaktadır: Örneğin  $x \in [0, 0.64]$  için  $y \in [2, 16]$  değerini almaktadır.

### 3.7. Koşular

Çalışma boyunca genetik algoritmalar tabanlı bir hareket sentez algoritması geliştirilmeye çalışılmış, her geliştirme döngüsünde koşu adı verilen bir test yapılmıştır. Her koşu bir algoritma tasarımı, bir model tasarımı ve bu model kullanılarak algoritmanın çalıştırılmasını kapsamaktadır (Bkz. EK-3). Bir benzeşim modeli ile bir algoritma denemesi çalıştırıldığında  $N$  nesil boyunca, her nesilde  $B$  birey oluşturulmaktadır. Hareket tanımlama güçlüğünden dolayı bu çalışmada bir koşunun sona erme koşulu nesil sayısı olarak belirlenmiştir.

Bütün koşulardaki bütün bireyler (yani hareketler), koşuya özgü model tarafından belirlenen bir konumdan başlamaktadır. Hareketin başlangıç konumu, hareket başlangıcındaki eklem açılarıdır (Bkz. Şekil 3.8).

Bütün koşular için başlangıç nesli adı altında bir başlangıç hareketleri kümesi kullanılmaktadır. Bu çalışmada bu küme tek elemana sahiptir. Genetik algoritmalar çerçevesinde birey olarak anılan hareketlere örnek olarak;

- modele özgü başlangıç pozisyonundan başlayan ve hareketin geri kalanında bütün eklem tork değerleri 0 olan **sıfır birey**,
- modele özgü başlangıç pozisyonundan başlayan ve hareketin geri kalanı boyunca bu pozisyonu korumaya (yani hareket etmemeye) çalışan **sabit duran birey**

verilebilir.

Önce kısıtlanmış amut modeli adı verilen el parmaklarından yere kaynaklanmış bir modelin amut hareketi gerçekleştirmesi için çalışılmıştır. Bu aşamada başlangıç nesli, tek bir *sıfır birey*den oluşmaktadır.

Kısıtlanmış amut modeli ile amut hareketi sentezi başarılı olduktan sonra bağımsız amut modeli adı verilen yer düzlemi ile sadece temas noktaları aracılığıyla bağlantı kuran, yere bağlı olmayan bir model ile amut hareketi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. İlk aşamalarda *sıfır birey* ile başlayan koşular, sonraki aşamalarda yerini *sabit duran birey*e bırakmıştır (Bkz. EK-3).

## 4 BULGULAR

### 4.1. Bağımsız Amut Sentezi İçin Yeterli Bir Genetik Algoritma

Çalışma boyunca bir çok farklı koşu yürütülerek bağımsız amut modeli ile önyargısız amut hareketi sentezleyebilen bir yöntem bulunmuştur. Bu koşuların her birinin tez dahilinde incelenmesi mümkün olmasa da (Bkz. EK-3) sonuç olarak elde edilen genetik algoritma tasarımı bu bölümde anlatılacaktır.

#### 4.1.1. Başlangıç Nüfusu

Geleneksel genetik algoritmalarda kullanılan başlangıç nüfusu çeşitliliğinden bu çalışmada faydalanılamamıştır. Bunun en büyük nedeni, başarılı benzeşimlerin rastgele üretimi için bu çalışma sürecinde makul bir yöntem bulunamamasıdır. Bunun için çalışmanın başlarında bir *numaralama* stratejisi geliştirilmeye çalışılmış, fakat bunda da başarılı olunamamıştır. Önyargısız sentez hedefinden vazgeçmemek için de hareket üzerinde herhangi bir varsayımda bulunmayan tek bir birey ile başlanması uygun görülmüştür. Önce bütün tork değerleri 0 olan bir birey kullanılmış, fakat eniyileştirme nesillerinin bir kısmı başarılı benzeşim gerçekleştirebilen herhangi bir bireye ulaşmakla geçtiği için bu yöntemin kullanılabilirliğinin kısıtlı olduğu görülmüştür. Bu bireyin eniyileştirme çabalarına olumsuz bir etkisi olduğu görüldüğünde ise sabit duran birey ile başlangıç kullanarak başarılı bir senteze ulaşılmıştır.

#### 4.1.2. Veri Azaltma

Eniyileştirme algoritmalarının ortak sorunu olan çok boyutlu problemler, ve nüfus temelli eniyileştirme algoritmalarının zayıf noktalarından biri olan çözüm uzayının büyüklüğü, çeşitli veri azaltma tekniklerini avantajlı kılmaktadır.

Problem boyutunu azaltmak için eklem (ve dolayısıyla tork) sayısı azaltılmış, ve benzeşim zaman aralığı kısıtlanmıştır. Ön çalışma sürecinde;

- 2 ayak bileği
- 2 diz
- 2 kalça
- 1 bel

- 2 omuz
- 2 dirsek
- 2 el bileği
- 1 boyun

olmak üzere toplam 14 ekleme sahip bir model tasarlanmış, fakat benzeşim ve eniyileştirme sürelerinin uzamasından dolayı bu model

- 1 kalça
- 1 omuz
- 1 el bileği

oluşan bir modele indirgenmiştir.

Çözüm uzayını küçültmek için ise *dalgacık dönüşümü*, doğrusal *ara değerlendirme*, ve eğrisel *ara değerlendirme* yöntemleri denenmiştir. Bu yöntemlerden yalnızca eğrisel ara değerlendirme ile başarıya ulaşılsa da bu konuda bir karşılaştırma yapılamamaktadır. Bunun nedeni; dalgacık dönüşümü ve doğrusal ara değerlendirme yapılan koşullarda program hatasından dolayı sonuç alınamamış olma olasılığıdır.

#### 4.1.3. Ölçekler

Ayak ortalama yüksekliği bir ölçek olarak kullanıldığında, ağırlık merkezinin ortalama yüksekliği ölçeğine göre yerel eniyilere daha fazla yakınsandığı gözlenmiştir. Fakat bu gözlem çalışmanın başlarında henüz Pareto cephesi kullanılmadığı bir aşamada yapıldığı için genellenebilirliği kuşkuludur. Ayrıca bu sonuca nesnel bir analiz yapılarak varılmamış, daha sonraki çalışmalarda incelenmek üzere not edilmiştir.

Ölçekler ile elde edilen en büyük gelişme; Pareto cephe kullanılarak ağırlık merkezinin ortalama yüksekliği ve denge ölçeklerinin eniyileştirilmeye başlanmasıyla elde edilmiştir.

#### 4.1.4. Algoritma

Bağımsız amut hareketi sentezi için geliştirilen algoritma aşağıdaki gibidir:

Model	bağımsız amut modeli
Başlangıç Nesli	sabit duran birey
Ebeveyn Seçimi	rastgele seçim (çapraz geçiş için) ölçek-oranlı seçim (diğer varyasyon operatörleri için)
Varyasyon Operatörleri (Bkz. 3.5.3)	ara değerlemeli TNV ara değerlemeli silme ara değerlemeli yerleştirme çapraz geçiş
Eliminasyon	eşitleri silme varsa sadece pozitifleri alma (KMNI) Pareto cephe (KMNI, denge)
Nesil sayısı	1024
Nesil başına birey sayısı ( $\lambda$ )	256

Tablo 4.1: Algoritma

## 4.2. Algoritmanın Başarımı

Algoritmanın başarımını anlayabilmek için çeşitli analizler yapılmış, grafikler oluşturulmuştur. Bu bölümde, oluşturulan grafiklerin işaret ettiği bilgiler gözden geçirilecektir. Grafikler sadece tek bir koşuya ait olmakla birlikte çalışma boyunca yürütülen analizler hakkında fikir verecektir.

### 4.2.1. Benzeşim Süresi

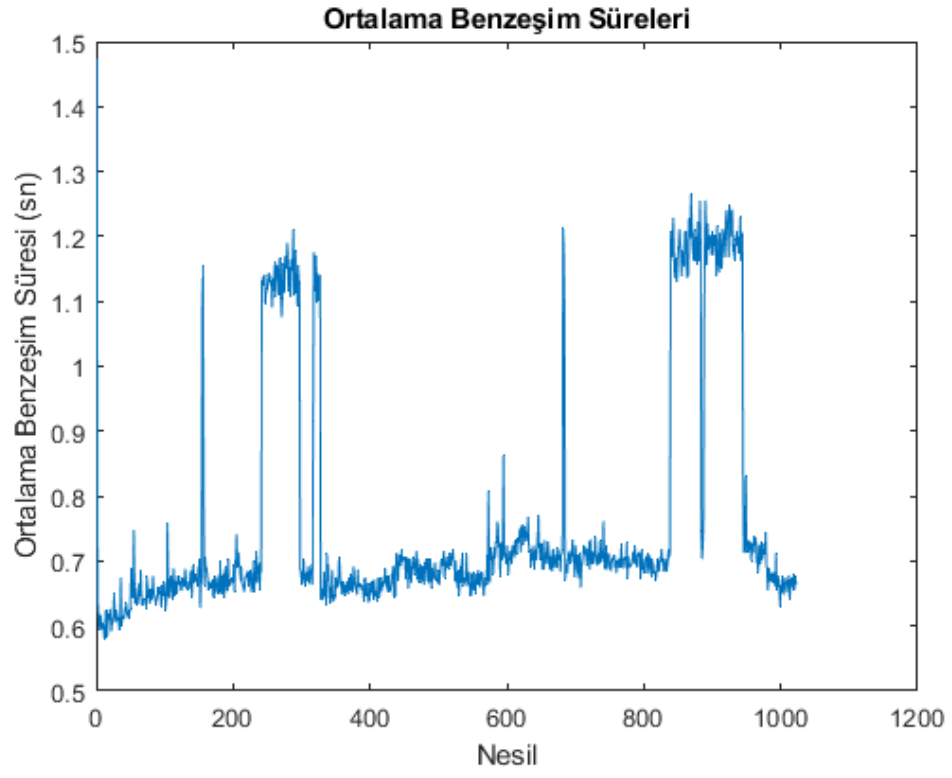
Nüfus temelli bir algoritmanın çok sayıda benzeşim yapması gerektiği için benzeşim süresinin kısa olmasının avantaj sağlayacağı açıktır. Bunu başarmak için çeşitli yollar denenmiştir.

Uygulanan ilk yöntem, benzeşimlerin paralel olarak yürütülmesi olmuştur. Bunun için çok çekirdekli bir merkezi işlemci kullanılarak MATLAB/Simulink yazılımının paralel benzeşim yeteneğinden faydalanılmıştır.

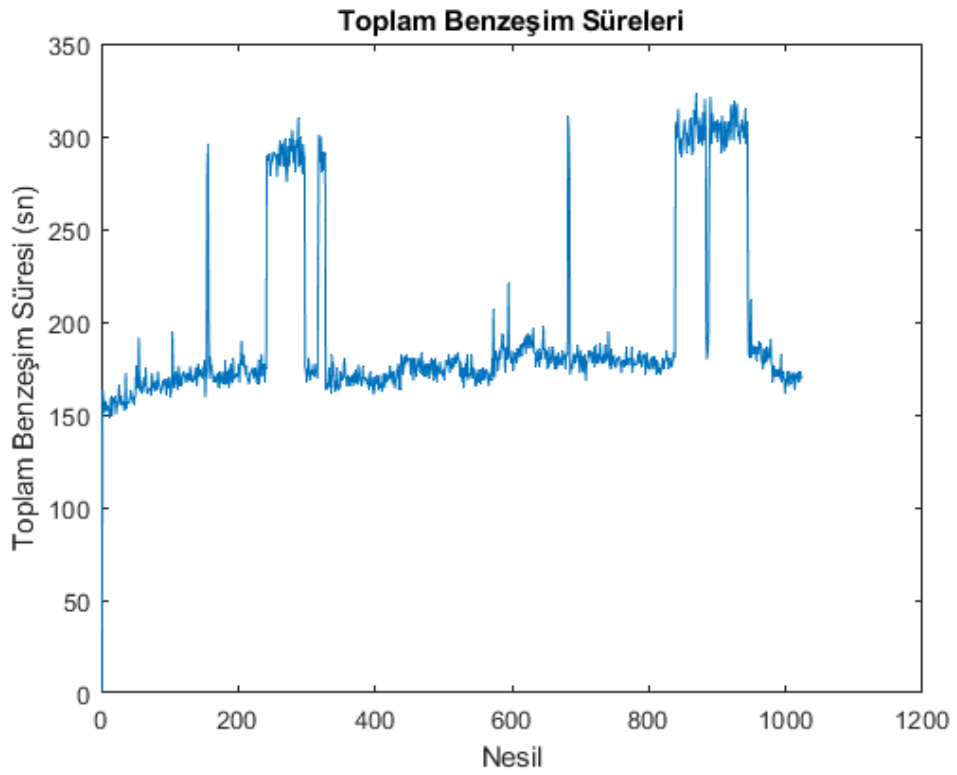
İkinci yöntem olarak benzeşim çözücü algoritması olarak MATLAB/Simulink yazılımında bulunan ode15s çözücüsü kullanılmış, bu çözücünün diğer alternatifler kadar çözüm başarımı olmasına rağmen diğerlerine göre daha hızlı sonuç verdiği gözlenmiştir.

Üçüncü yöntem olarak modelin basitleştirilmesi yoluna gidilmiştir.

Sonuç olarak ortalama Şekil 4.1 ve toplam Şekil 4.2 benzeşim süreleri düşürülmüş olsa da gelişmeye açık olduğu öngörülmektedir.

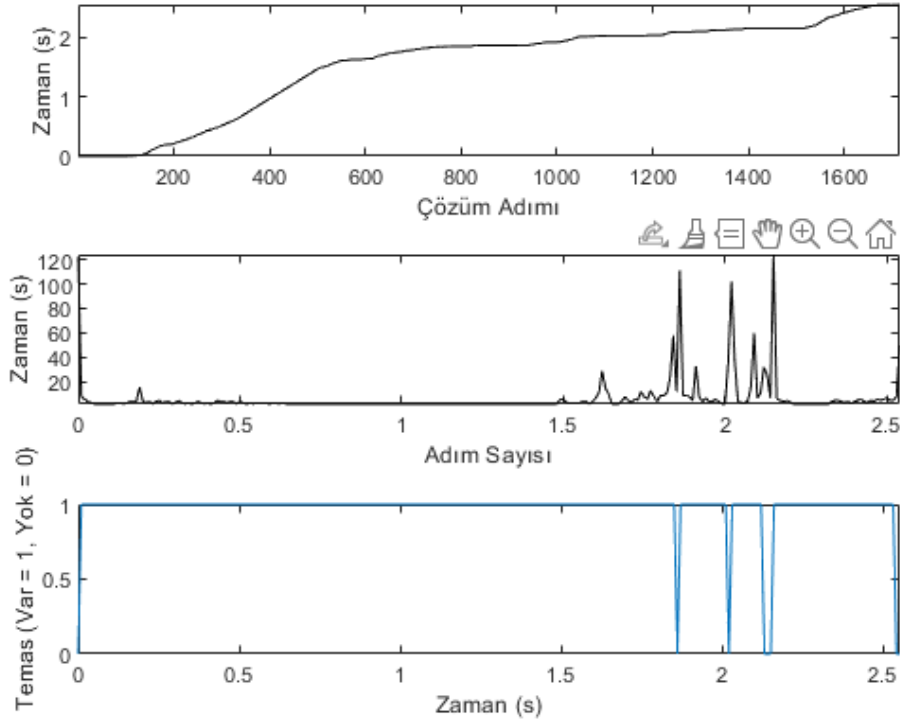


Şekil 4.1: Ortalama Benzeşim Süreleri



Şekil 4.2: Toplam Benzeşim Süreleri

Şekil 4.3 üç adet grafikten oluşmaktadır. İlk grafik çözücünün takip ettiği benzeşim adımları ile bu adımların benzeşimde hangi zamana karşılık geldiğini göstermektedir. İkinci grafikte ise benzeşim adımlarının benzeşim zamanlarına göre sıklık grafiği gösterilmektedir. Üçüncü grafikte ise el (el parmak ucu ya da carpal) temas noktalarının temas etmediği anlar görülmektedir.

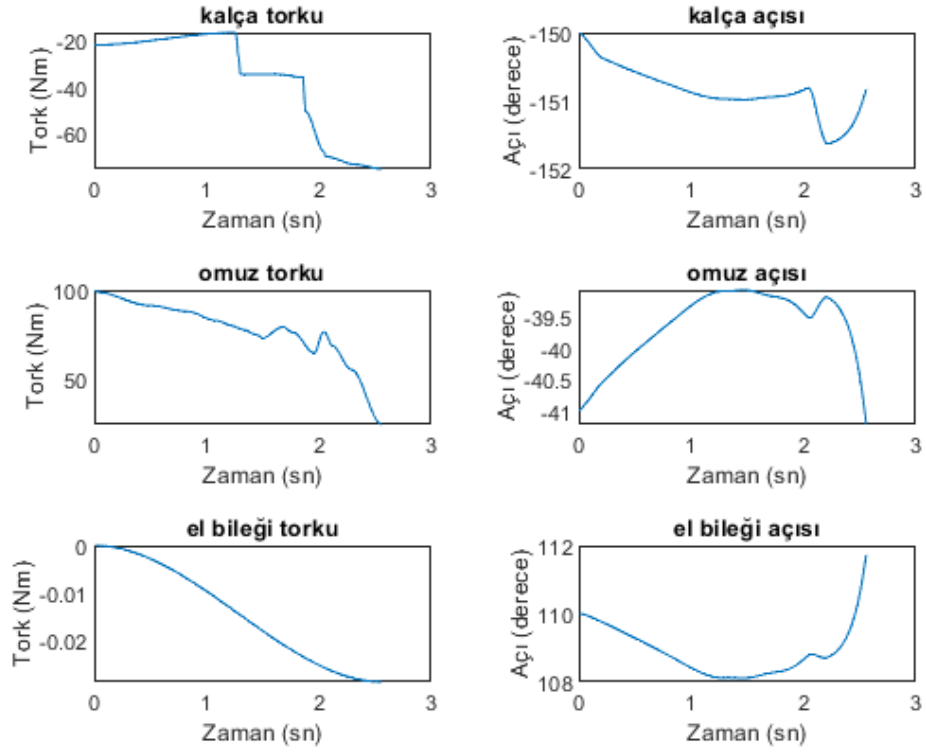


Şekil 4.3: Benzeşim adım sıklığının el teması ile potansiyel ilişkisi.

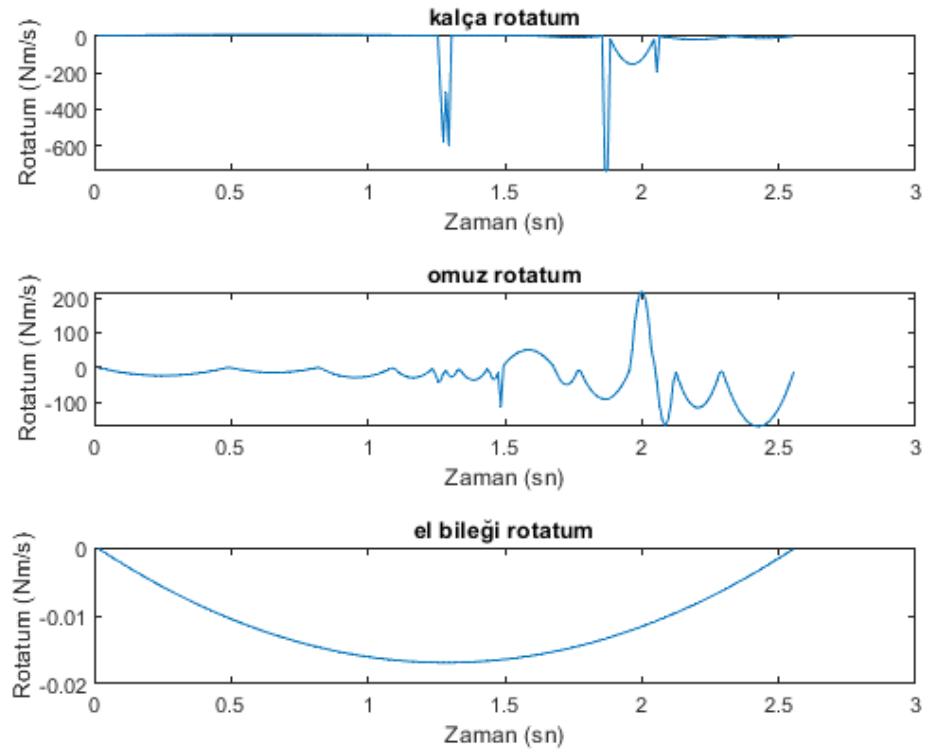
#### 4.2.2. Sabit Birey: Tork, Rotatum, ve Aç

Genetik algoritmalar küresel eniyileştirme yetisi bakımından yüksek başarılı bir algoritma türü olsa da; yerel eniyileştirme açısından küresel eniyileştirme başarımına göre zayıf kalmaktadır. Sabit duran bireyin tork ve açı değerleri Şekil 4.4 ile gösterilmektedir. Bu grafikte tork değerlerinin küçük bir komşuluk etrafında birikmemiş olması dikkat çekmektedir. Buna rağmen açı değerlerinin ufak bir aralıkta geziniyor olması yöntemin bu açıdan başarısız olmadığını göstermektedir. Eğrisel ara değerlendirme ile oluşturulan tork değerlerinde kalça için 13, omuz için 18, el bileği için ise 2 kontrol noktası ile çözüme ulaşılmıştır. Tork değerlerinin hızlı değiştiği noktaların rotatum (torkların zamana göre türevi) üzerine etkisi ise Şekil 4.5 üzerinde görülmektedir.





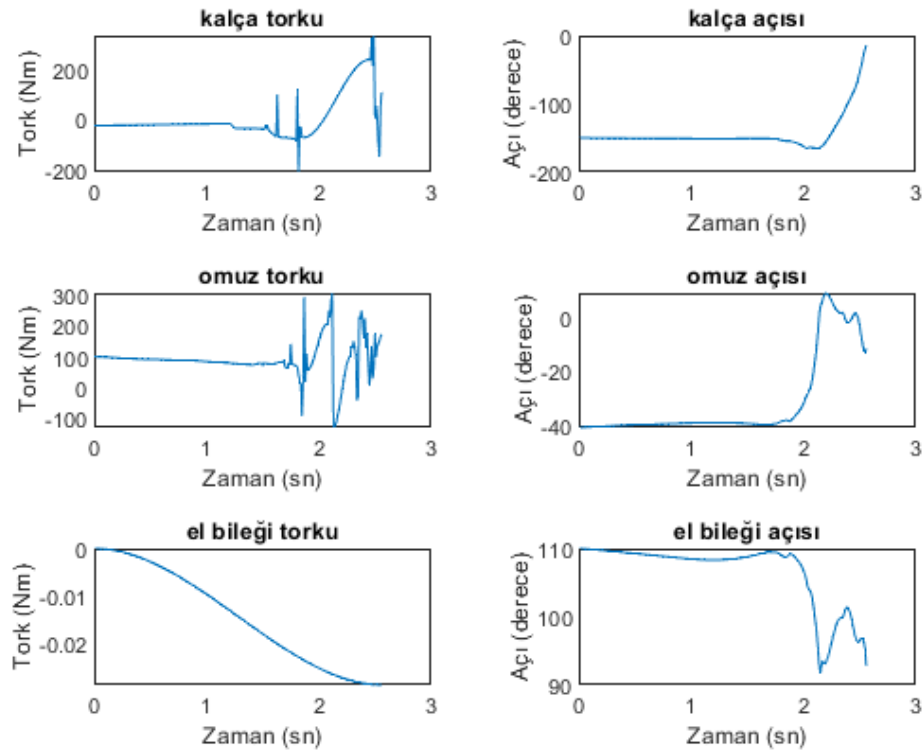
Şekil 4.4: Sabit Bireyin Tork ve Açık Değerleri



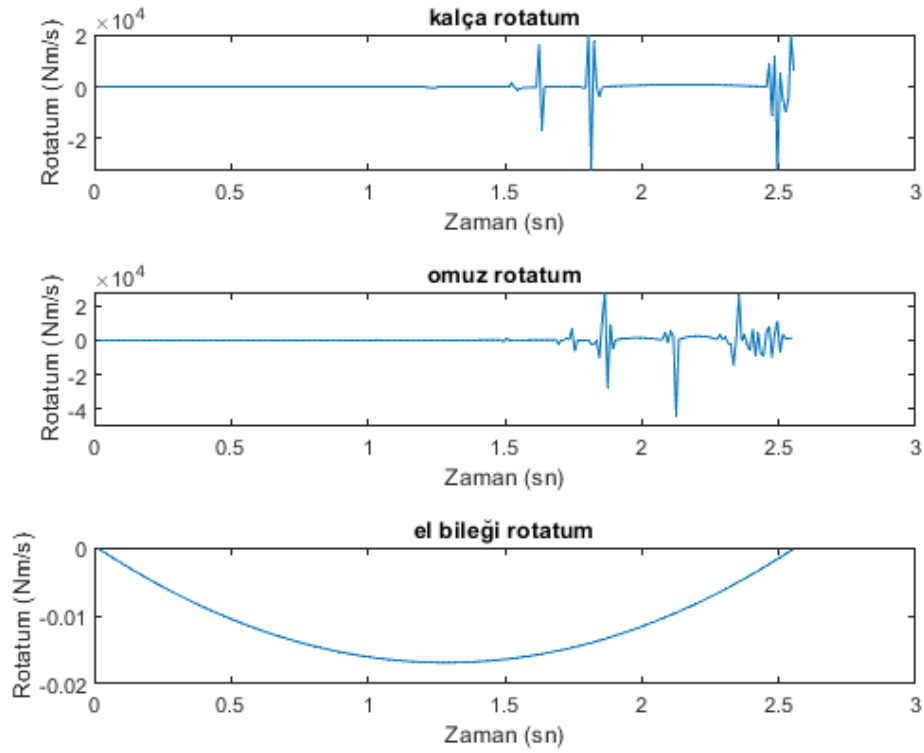
Şekil 4.5: Sabit Bireyin Rotatum Değerleri

### 4.2.3. En İyi Birey: Tork, Rotatum, ve Açı

Bulunan en iyi bireyin tork (genotip) ve açı (fenotip) değerleri Şekil 4.6 ile gösterilmektedir. Eğrisel ara değerlemeli tork sentezinin etkileri tork grafiklerindeki eğri şekillerinden anlaşılabilir. Eğrisel ara değerlendirme ile oluşturulan tork değerlerinde kalça için 52, omuz için 85, el bileği için ise 2 kontrol noktası ile çözüme ulaşılmıştır. Ara değerlendirme sırasında kontrol noktaları üzerine sıklık kısıtlaması getirilmediği için yüksek rotatum değerleri oluşmuştur (Şekil 4.7).



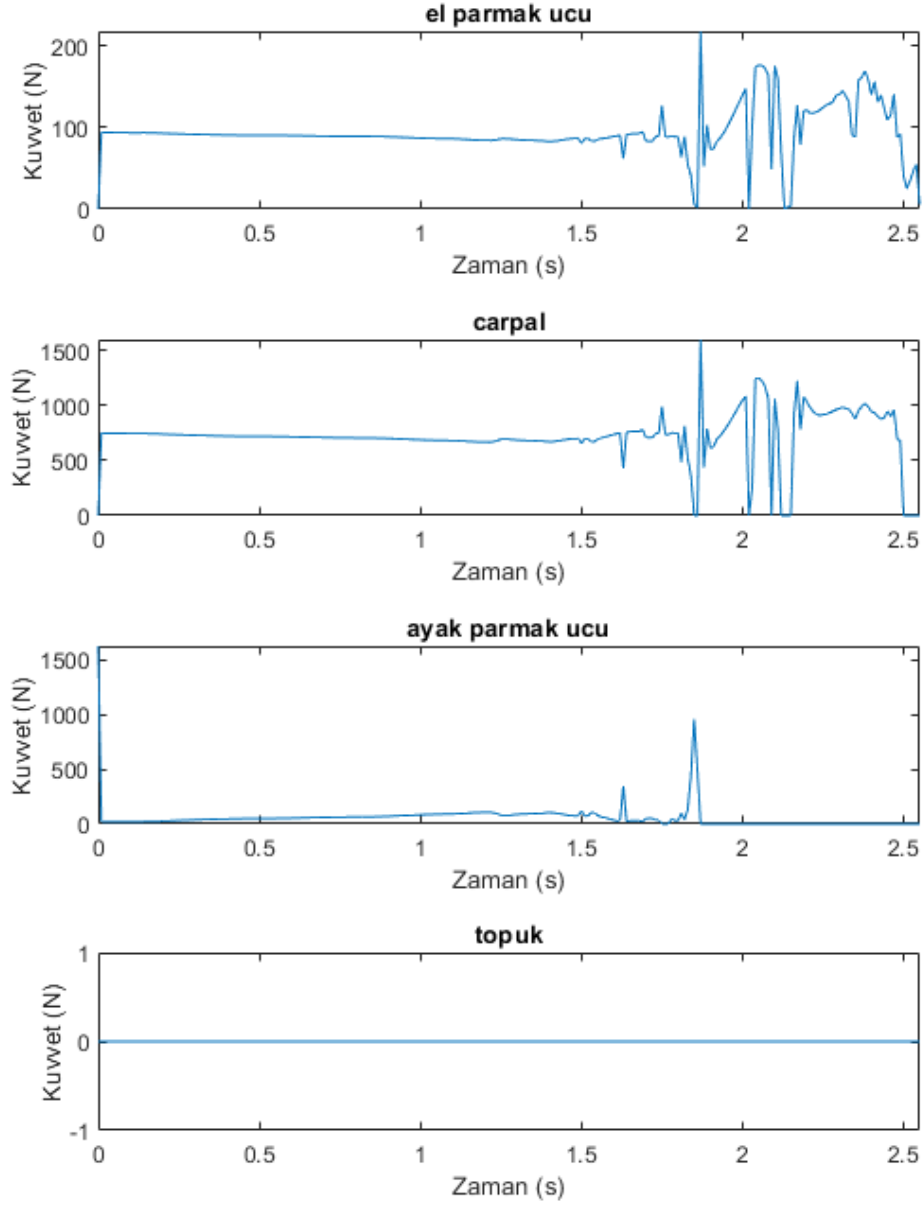
Şekil 4.6: Bulunan En İyi Bireyin Tork ve Açı Değerleri



Şekil 4.7: Bulunan En İyi Bireyin Rotatum Değerleri

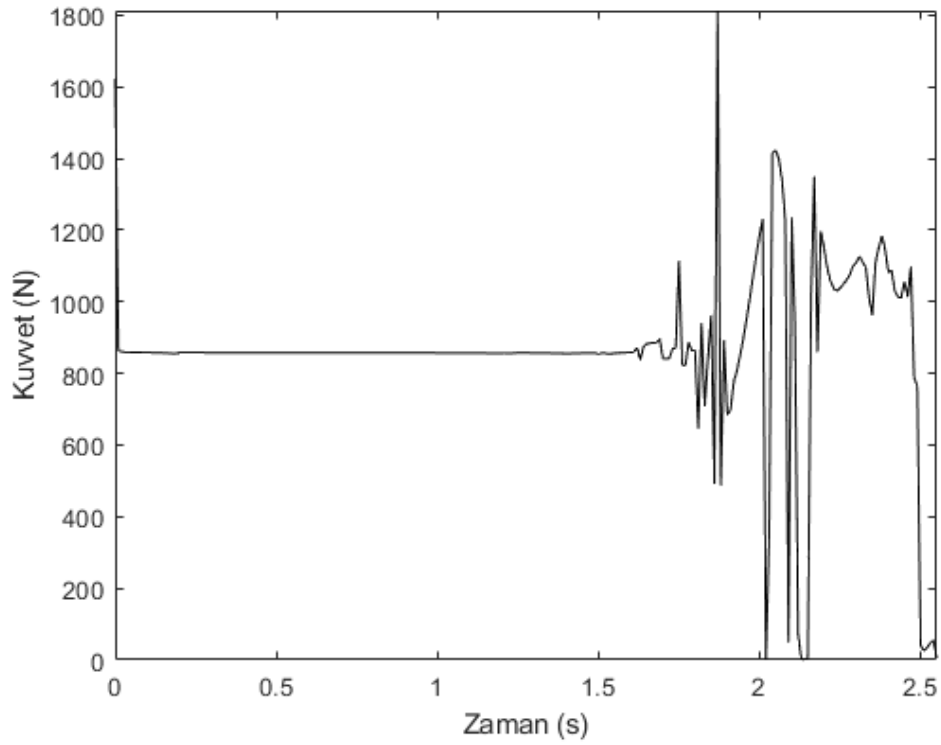
#### 4.2.4. En İyi Birey: Yer Tepki Kuvvetleri

Bulunan en iyi bireyin el parmak ucu, carpal kemik, ayak parmak ucu ve topuk temas noktalarında gerçekleşen yer tepki kuvvetlerinin dikey bileşenleri MATLAB/Simulink tarafından hesaplanmıştır. Yer tepki kuvvetlerinin sürtünmeden doğan yatay bileşenleri MATLAB/Simulink tarafından sağlanmadığı için ayrı bir hesaplama gerektirmektedir. Bu hesaplama zaman kısıtından dolayı gerçekleştirilememiş, sadece dikey bileşenleri elde edilmiştir. Kısaca yer tepki kuvvetleri diyeceğimiz bu dikey bileşenler grafiklendiğinde Şekil 4.8 elde edilmiştir.



Şekil 4.8: Yer Tepki Kuvvetleri

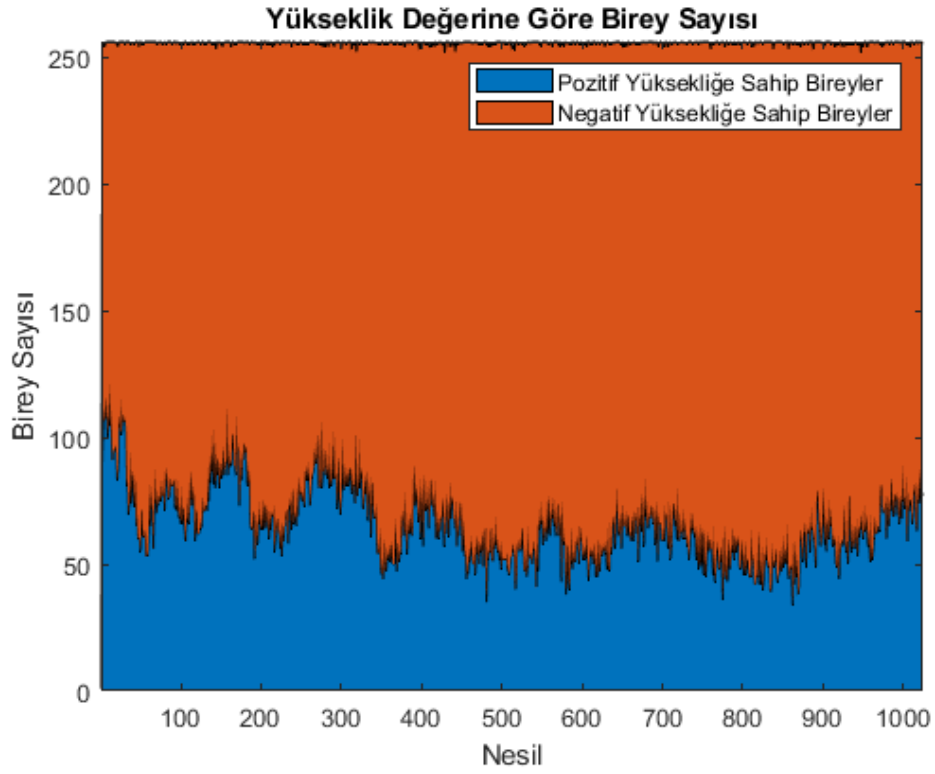
Her ne kadar benzeşim modeli oluşturulurken topuk için bir temas noktası eklenmiş olsa da topuk temas noktası beklenen hareketler için yer ile temas etmemektedir ve yer tepki kuvveti hareket boyunca 0'dır. Şekil 4.8 ile görülen yer tepki kuvvetlerinin dikey bileşenleri toplandığında Şekil 4.9 grafiği elde edilmiştir.



Şekil 4.9: Yer Tepki Kuvvetlerinin Toplamı

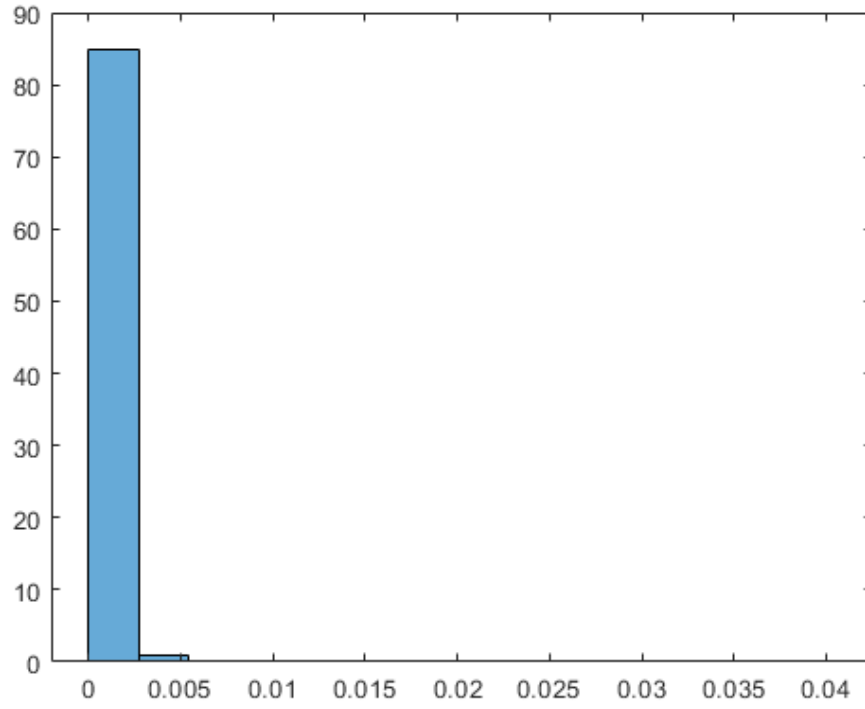
#### 4.2.5. Benzeşim Başarımları

Gerçekleştirilen benzeşimlerin bir kısmı, çözüm bulunamadığı için başarısız olmaktadır. Bunun en büyük etkeni temas benzeşimlerinin katılığıdır. Bunun yanında sentezlenilmeye çalışılan hareketin kısıtlamaları da başarısız olarak adlandırılabilir benzeşimlere yol açmaktadır. Bağımsız amut hareketi için modelin ellerinin yerden kesilmemesi için konulan kısıt bu durumun bir örneğidir. Söz konusu koşuda nesil başına benzeşim başarımları Şekil 4.10 ile gösterilmektedir.



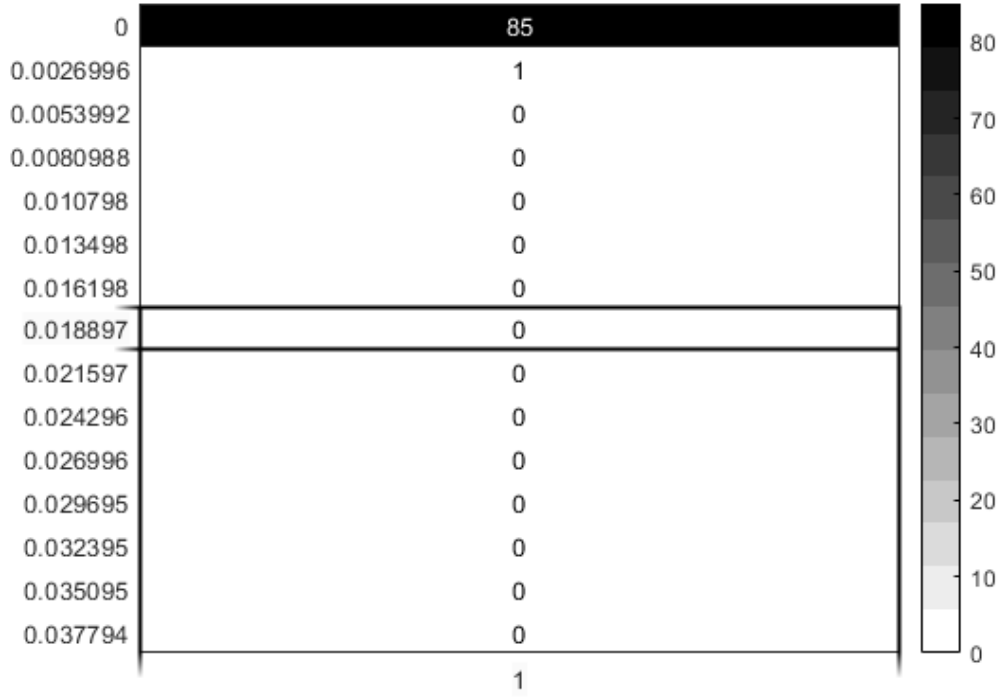
Şekil 4.10: Modelin elleri yerden kesildiğinde negatif yükseklik değeri almaktadır. Pozitif yükseklik değeri ise elleri yerden kesilmediği benzeşimlere aittir.

Başarılı amut hareketi için başlangıç neslinden sonraki nesilde (2. nesil) 85 bireyin (0, 0.0027) denge ölçek değerine sahip olduğu, 1 bireyin ise (0.0027, 0.0054) denge ölçek değerine sahip olduğunu bulduktan sonra bu bilgiyi bir sıklık grafiği olarak çizmek istediğimizde şöyle bir şekilde karşılaşıyoruz:



Şekil 4.11: Denge ölçęęi sıklık grafiği

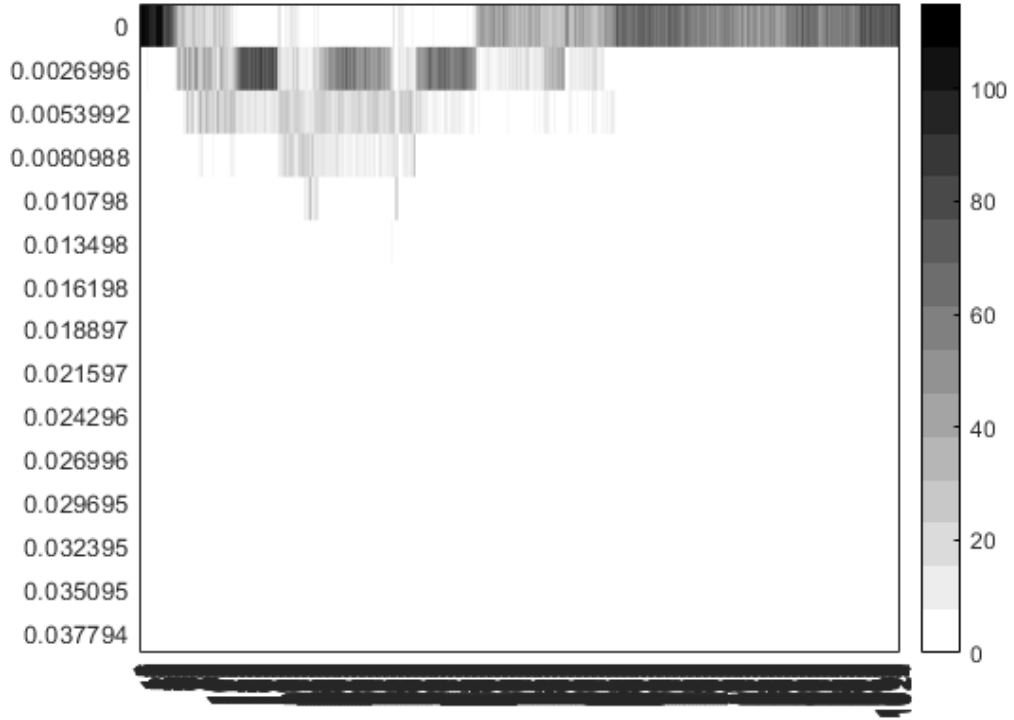
İlk sıklık aralığı olan (0, 0.0027) aralığının, ikinci aralık olan (0.0027, 0.0054) aralığına göre daha yüksek bir sütun ile gösterildiğine dikkat edelim. Bu şekilde yatay ve dikey eksenler farklı değerleri temsil etmektedir. Eğer birey sayısını aynı renk ve farklı yükseklik yerine farklı renk ve aynı yükseklik ile ifade edersek aşağıdaki gibi bir Şekil elde ederiz:



Şekil 4.12: Denge ölçeği tekli ısı haritası

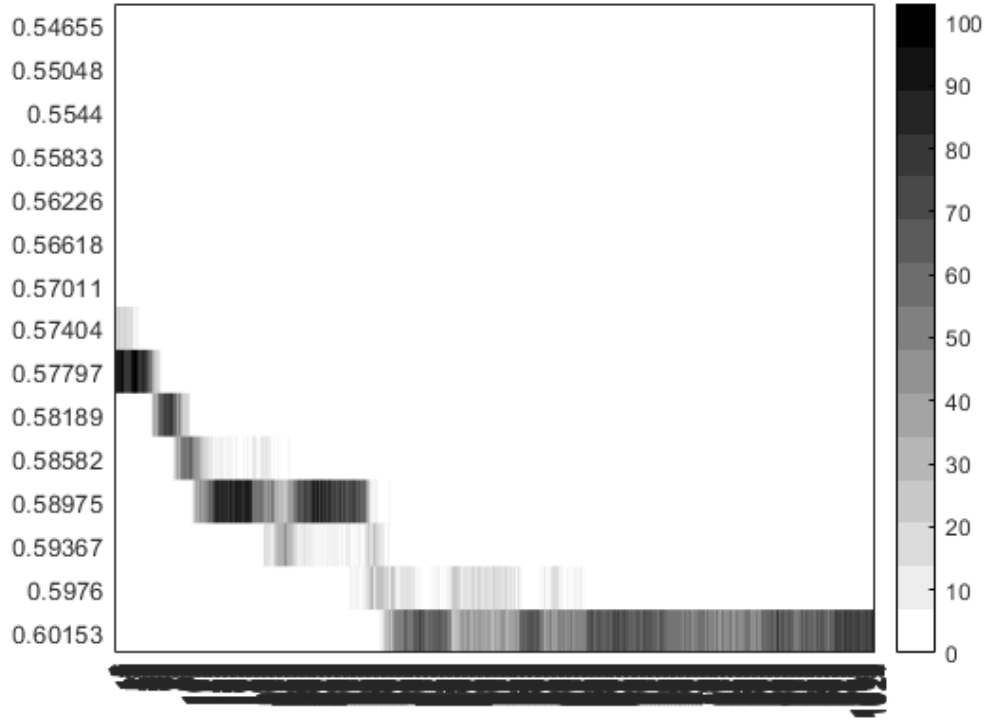
Bu şekilde grafikte verilen bilgiyi sıkıştırarak yatay ekseni önemsiz kılabiliriz. Bu sefer de yatay eksen ile nesilleri ifade edersek denge ölçeğinin nesiller boyunca sıklık değerlerini gösterebiliriz:





Şekil 4.13: Denge ölçeği ısı haritası

Bu grafikte denge ölçeğinin nesiller boyunca baskın olarak 0 değerine yakın olduğunu görebiliriz. Eğer aynı grafiği KMNI ölçeği için çizersek şu grafiği elde ederiz:

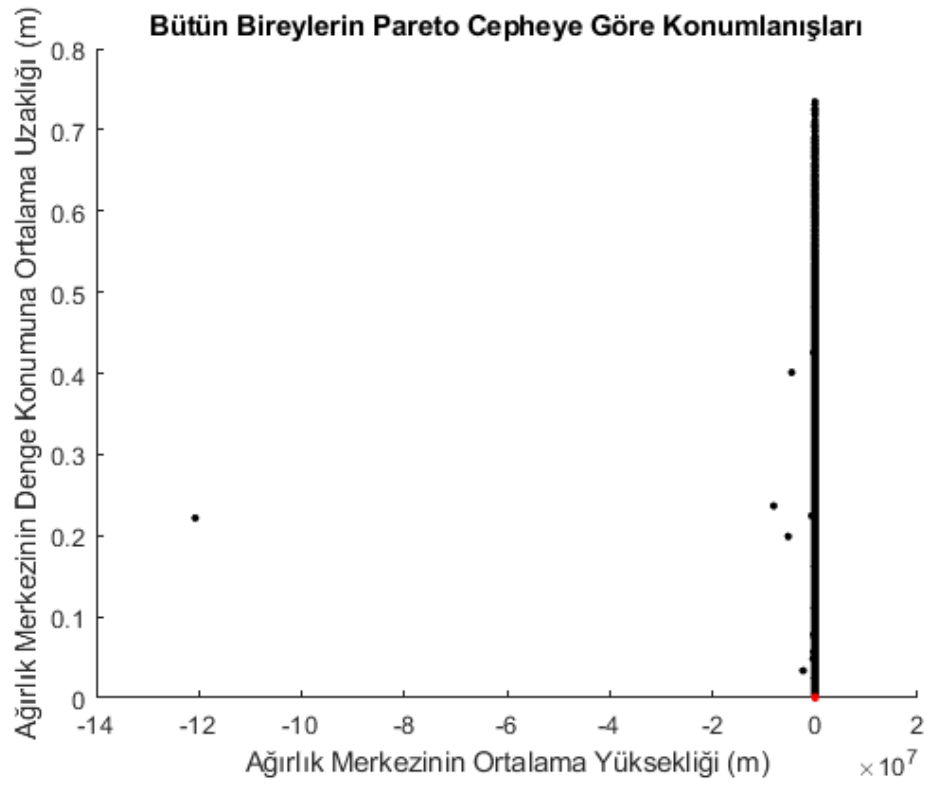


Şekil 4.14: KMNI ölçeği ısı haritası

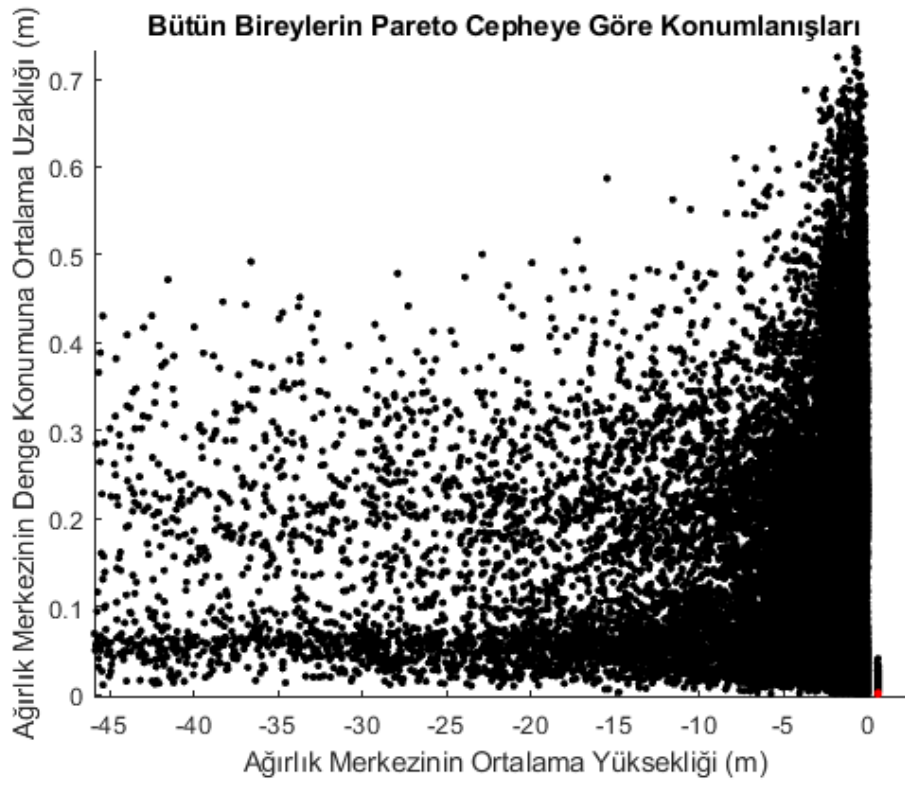
Bu grafikte KMNI ölçeğinin nesiller boyunca artmaya eğilimli olduğu, ve algoritmanın bu koşu için bir KMNI değerine yakınsadığını görülmektedir.

#### 4.2.6. Pareto Cephe

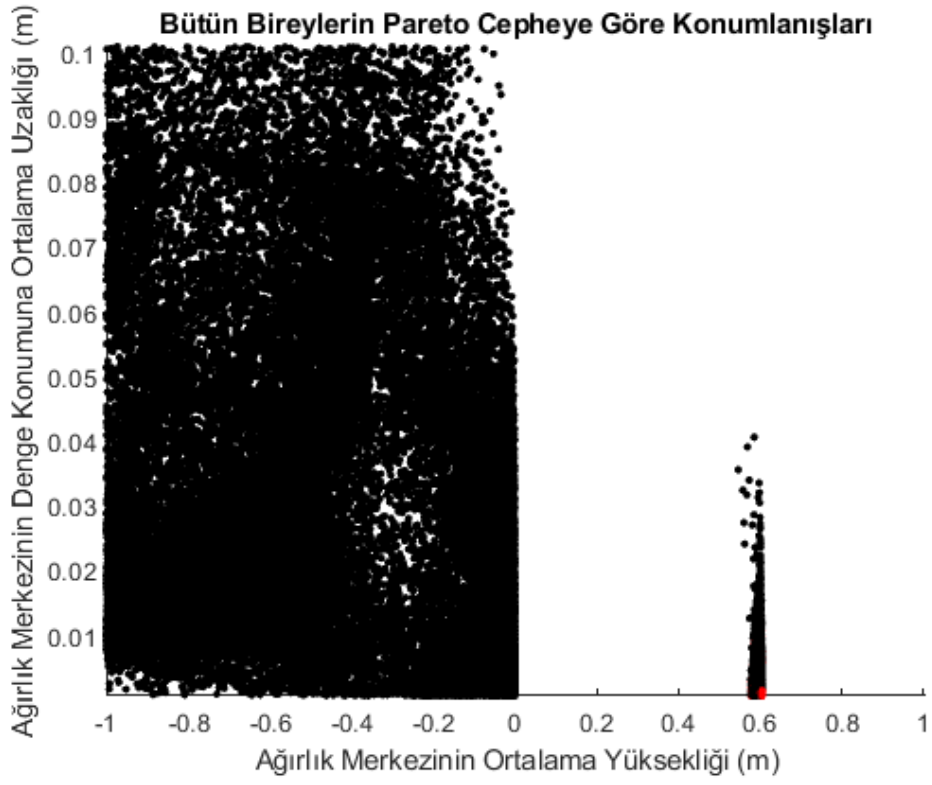
Koşudaki her neslin Pareto cepheleri, bütün bireylerin denge-yükseklik değerleri ile birlikte grafiklendiğinde Şekil 4.15 elde edilmiştir. Bu grafikte ağırlık merkezi ortalama yüksekliğinin 0 olduğu bölüme yaklaşıncaya Şekil 4.16 ortaya çıkmış, biraz daha yaklaşıncaya başarılı bireyler ve oluşturdukları Pareto cepheler daha net görülmektedir (Şekil 4.17). Sadece Pareto cephelerin olduğu bölüme odaklanıldığında ise Şekil 4.18 elde edilmiştir.



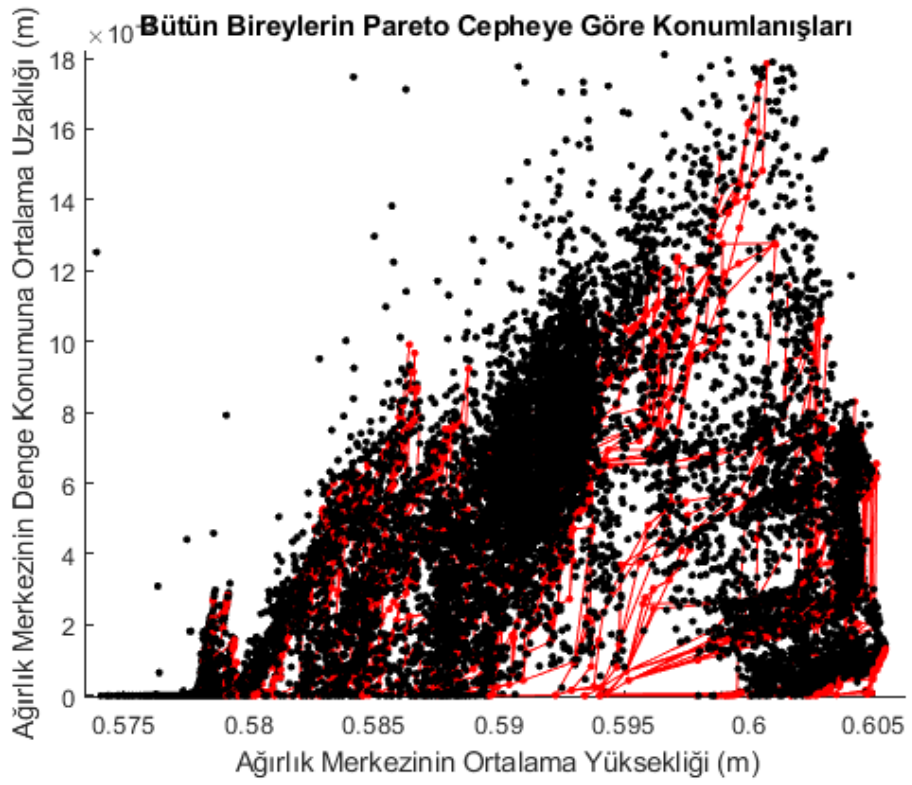
Şekil 4.15: Bütün bireyler grafik eksen ölçeğinin büyüklüğünden dolayı bir arada toplanmış gibi görünmektedir.



Şekil 4.16: Grafiğin bir kısmı büyütülünce başarılı bireylerin, başarısız bireylerden ayrı konumlandıkları görülmeye başlanmaktadır.

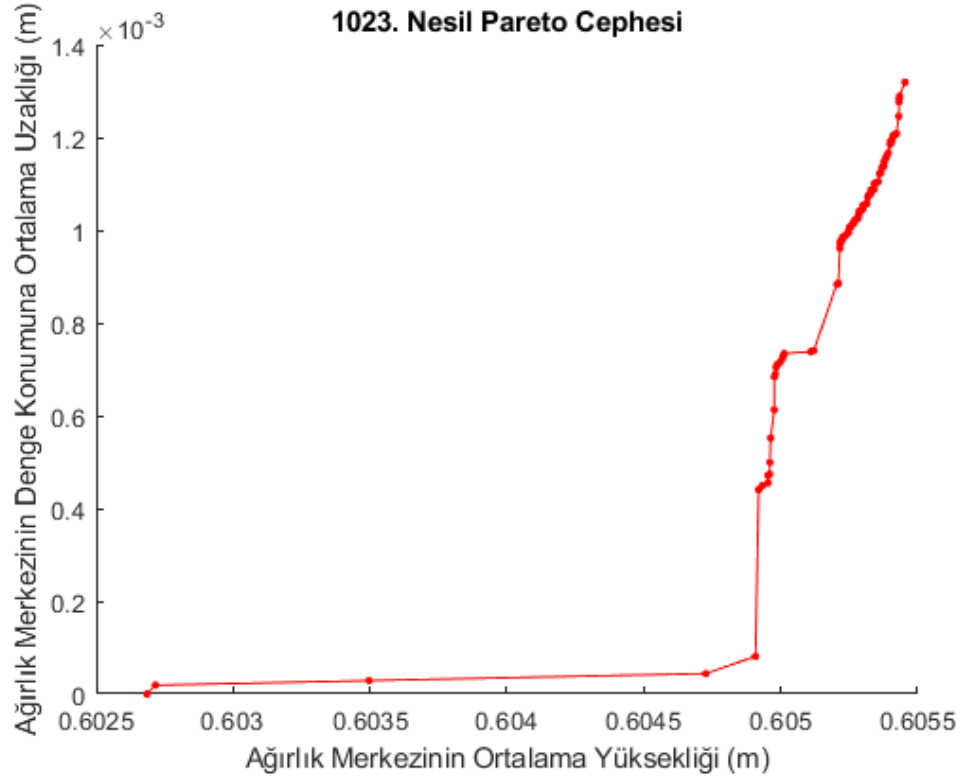


Şekil 4.17: Başarılı bireyler başarısız bireylerden ayrılıyor



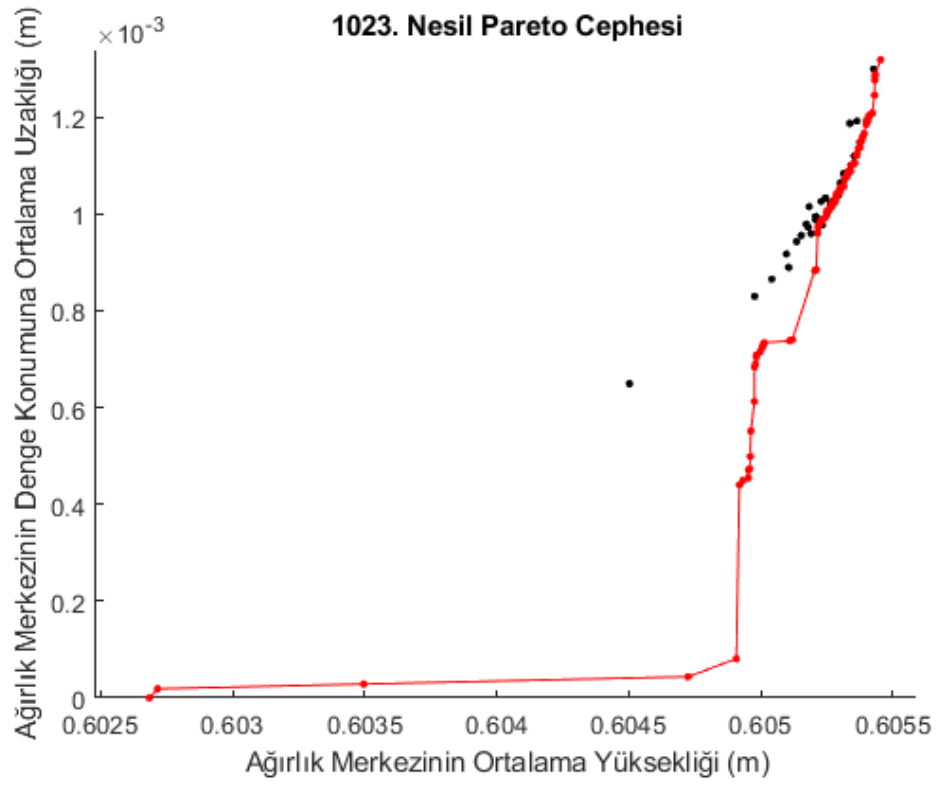
Şekil 4.18: Pareto cephe ve komşuluğundaki başarılı bireyler

Bu karmaşık grafikten Pareto cephenin şeklini anlamak zor olabileceği için sadece son neslin Pareto cephesi Şekil 4.19 ile gösterilmiştir.



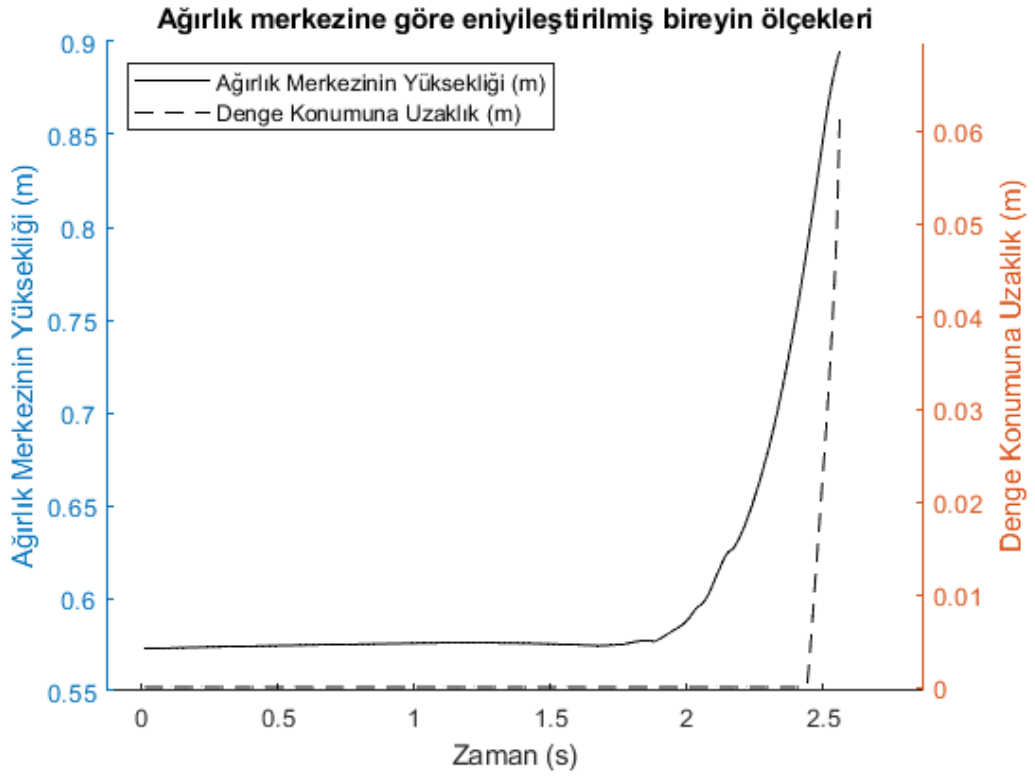
Şekil 4.19: Son Nesil Pareto Cephesi

Görüldüğü üzere Pareto cephe merdiven biçimli bir sınır şeklindedir. Cephe üzerindeki bireylerin kütle merkezlerinin normalize integrali arttıkça birbirine daha fazla yaklaştığı dikkat çekmektedir. Aynı grafikte cepheye yaklaşabilen son nesle ait bireylerin de eklenmiş hali Şekil 4.20 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.20: Son nesil Pareto cephesi ve ona yaklaşabilen bireyler

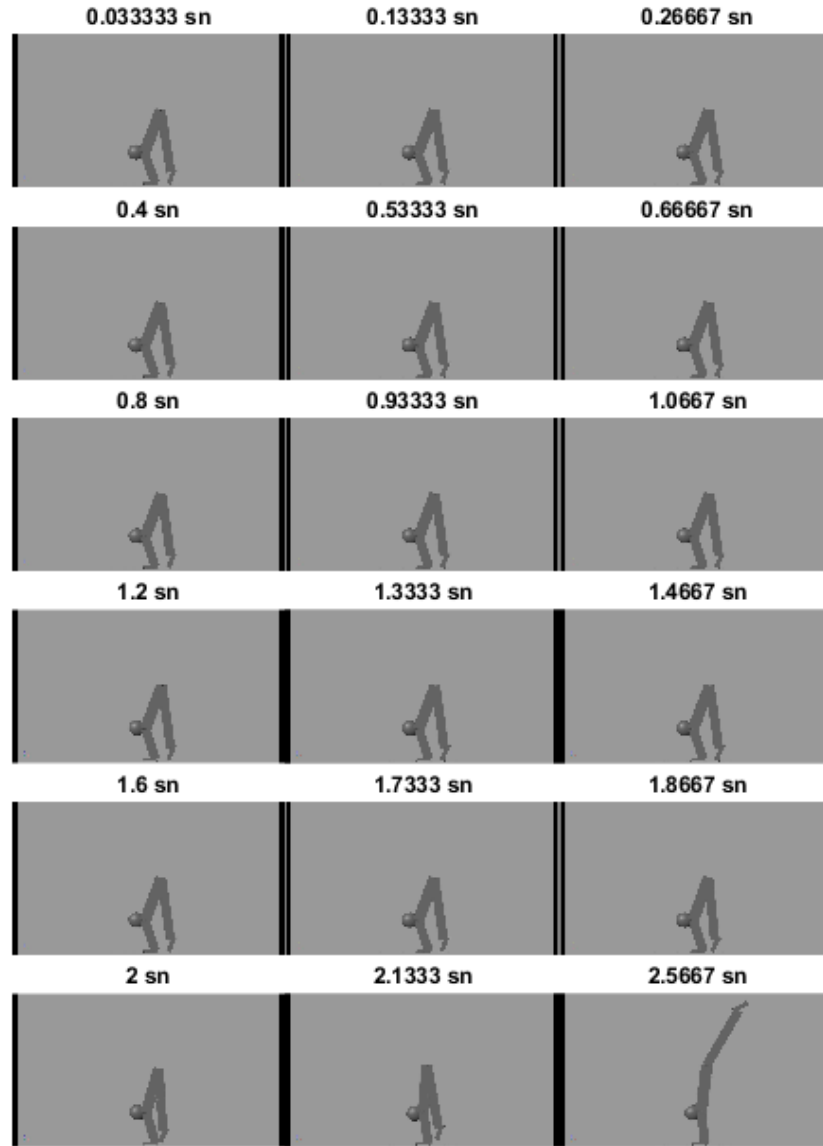
Bu grafiklerin her birinde, her nokta bir bireyi (yani hareketi) temsil etmektedir. Bu bireyler arasından kütle merkezinin denge konumuna ortalama uzaklığı en fazla olan (en başarılı, en iyi) birey için ölçek değerlerinin ortalamaları alınmadan önce ölçek değerleri Şekil 4.21'deki gibidir.



Şekil 4.21: En iyi bireyin ölçek değerleri

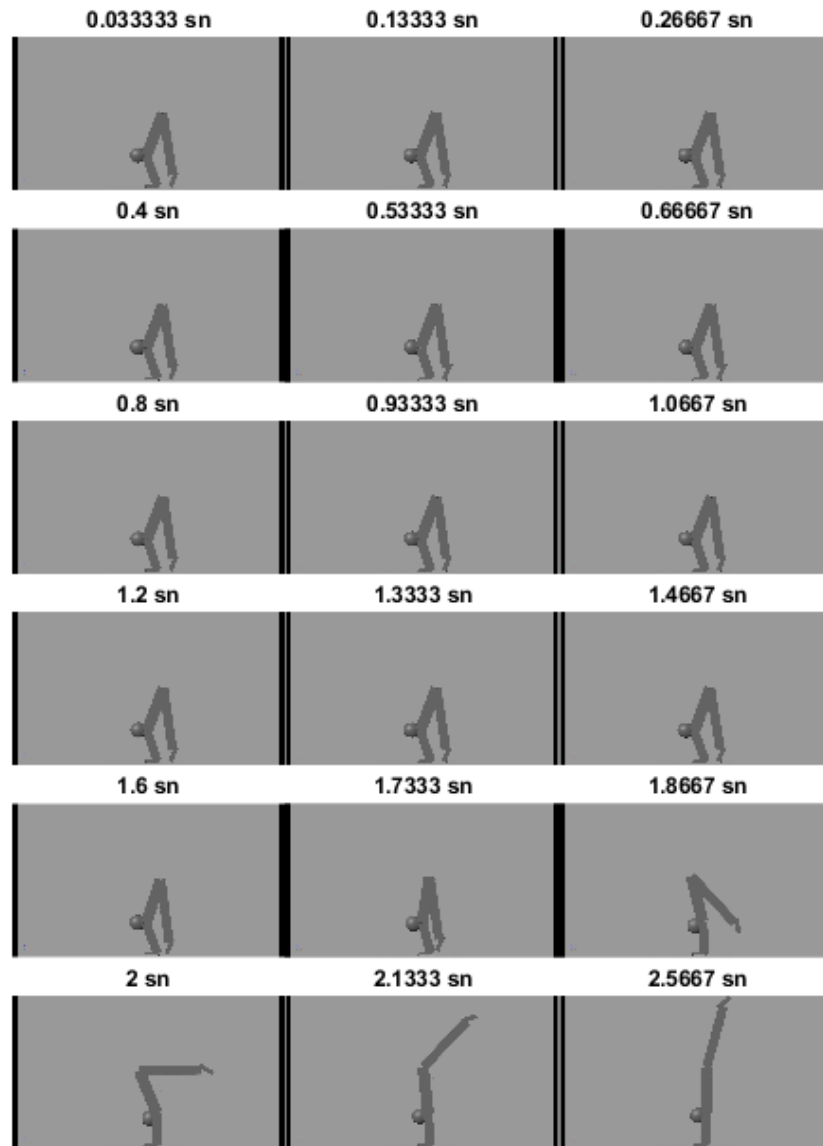
Ölçek değerlerinin hareketin başında sabit olduğu ve sadece hareketin sonlarına yaklaşıldığında artmaya başladığı gözlemlenmektedir. Bunun nedenleri araştırıldığında, algoritmanın her adımda yalnızca bir zaman aralığına etki ettiği için ve hareket başlarında amut hareketine başlandığında hareket sonundaki denge bozulacağı ya da ellerin yerden kesilmesiyle sonuçlanacağı için bu şekilde geliştiği görülmüştür. Benzeşim modelinin bu süreçteki hareketinin görsel anlatımı için Şekil 4.22 incelenebilir.



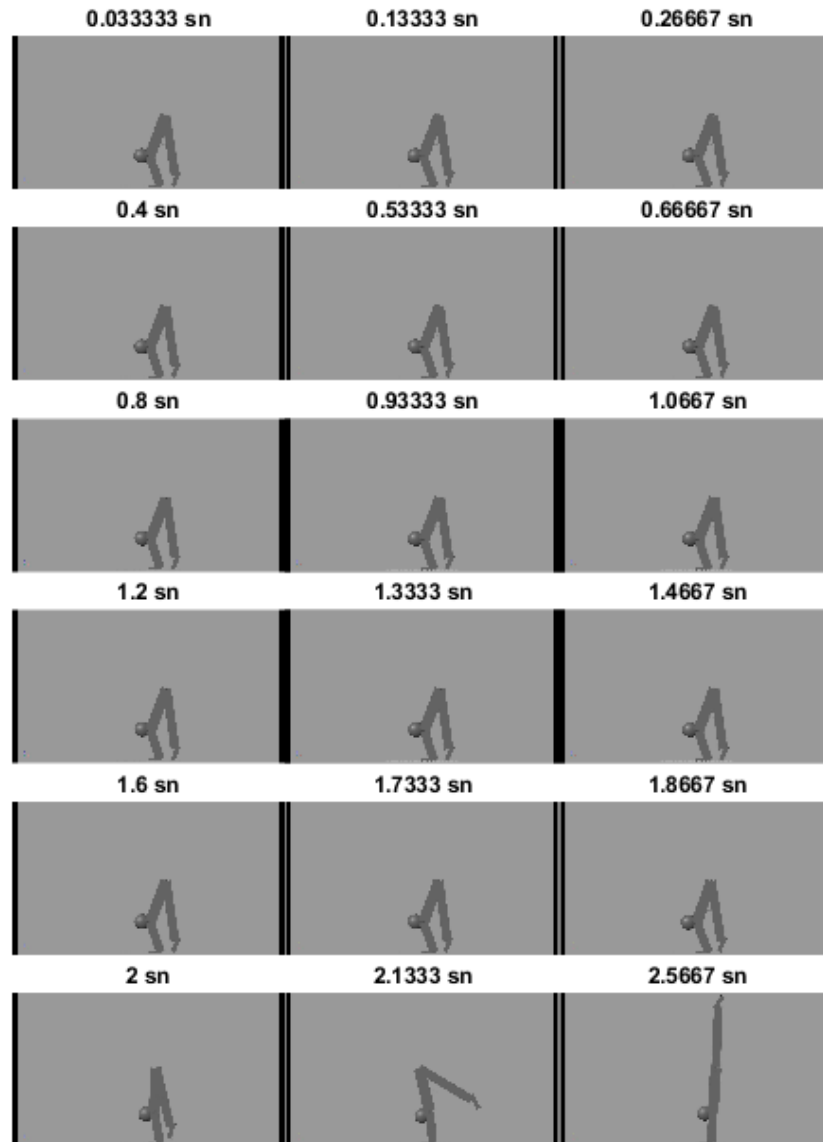


Şekil 4.22: Benzeşim Modelinin Görüntüsü - 1. Koşu

Sonuçların tekrarlanabilirliği için eniyileştirme işlemi 3 defa gerçekleştirilmiştir. Diğer 2 benzeşim için Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 incelenebilir.



Şekil 4.23: Benzeşim Modelinin Görüntüsü - 2. Koşu



Şekil 4.24: Benzeşim Modelinin Görüntüsü - 3. Koşu

Şekillerden görülebileceği üzere her eniyileştirme işleminde farklı bir hareket sentezlenmiştir.

Sonuç olarak;

- kısıtlanmış amut hareketi sentezi için ağırlık-tabanlı bir ölçek yeterli olurken (bkz. EK-3),
- bağımsız amut hareketi sentezi için ara değerlendirme ile çözüm adayları azaltılıp Pareto cephe aracılığıyla çözüme yakınsanabildiği

tespit edilmiştir.

## 5 TARTIŞMA

Daha önce yapılan çalışmalar genellikle yürüyüş hareketinin kontrolü üzerine özelleşerek genelleştirilebilirliklerinden ödün vermiştir. Bunun yanında, genellikle hareketleri anlamaya yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Başka bir deyişle literatürde tahminsel eniyileştirmelerden çok takipsel eniyileştirmeler baskın durumdadır.

Tezde önerilen yöntem tahminsel insan hareketi sentezini hedeflese de algoritmanın başlangıç popülasyonu deneysel bir performansa dayalı olduğunda yöntem, bu deneysel performansın eniyileştirilmesi için de kullanılabilir. Bu açıdan bakıldığında literatürdeki takipsel eniyileştirme çalışmalarının hedef aldıkları problemler, bu tez kapsamında birer alt problem olarak görülebilir.

### 5.1. Literatürde Hareket Sentezi

Hareket sentezi için bir çok yöntem geliştirilmiştir. Tez kapsamında incelenen bazı yöntemler için (bkz. 2.1).

Hareket sentezi için yürütülen araştırmaların bir kısmı kontrolcü oluşturmaya odaklıdır. Kontrolcüler iki sınıfa ayrılır: Açık-döngü kontrolcüler ve kapalı-döngü kontrolcüler. Açık döngü kontrolcüler, sistemden (tezde; benzeşim modelinden) bir geribildirim almadan sistemi yöneten kontrolcülerdir. Tezde geliştirilen yöntem modelden herhangi bir bilgi almadan, sadece hangi anda hangi tork değerinin uygulanacağını belirleyerek bir açık-döngü kontrolcü olarak çalışmaktadır. Kapalı döngü kontrolcüler ise sistemden aldığı geribildirimler aracılığıyla sistemi yönetir (tezdeki karşılığı; eniyileştirme gerçekleştirir).

Stokastik bir yöntem kullanmayan, ya da deterministik/tekrarlanabilir kapalı döngü kontrolcüler, girdi olarak aldıkları parametreleri *biricik* bir çıktıya taşırlar. Eğer parametreleri sistemin durum vektöründen (tezde; açı, tork değerleri) ibaret ise her durum vektörüne biricik bir çıktı karşılık gelecektir. Sonuç olarak da söz konusu durum vektörünün her tekrarı aynı çıktıya yol açacaktır. Bu durumda hareket eniyileştirmesi için kullanıldığında sentezleyebilecekleri hareketler periyodik hareketlerle sınırlı kalacaktır. Bu kısıtlamayı aşabilmek için bahsi geçen kapalı döngü kontrolcü zamansal bir girdi de almak zorundadır. Burada bahsedilen zamansal bir girdi, sadece bildiğimiz anlamda zaman olabileceği gibi hareketi aşamalandırmaya yarayan herhangi bir girdi

olabilir. Bu aşamalandırmaya örnek olarak anahtar pozlar verilebilir.

Bazı çalışmalar anahtar pozlar aracılığıyla hareketin genel gidişatını belirleyerek bu anahtar pozların ara değerlerini bulmaktadır. Hem anahtar pozların belirlenmesi hem de ara değerlerin oluşturulması için çeşitli yöntemler geliştirilmiş olsa da bu yöntem, hareketin nasıl gerçekleştirilmesi gerektiği konusunda ciddi bir kısıtlama getirmektedirler. Zaten Noritake ve ark. (11) makalelerinin en başında sentezlenen Tai-Chi hareketlerinin biçimsel olarak katı sınırlılığında bahsetmişlerdir.

Yapay sinir ağları kullanan çalışmalar ya deneysel hareketler kullanarak eğitimlikleri ağlar ile hareket sentezi gerçekleştirilmekte (Yu ve ark. (35), Park ve ark. (44), Xu ve ark. (46)), ya da belirledikleri bir maliyet fonksiyonunu kullanarak bir derin destekli öğrenme yöntemini uygulamaktadırlar (Yin ve ark. (7)). İkinci yöntem için kullanılan maliyet fonksiyonları *ağırlıklı ölçek* kullanmaktadır.

Literatürde karşılaşılan başka bir yöntem, müfredat öğrenmesi aracılığıyla problem kısıtlarını adım adım olarak değiştirerek probleme entegre etmektir (Yin ve ark. (7)). Bu yöntem, öğretmenlerin önce basit problemlerin çözümünü öğretmesi sonra problemleri adım adım zorlaştırarak öğrencilerine karmaşık yetileri kazandırmasından esinlenmiştir.

Çalışmaların bir kısmında deneysel bir hareketi takip ederek başlayan, sonra bu deneysel hareketi eniyileştirmek hedeflenmiştir. Bu yaklaşım başlangıç hareketinden yola çıkarak bir yerel eniyiyi bulmayı hedeflemektedir. Bu tür sentezlerin deneysel verileri esas alarak küresel eniyiyi ya da diğer eniyileri dışladığı ve hareket üzerinde ciddi bir kısıtlama getirdiği öngörülmektedir. Bu çalışma kapsamında deneysel verilerden yola çıkan sentezler, takipsel sentez olarak adlandırılmaktadır. Takipsel sentez kavramını literatürde kullanılan takipsel benzeşimden ayrı tutmak gerekir. Takipsel benzeşim, bir benzeşimi gerçekleştirmek için deneysel bir verinin kullanılmasıdır. Bu çalışmada tahminsel sentez ise hareket sentezini deneysel verilere başvurmadan gerçekleştirmek şeklinde tanımlanmıştır. Bu yaklaşımın çeşitli yerel eniyileri dışlamadan hareket sentezine daha objektif bir bakış getirdiği düşünülmektedir.

Derin destekli öğrenme yöntemini kullanmayan yapay sinir ağları ile yürütülen çalışmalar, anahtar pozlar yöntemini kullanan çalışmalar takipsel senteze örnek oluşturmaktadır. Derin destekli öğrenme, evrimsel algoritmalar gibi yöntemler ise tahminsel sentez yürütebilmektedir.

Literatür taranırken belirli makaleler seçilmiş, sonra bu makalelere atıfta bulunan veya bu makalelerin atıfta bulunduğu bütün makaleler bir listeye eklenmiştir. Bu listede bulunan makaleler için de aynı işlem gerçekleştirilerek bu işlem devam ettirilmiştir. Sonuç olarak kaynaklar altında yer alan makaleler ve tezde yer bulamayan ama konu ile ilgili 103 makaleden ulaşılan yaklaşık 8800 çalışma taranmıştır. Bu taramanın sonunda tezde gerçekleştirilen yönteme yakın sayılabilecek çalışmalara Tablo 2.1’de yer verilmiştir. Sonuç olarak görülmektedir ki literatürde tahminsel sentez gerçekleştirirken açık-döngü kontrolcü kullanan çalışmaların sayısı azdır. Bu kriterlere uyan çalışmalar ise deneysel çalışmalarla uyumlu olabilmek için eniyileştirme hedeflerini oldukça kısıtlamışlardır. Böylece sentezlenen hareketlerin gerçekçiliğini onaylamış olsalar da gerçekleştirilmemiş ama gerçekleştirilebilir hareketleri dışlamışlardır.

Tez, bu açıdan benzer çalışmalardan farklı bir konumda yer almaktadır.

## 5.2. İnsan Hareketi Sentezinde Önyargı

Çalışmanın hedeflerinden biri olan insan hareketinin önyargsız sentezinin anlaşılabilmesi için bu bağlamda önyargı olgusuna değinilmesi gerekmektedir. **Önyargı**, bir hareketin bilinen ya da tahmin edilen özelliklerine dair varsayımlarda bulunarak hareket tanımının daraltılması olarak tanımlanmaktadır. Örneğin yürüme hareketinin enerji azaltımını hedeflediği varsayıldığında asıl hedefi bu olmayan yürüme hareketleri (örn. yokuş aşağı yürüme Hunter ve ark. (56), egzersiz amaçlı yürüme Gaesser ve ark. (57)) araştırma kapsamında dezavantajlı bir durumda olacaktır. Yürüyüş dinamikleri ayrıca yaşa (van der Kruk ve ark. (58), Boyer ve ark. (59)), antropometriye (Black ve ark. (60)), alışkanlıklara (de Rugby ve ark. (61)), ve hatta topluma (Wallace ve ark. (62)) göre de değişiklik göstermektedir.

Her insanın aynı yürüyüş dinamiklerine sahip olmadığı ve gerçekleştirilen harekete göre hareket sentezi için uygulanabilecek maliyet fonksiyonlarının değişebileceğini tespit ettikten sonra bu hedeflerin bulunabilmesi için yapılan çalışmalara değinmek gerekir: *Ters eniyi kontrol* adı verilen bir yöntemle bir hareketin hedeflerini kestirebilmek mümkündür (Mombaur ve Clever (63), Clever ve ark. (64), Byeon ve ark. (65), Tang ve ark. (66), Weng ve ark. (67)).

Eniyileştirme yöntemi kullanımı başlı başına bir önyargı kaynağı olarak değerlendirilebilir. Hem genel olarak eniyileştirmenin, hem de genetik algoritmaların getirdiği önyargı kaynaklarını derlemek istersek:

- eniyileştirme hedefi, bu hedefe uygun olmayan bütün hareketlere karşı önyargılıdır,
- eniyileştirme başlangıç hareketi, bu hareketin komşuluğundan uzak hareketlere karşı önyargılıdır,
- genetik algoritmalarda uygulanan eliminasyon yöntemi, eniyileştirme hedefini yürütmekle sorumlu olduğu için bir önyargı kaynağı olarak değerlendirilebilir,
- genetik algoritmalarda kullanılan ebeveyn seçimi, yeni bireylerin çeşitliliğini etkilediği için bir önyargı kaynağıdır,
- genetik algoritmalarda kullanılan varyasyon operatörleri, bireylerin üretim şekli üzerinden bir önyargı kaynağıdır,

Eniyileştirme hedefi bir önyargı noktasıdır. Örneğin Xu ve ark. (46), eniyileştirme fonksiyonunu belirlerken kullandıkları parametreler aracılığıyla ulaşmak istedikleri yürüme hareketini kısıtlamış ve harekete dair bir önyargı oluşturmuşlardır.

Eniyileştirme başlangıç hareketinin belirlenmesi aşamasında bir önyargı oluşturulabilir. Örneğin Hiley ve Yeadon (20), paralel barda salto hareketinin eniyileştirilmesi için bir cimnastikçinin deneysel performansını takip eden bir simülasyonu başlangıç hareketi olarak kullanmıştır. Dolayısıyla sentezlenen hareketlerin bu performanstan ayrılması beklenmemektedir. Kon ve Sahin (39) genetik algoritmalarla sakat bir dört ayaklı robot için yürüme sentezi gerçekleştirmek için başlangıç neslini elle ayarlanmış tek bir hareket olarak seçmişlerdir. Makalede belirtildiği üzere bu yöntem ne kadar çözümden gelişimi teşvik etse de daha spastik bir çözümün daha iyi bir çözüme yol açma olasılığı yüksektir.

Eliminasyon yöntemi, eniyileştirme probleminde hangi bireylerin dışlanacağını belirlemekten sorumludur. Çalışma kapsamında benzeşimi gerçekleştirilemeyen hareketler ile örneğin amut hareketinde elleri yerden kesildiği için başarısız olarak görülen bireyler elenmektedir. Bunun yanında çözüm adımları Pareto cephe üzerinden yürümekte olduğu için bu cephenin dışında kalan hareketler de elenmektedir.

Ebeveyn seçimi, eniyileştirme probleminin çözüm adaylarının genetik altyapısını belirlemektedir. Bu çalışma kapsamında yeni hareketlerin tork değerlerinin hangi tork değerlerinde elde edildiğini belirlemektedir. Ebeveyn seçim yöntemi olarak uygunluk oranlı seçilim kullanıldığı için ilgili ölçeğe ayrıcalık tanınmaktadır.

Varyasyon operatörleri yeni bireylerin üretilirken ebeveynlerinden nasıl bir



farklılıkla ayrıldığını belirlemektedir. Bu nedenle bir bireyden (ebeveynden) başka bir bireyin (çocuğun) üretimini sınırlayıcı bir rol oynayabilmektedirler. Bu sınırlama, eniyileştirme sürecinin yakınsaması için kolaylık sağlamakla birlikte bir kısım bireyin üretilmesini imkansız kılabilirler.

Bu gerçekler göz önüne alındığında bir eniyileştirme yönteminin kullanılmasının, özellikle genetik algoritmaların kullanılmasının önyargısız hareket sentezi hedefiyle çeliştiği görülmektedir. Bu noktada elimizden gelen tek şey yöntemin olabildiğince az önyargıya sahip olmasını hedeflemektir. Eniyileştirme hedefi hareketin tanımı olarak kullanıldığında, hareketin sentezi açısından bir önyargı oluşturmadığı kabul edilebilir. Başlangıç hareketinin bütün tork değerlerinin sıfır olması ya da başlangıç pozisyonunda sabit duran birey olarak belirlenmesi, oluşturduğu önyargı potansiyelini varyasyon operatörlerine aktaracaktır. Örneğin herhangi bir bireyden herhangi başka bir birey üretilebiliyor olursa başlangıç bireyinin uzun vadede bir etkisi olmayacaktır. Eliminasyon yöntemi ve ebeveyn seçimi de aynı şekilde varyasyon operatörlerinin kısıtları nedeniyle bir önyargı noktası olarak görülebilir: Her nesilde herhangi bir bireyin üretimi mümkün olduğunda eliminasyon yöntemi sadece hangi ara bireylerin üretileceğini etkileyecektir. Dolayısıyla genetik algoritmalar için önyargının varyasyon operatörleri ile yönetilebileceği öne sürülebilir.

Dolayısıyla bu çalışma genetik algoritmaların hareket sentezi için kullanımına bir giriş niteliği taşımakta ve önyargısız hareket sentezi için bir araştırma doğrultusu belirlemektedir.

### **5.3. Amut Sentezinin Eniyileştirme Hedefi**

Çalışmada gerçekleştirilen amut hareketi sentezinde eniyileştirme hedefi KMNİ olarak belirlenmişti. Yardımcı hedef (ya da baskı hedefi) olarak da literatürde kullanılan sıfır moment noktası kavramına yakın bir ölçek olan denge ölçeği kullanılmıştı.

Bir çok çalışmada enerji azaltımı, değişmez bir hareket sentezi hedefi olarak karşımıza çıkmaktadır. Leboeuf ve ark. (68), amut hareketinde enerji azaltımı ile efor azaltımı hedeflerini karşılaştırarak uzman cimnastikçilerin enerji azaltımını tercih ettiğini, efor azaltımının ise yeni başlayan cimnastikçiler tarafından kullanıldığını belirtmektedir.

Bu bağlamda amut hareketi sentezlenirken bir enerji hedefi uygulanmayarak uzman cimnastikçilerden çok yeni başlayanların gerçekleştirebileceği bir hareket sentezi gerçekleştirildiği sonucuna varılmıştır.

Yeadon ve Trewartha (69) ve Blenkinsop ve ark. (70) el üzerinde dengede durmak için kullanılan stratejiler üzerine tartışmaktadır. Hareket sentezi zaman sıkıntısından dolayı (amut hareketi sentezi 10 saat sürmüştür) el üzerinde dengede durma aşamasına gelemediği için bu konuda bir tartışmak şu an için mümkün değildir.

#### 5.4. Model Tasarımı

Çalışmada kullanılan model güncel literatürdeki örneklere göre oldukça basit olmasına rağmen hedeflenen amaç için yeterli olduğu öngörülmektedir. Yine de, ilerleyen çalışmalarda daha gelişmiş modellerin kullanılması önemlidir.

Modelin az sayıda ekleme sahip olması çözüm uzayını küçülttüğü için hem benzeşim sürelerini hem de eniyileştirme süresini azaltan bir rol oynamıştır.

Modelin tork sınırları zirve torklar olarak tasarlanmış olsa da bu bilgi algoritmaya yansıtılmadığı için algoritma tarafından düzenli olarak uygulanabilecek maksimum tork şeklinde kullanılmıştır. Bunun sonucu olarak tork sınırları modeli gerçekçilikten uzaklaştırmıştır. Bir yorgunluk konsepti uygulanmadığı için ortaya çıkan bu durum çalışmanın zayıflıklarından biri olmuştur.

Benzeşim girdisi olarak verilen tork dizileri daha önceden belirlenen maksimum ve minimum tork değerleri arasında üretilmekteydi (Bkz. Şekil 3.22). Fakat elektriksel kontrol sinyali ile kuvvet üretimi arasındaki biyolojik sistemdeki çeşitli elektriksel, kimyasal ve mekanik gecikmelerden dolayı keyfi miktarlarda tork üretimi mümkün değildir (Kidziński ve ark. (34)). Bundan dolayı tork sınırlaması biyolojik gerçekçilik için bir adım olmasına rağmen yeterli değildir. Bu gerçekçiliğe kas sistemleri yerine eklemlerin kullanımıyla erişebilmek mümkündür (Jiang ve ark. (3)). Keyfi miktarlardaki tork üretiminin etkisini rotatum grafiklemelerinde görebiliriz (Bkz. Şekil 4.7).

Temas parametrelerinin çalışmanın ilk aşamalarında MATLAB/Simulink ortamının varsayılan değerlerinde bırakılması gerçekçilikten uzak benzeşimlere yol açarak başarısız birey sayısını artırdığı tespit edilmiştir. Sonraki aşamalarda bu parametrelerin iyileştirilmesi beklenmedik bir gerçekçilik ve performans artışına yol açmıştır. Bu parametrelerin gözden geçirilmesinin benzeşimlerin gerçekçiliğini artırdığı gibi

eniyleştirme performansını da olumlu etkileme potansiyeline sahip olduğu öngörülmektedir.

## 5.5. Benzeşim

Benzeşim çözücü olarak kullanılan ode15s algoritması ile elde edilen performans Bölüm 4'te belgelenmişti. Bir koşu için yapılması yürütülmesi gereken benzeşim sayısı göz önüne alındığında bu performansın artırılmasının avantajlı olacağı açıktır. Bunun için merkezi işlemci üzerinde çalışan başka bir yazılım kullanılabilirdi gibi paralel işlemler için daha uygun olan grafik işlemciler üzerinde çalışan bir yazılım da kullanılabilir (48). Bunun için bir kaç yazılım kütüphanesi denenmiş olsa da gerek dökümantasyon gerek kullanıcı desteği açısından elverişsiz oldukları için kullanılmamıştır.

Koşular sırasında bazı nesillerde ortalama benzeşim süresinin arttığını görmüştük ((Bkz. Şekil 4.1)). Bunun nedenleri araştırılmış, bu olgu kesin bir nedene bağlanamamıştır. Benzeşim modelindeki eklemelerin tek yönde döndüğü göz önüne alınarak sistemdeki bu düzensizliğin, eklemelerin dönme eksenleri dışında bir tork oluşturmaları beklenmiş, bu varsayımın tekil benzeşimlerin ilgili grafikleri incelenerek gerçek dışı olduğu görülmüştür. Bu fenomeni açıklayabilecek başka bir diğer hipotez ise eklem açısı sınırları için kullanılan yay-damper parametreleri olarak öne sürülmüş, fakat sınırlamayla ilgili torklar grafiklendiğinde bunun da gerçek dışı olduğu görülmüştür. Bunun en iyi ilişki, carpal kemik temas noktasının yerden kesildiği anlarla örtüşüren grafik olmuştur ((Bkz. Şekil 4.3)).

## 5.6. Genetik Algoritma Tasarımı

Genetik algoritma tasarlanırken en saf tasarımdan başlanarak adım adım Tablo 4.1 ile özetlenen algoritmaya ulaşılmıştır. Bu tasarım süreci aşağıdaki başlıklar altında parçalara ayrılarak tartışılmıştır.

### 5.6.1. Başlangıç Popülasyonu

Nüfus temelli bir algoritma için sıklıkla kullanılan başlangıç popülasyonu; eniyileştirme hedefine uygun rastgele değerlerle üretilmiş ve çeşitlilik arz eden bir popülasyondur. Fakat çözüm kümesinin boyutunun bu rastgele bireylerin eniyi değerlere makul bir yakınlıkta olmak bir yana, *sıfır bireye* ya da *sabit duran bireye* göre dezavantajlı olduğu gözlemlenmiştir.

Nüfus çeşitliliğini korumak için daha etkin bir yol algoritmaya entegre edildiğinde geliştirilen yöntem ile hedeflenen katılımcıya ya da başka katılımcılara ait deneysel amut hareketleri ya da daha önceden oluşturulmuş bir amut hareketi kütüphanesi kullanılarak bir başlangıç popülasyonu oluşturulup daha hızlı bir sentez gerçekleştirilebileceği öngörülmektedir. Fakat literatürde sıklıkla kullanılan deneysel hareketlerin kullanılması önyargılı bir sentezle sonuçlanacağı için ise böyle bir başlangıç yöntemi bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır.

Sabit duran bireyin üretimi için uygulanan optimizasyon çalışma kapsamında başarılı sayılabilir olmasına rağmen ideal bir çözüme ulaşmamıştır. Algoritmanın başarımının iyileştirilmesi ya da daha uzun bir eniyileştirme süreci ile ideale daha yakın bir çözüm bulunabileceği öngörülmektedir. Lakin böyle bir birey ile eniyileştirmeye başlamanın, amut hareketi sentezini ne kadar daha hızlandıracağı tartışmalıdır.

Her hareket sentez koşusu için geliştirilen yöntem tekrarlı çalıştırılarak her seferinde farklı bir amut hareketi elde edilmek suretiyle birden fazla amut hareketi sentezlenebileceği öngörülmesine rağmen çalışmada bu yöntem kullanılmamıştır. Bunun nedenleri, algoritmanın tek bir koşu ile -kaç tekrar yapılmalı sorusunu kullanıcıya bırakmadan- çözüme ulaşmasını hedeflenmesi ve zaten uzun bir süreç olan sentezin bu tekrarlar ile daha da uzamasının yöntemin kullanım değerini düşüreceği öngörülmektedir.

### 5.6.2. Eğri Ara Değerlemesi

Çalışmada kullanılan eğri ara değerlendirme yöntemi, çözüm uzayını oldukça küçültmüş ve dolayısıyla yöntemin başarımını artmıştır. Fakat kontrol noktaları üzerine (ne sıklıkları ne de sayısı konusunda) bir kısıtlama uygulanmamıştır. Böyle bir kısıtlama uygulanarak yöntemin başarımının daha da artırılabilmesi öngörülmektedir.

### 5.6.3. Simülasyon Yazılımı ve Donanımı

Simülasyonlar için MATLAB/Simulink (52) yazılımından faydalandığı belirtilmişti. Her ne kadar Simulink yazılımında sunulan çözümler içerisinde bulunan *ode15s* çözücüsü diğer çözümlere göre daha hızlı sonuç verse de başka bir yazılım ile simülasyonların daha hızlı yürütülebileceği öngörülmektedir. Bunun yanında çalışmada 24 çekirdekli bir merkezi işlemci ile yürütülen simülasyonlar bir grafik işlemci üzerinde gerçekleştirildiğinde sonuca daha da hızlı ulaşılabilir (48).

Çalışmanın başlarında Intel i7 6800K merkezi işlemci ile 7 saatte yaklaşık 40.000 benzeşim uygulanabilirken Intel i9 13900K merkezi işlemci ile 10 saatte yaklaşık 280.000 benzeşim gerçekleştirilebilmiştir. Bunun sonucunda her nesilde üretilen bireylerin ve nesil sayısının artırılması mümkün olmuştur. Bu verilerden yola çıkarak benzeşim sayısının artırılmasının algoritmanın başarımını katkıda bulunduğu açıktır.

#### **5.6.4. Çözüm Sayısı**

Bu tezin ikincil hedefi de bir hareketin birden fazla çözümünün bulunabilmesi olarak belirlenmiştir. Yani bir hareket tanımlandıktan sonra bu tanıma uyan birden fazla hareket varyasyonunun bulunabilmesi hedeflenmiştir. Bu hedef için nişleme yöntemi kullanılması planlanmış, fakat eniyileştirme süresinin uzunluğu bu yöntemden vazgeçirmiştir. Alternatif olarak hareketleri sınıflandırmak için bir yöntem geliştirilmiş, fakat Pareto cephenin işleyişine olumsuz etkide bulunduğu için terk edilmiştir.

Bu çalışma içerisinde bu hedefe ulaşılamamış olursa da hedef, yazar için güncelliğini korumaktadır.

#### **5.6.5. Yöntemin Olası Diğer Hareketlere Uyarlanması**

Oluşturulan yazılım çatısı farklı hareketlerin sentezi için de kullanılabilir. Bunun için;

- MATLAB/Simulink üzerinde yeni bir model oluşturulması,
- oluşturulan model değişkenlerinin otomatik içe-dışa aktarma işlemlerine uygun bir şekilde isimlendirilmesi,
- DDMS programında oluşturulan modelin adının yazılması,
- MGEA programı için model tanım dosyası ve bir örnek program oluşturulması (Bkz. Algoritma 2),

yeterlidir. Bahsedilen değişikliklerin hepsi orijinal yazılım çatısı incelenerek oluşturulabilir.

#### **5.7. Çıktılar**

Tez kapsamında yürütülen çalışma ile bir insan hareketi benzeşim modelini kullanarak amut hareketinin sentezi gerçekleştirilmiştir. Fakat bu yöntemin sınırlarının burada bitmediği, çeşitli değişiklikler veya geliştirmelerle daha fazla bir kullanım alanı

bulabileceği öngörülmektedir.

### **5.7.1. (Henüz) Gerçekleştirilmeyen Hareketler**

Geliştirilen yöntem ile verilen hareket tanımına (eniyileştirme hedefine) uygun hareket sentezlenebilmiştir. Genetik algoritmalar aynı anda birden fazla yerel eniyi komşuluğunda bulunabilen nüfus temelli bir algoritma olarak aynı nesilde birden fazla hareketi (tork/açı dizisinin) yönetmektedir. Bu nedenle Kon ve Sahin (39) makalesinde bahsedilen potansiyel olarak daha iyi spastik hareketleri de çözüm kümesine dahil etmekte ve verilen tanıma (hedefe) uygun fakat beklenmedik özelliklere sahip bir hareketin sentezini mümkün kılmaktadır.

### **5.7.2. Bir Alt Problem Olarak Takipsel Hareket Sentezi**

Önerilen yöntemin başlangıç neslinin deneysel bir hareket olduğu durumda bir önyargı unsuru olarak görüleceğinden bahsetmiştik. Fakat önyargı her zaman istenmeyen bir şey değildir. Örneğin Hiley ve ark. (27) genetik algoritmalar kullanarak açık-döngü bir kontrol uygulamış ve takipsel bir sentez gerçekleştirmiştir. Bu şekilde örneğin bir sporcu performansının eniyileştirilmesi mümkündür.

## 6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada bir amut hareketinin sentezi için genetik algoritmaların kullanılabilmesi görülmüştür. Bunu yaparken hiçbir önyargıda bulunulmamış olması, bu yöntemin başka hareketler için de kullanılabilmesine işaret etmektedir.

Oluşturulan genetik algoritmanın amut hareketi için daha etkin (daha az simülasyonla hareketi sentezleyebilen) bir algoritmaya dönüştürülmesinin, daha başka hareketlerin sentezi hakkında bir fikir vermesi öngörülmektedir. Kısıtlanmış amut sentezinde kullanılan yöntemin geliştirilmesi ile bağımsız amut hareketinin sentezlenmesi buna örnek olarak gösterilebilir.

Çalışmada kullanılan modelin kısıtları simülasyon sürelerinin azaltılması amacıyla tasarlanmıştır. Daha detaylı bir modelin hareket çeşitliliğini artırabileceği düşünülmektedir. Lakin modelin karmaşıklıkla hareket sentezini zorlaştıracığı için çalışmada kullanılan metotlar daha da geliştirilmeli ve daha etkin hale getirilmelidir.

Genetik algoritmalar oldukça geniş bir literatüre sahiptir. Bundan dolayı literatürde yer alan bir çok yöntem, bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılmak zorunda kalmıştır. Bu yöntemlerin insan hareketi sentezi perspektifiyle daha derin bir şekilde araştırılarak, *genetik algoritmalarla insan hareketi sentezinin* potansiyelinin keşfedilmesinin ufuk açıcı olacağı öngörülmektedir. Bunun için genetik algoritmalarla insan hareketi sentezinin biçimsel bir temelini oluşturulmasının (bkz. 6.2) oldukça önemli olduğu düşünülmektedir.

Özetle bağımsız amut hareketini sıfır değerlerle başlayarak sentezleyebilen bu yöntemin, daha karmaşık hareketlerin çeşitli varyasyonlarının sentezlenmesi yönünde bir adım olduğu öngörülmektedir. İnsan hareketi bir eniyileştirme problemi olarak tanımlanarak önyargısız bir hareket sentezi ile çeşitli hareketlerin sentezlenebileceği öngörülmektedir.

### 6.1. Gelecek Çalışmalar için Öneriler

Tezde genetik algoritmaların belirli bir uygulaması ile amut hareketi sentezinin gerçekleştirilebileceği sonucuna varılmıştır. Bu çalışma boyunca zorlayıcı unsurların altını çizerek gelecek çalışmaların kolaylaştırılabilmesi için bir kaç nokta vurgulanma-

lıdır.

Öncelikle temas temelli benzeşimlerde temas parametrelerinin oldukça önem arz ettiği görülmüştür. Az sayıda benzeşim gerçekleştiren çalışmalarda göz ardı edilebilecek temas parametresi hataları, çözüm uzayının ücra köşelerinde çeşitli sorunlara yol açmıştır. Temas parametrelerinin uygunluğundan emin olmak için seçilen rastgele benzeşimlerde görsel olarak oldukça gerçekçi benzeşimler gözlemlense de bazı çözüm adayları gerçek dışı davranış sergileyebilmiştir. Bu nedenle temas parametrelerine önem verilmesi benzer bir çalışma için önemlidir.

Benzeşim işleminin hızlı bir şekilde gerçekleşmesi, her koşu için gereken benzeşim sayısının çokluğundan dolayı önem arz etmektedir. Her bir koşunun, -çalışmanın gerçekleştirildiği döneme göre- üst seviye sayılan bir kişisel bilgisayar işlemcisi ile saatler sürmesi tezde ilerleme kaydetmeyi zorlaştırmıştır. Tezde kullanılan benzeşim modelinin basitliği göz önüne alındığında, sadece merkezi işlemci üzerinde paralel işlem gerçekleştirerek bu *boyutsallık lanetinin* sağaltılması mümkün görünmemektedir. Bunun için çok sayıda bilgisayar kullanımı, grafik işlemciler üzerinde benzeşim gerçekleştirme vb. tekniklerle bir nebze de olsa hareket alanı sağlanabilir.

Her ne kadar azaltılmaya çalışılsa da,

- tek bir nesil içerisinde birey tekrarının fazlalığı,
- benzeşim algoritmasının hata vermesine yol açan geçersiz bireylerin varlığı,
- bireylerin ebeveynlerine göre başarılı olma oranının azlığı,

gibi nedenlerle çözüm uzayı etkin bir şekilde aranmamıştır. Sonraki çalışmalarda bu noktalara dikkat edilmesi önem arz etmektedir.

## 6.2. Genetik Algoritmalarla Hareket Sentezi için Biçimsel bir Başlangıç

**Tanım.** Bir genetik algoritma koşusunda  $\mathcal{T} = \{\tau_1, \tau_2, \dots\}$  şeklinde tanımlanmış bir birey kümesi olduğunu düşünelim.  $\mu$  ise bu genetik algortmada tanımlı bir varyasyon operatörü olsun. Eğer  $\mu(\tau_i)$ ,  $\mu(\tau_j)$ 'e göre eniyileştirme açısından daha iyi bir birey ise bu durumu  $\tau_j \prec \tau_i$  şeklinde gösterilir.

Varyasyon operatörlerini  $v = \{v_1, v_2, \dots\}$  olarak tanımladığımız bir genetik algoritma koşusunda  $\tau$  bir birey olsun.  $\tau_v$  ile  $\tau$  bireyine  $v$  varyasyon operatörlerinin uygulanmasıyla elde edilebilen bireyler kümesini tanımlayalım. Tartışmayı basitleştir-



mek adına  $\tau_v$  kümesini sıralı kabul ederek  $\tau_v = \{\tau_v^1, \tau_v^2, \dots\}$  bireylerini isimlendirelim.

**Tanım.**  $\tau_v$  kümesine  $\tau$ 'nun  $v$ -komşuluğu (ya da kısaca **komşuluğu**), bu kümenin elemanlarına da  $\tau$ 'nun  $v$ -komşuları (ya da kısaca **komşuları**) denir.

Bir  $\tau$  hareketinin bütün komşuları algoritma bağlamında geçerli olmayabilir. Anlatım kolaylığı açısından bu bölümde komşuların geçerli olduğu varsayılmaktadır.

**Tanım.**  $\tau$ 'nun komşuluğu  $\tau_v = \{\tau_v^1, \tau_v^2, \dots\}$  üzerinde tanımlı bir  $\mu$  ölçeği için

$$\omega = \{\tau_v^i \mid \mu(\tau) < \mu(\tau_v^i)\} \subseteq \tau_v$$

alt kümesine  $\tau$ 'nun **eniyi**  $(v, \mu)$ -komşuluğu (ya da kısaca **eniyi komşuluğu**) denir.

Genetik algoritmalar için ideal senaryo, bir başlangıç nesli  $\beta_0$  ile başlayıp  $\beta_i, i = 1, 2, \dots$  nesilleri boyunca bir önceki neslin eniyi komşuluklarına ulaşmaktır. Fakat pratikte eniyi komşuluklara ulaşmak oldukça zor olduğu için en iyi ihtimalle bunların alt kümelerini bularak ilerlemektedirler. Kaldı ki bu ideal senaryo olarak adlandırdığımız durum dahi küresel eniyilere ulaşmayı garanti etmemektedir. Böyle bir iddiada bulunmak için en başta **eniyi komşuluk zinciri** olarak adlandırabileceğimiz bu nesiller dizisinin küresel eniyileri içerdiğinin ispatlanması gerekmektedir.

Çalışmada hedeflenen hareket sentezi konusunda bu tür bir ispat yapabilmek için başlangıç neslinin ve varyasyon operatörlerinin eniyi komşuluk zinciri oluşturmaya yatkın olduğu ispatlanmalıdır. Genetik algoritmalarla insan hareketi sentezi için bu tür ispatların yapılması, bu konunun biçimsel olarak tartışılmamasından dolayı şu an için oldukça zor görünmektedir.

Dolayısıyla ilerleyen çalışmalarla bu biçimsel yaklaşımın benimsenmesi ve bu doğrultuda ispatların yapılması önerilmektedir.

## 7 KAYNAKLAR

- [1] Glazier PS, Mehdizadeh S. In search of sports biomechanics' holy grail: Can athlete-specific optimum sports techniques be identified? *Journal of Biomechanics*. 2019 sep;94:1–4.
- [2] Émile Borel. *Mécanique Statistique et Irréversibilité*. *Journal de Physique*. 1913;3:189–196.
- [3] Jiang Y, Wouwe TV, Groote FD, Liu CK. Synthesis of biologically realistic human motion using joint torque actuation. *ACM Transactions on Graphics*. 2019 jul;38(4):1–12.
- [4] Nicolas G, Multon F, Berillon G, Marchal F. From bone to plausible bipedal locomotion using inverse kinematics. *Journal of Biomechanics*. 2007 jan;40(5):1048–1057.
- [5] Nicolas G, Multon F, Berillon G. From bone to plausible bipedal locomotion. Part II: Complete motion synthesis for bipedal primates. *Journal of Biomechanics*. 2009 may;42(8):1127–1133.
- [6] Charbonneau E, Bailly F, Begon M. Optimal forward twisting pike somersault without self-collision. *Sports Biomechanics*. 2022 mar;22(2):1–18.
- [7] Yin Z, Yang Z, Panne MVD, Yin K. Discovering diverse athletic jumping strategies. *ACM Transactions on Graphics*. 2021 jul;40(4):1–17.
- [8] Mizutori H, Kashiwagi Y, Hakamada N, Tachibana Y, Funato K. Kinematics and joints moments profile during straight arm press to handstand in male gymnasts. *PLOS ONE*. 2021 jul;16(7):e0253951.
- [9] Yeadon MR, Hiley MJ. The limits of aerial and contact techniques for producing twist inreverse 1½ somersault dives. *Human Movement Science*. 2019 aug;66:390–398.
- [10] Rodrigues L, Prado M, Tavares P, Silva KD, Rosa A. Simulation and control of biped locomotion-GA optimization. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation*. IEEE; 1996. .

- [11] Noritake K, Kato S, Yamakita T, Itoh H. A motion generation system for humanoid robots - Tai Chi motion. In: MHS2003. Proceedings of 2003 International Symposium on Micromechatronics and Human Science (IEEE Cat. No.03TH8717). IEEE; 2003. .
- [12] Lee JY, Kim MS, Lee JJ. Approach to Multi-Objective Evolutionary Computation Method for Generating Variable Walking Patterns. In: Proceedings of the 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction. International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC); 2004. .
- [13] Özyurt G. 3-D Humanoid Gait Simulation Using An Optimal Predictive Control. Middle East Technical University; 2005.
- [14] Sapio VD, Warren J, Khatib O, Delp S. Simulating the task-level control of human motion: a methodology and framework for implementation. *The Visual Computer*. 2005 jun;21(5):289–302.
- [15] Wolff K, Sandberg D, Wahde M. Evolutionary optimization of a bipedal gait in a physical robot. In: 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE; 2008. .
- [16] Cardenas-Maciel SL, Castillo O, Aguilar LT, Rodríguez-Díaz A. Genetic Optimization for the Design of Walking Patterns of a Biped Robot. In: *Evolutionary Design of Intelligent Systems in Modeling, Simulation and Control*. Springer Berlin Heidelberg; 2009. p. 259–271.
- [17] Khatib O, Demircan E, Sapio VD, Sentis L, Besier T, Delp S. Robotics-based synthesis of human motion. *Journal of Physiology-Paris*. 2009 may;103(3-5):211–219.
- [18] Cardenas-Maciel SL, Castillo O, Aguilar LT. Generation of walking periodic motions for a biped robot via genetic algorithms. *Applied Soft Computing*. 2011 dec;11(8):5306–5314.
- [19] Parker GB, Tarimo WT, Cantor M. Quadruped gait learning using cyclic genetic algorithms. In: 2011 IEEE Congress of Evolutionary Computation (CEC). IEEE; 2011. .

- [20] Hiley MJ, Yeadon MR. The Effect of Cost Function on Optimum Technique of the Undersomersault on Parallel Bars. *Journal of Applied Biomechanics*. 2012 feb;28(1):10–19.
- [21] Wang JM, Hamner SR, Delp SL, Koltun V. Optimizing locomotion controllers using biologically-based actuators and objectives. *ACM Transactions on Graphics*. 2012 aug;31(4):1–11.
- [22] Agrawal S, van de Panne M. Pareto Optimal Control for Natural and Supernatural Motions. In: *Proceedings of Motion on Games*. ACM; 2013. .
- [23] Cai C, Jiang H. Performance Comparisons of Evolutionary Algorithms for Walking Gait Optimization. In: *2013 International Conference on Information Science and Cloud Computing Companion*. IEEE; 2013. .
- [24] Huchez A, Haering D, Holvoët P, Barbier F, Begon M. Local versus global optimal sports techniques in a group of athletes. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2013 oct;18(8):829–838.
- [25] Gehring, Christian, Coros, Stelian, Hutter, Marco, Bloesch, Michael, Fankhauser, Péter, Hoepflinger, Markus A , ve ark. Towards Automatic Discovery of Agile Gaits for Quadrupedal Robots. 2014;.
- [26] Koco E, Glumac S, Kovacic Z. Multiobjective optimization of a quadruped robot gait. In: *22nd Mediterranean Conference on Control and Automation*. IEEE; 2014. .
- [27] Hiley MJ, Jackson MI, Yeadon MR. Optimal technique for maximal forward rotating vaults in men’s gymnastics. *Human Movement Science*. 2015 aug;42:117–131.
- [28] Felis ML, Mombaur K. Synthesis of full-body 3-D human gait using optimal control methods. In: *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE; 2016. .
- [29] Manglik A, Gupta K, Bhanot S. Adaptive gait generation for hexapod robot using Genetic Algorithm. In: *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*. IEEE; 2016. .

- [30] Nygaard TF, Torresen J, Glette K. Multi-objective evolution of fast and stable gaits on a physical quadruped robotic platform. In: 2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). IEEE; 2016. .
- [31] Raj M, Semwal VB, Nandi GC. Multiobjective optimized bipedal locomotion. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*. 2017 mar;10(8):1997–2013.
- [32] Yang Y, Liu Y, Zhang Y, Wang S, Bi S, Huang J, ve ark. Multi-parameter optimization for humanoid robot climbing stairs. In: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). IEEE; 2017. .
- [33] Gidley AD, Marsh AP, Umberger BR. Performance criteria for generating predictive optimal control simulations of bicycle pedaling. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2018 nov;22(1):11–20.
- [34] Kidziński Ł, Mohanty SP, Ong CF, Hicks JL, Carroll SF, Levine S, ve ark. Learning to Run Challenge: Synthesizing Physiologically Accurate Motion Using Deep Reinforcement Learning. In: *The NIPS '17 Competition: Building Intelligent Systems*. Springer International Publishing; 2018. p. 101–120.
- [35] Yu W, Turk G, Liu CK. Learning symmetric and low-energy locomotion. *ACM Transactions on Graphics*. 2018 aug;37(4):1–12.
- [36] Abdolhosseini F. Learning locomotion : symmetry and torque limit considerations. 2019;.
- [37] Lee JH, Park JH. Time-dependent genetic algorithm and its application to quadruped's locomotion. *Robotics and Autonomous Systems*. 2019 feb;112:60–71.
- [38] Zahn B, Fountain J, Houliston T, Biddulph A, Chalup S, Mendes A. Optimization of Robot Movements Using Genetic Algorithms and Simulation. In: *RoboCup 2019: Robot World Cup XXIII*. Springer International Publishing; 2019. p. 466–475.
- [39] Kon J, Sahin F. Gait Generation for Damaged Hexapods using a Genetic Algorithm. In: 2020 IEEE 15th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE). IEEE; 2020. .
- [40] Kang GC, Lee Y. Finite State Machine-Based Motion-Free Learning of Biped Walking. *IEEE Access*. 2021;9:20662–20672.

- [41] Davidson JB, Cashback JGA, Fischer SL. Exploring Optimal Objective Function Weightings to Predict Lifting Postures Under Unfatigued and Fatigued States. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 2022 jun;p. 001872082210969.
- [42] Li W, Fey NP. Relating Underlying Performance Objectives of Overground Walking to Observable Walking Mechanics using Predictive Musculoskeletal Simulations. In: *2022 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*. IEEE; 2022. .
- [43] Park S, Caldwell GE, Umberger BR. A direct collocation framework for optimal control simulation of pedaling using OpenSim. *PLOS ONE*. 2022 feb;17(2):e0264346.
- [44] Park J, Min S, Chang PS, Lee J, Park MS, Lee J. Generative GaitNet. In: *Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference Proceedings*. ACM; 2022. .
- [45] Vice J, Sukthankar G, Douglas PK. Leveraging Evolutionary Algorithms for Feasible Hexapod Locomotion Across Uneven Terrain. *arXiv*; 2022.
- [46] Xu J, Makoviychuk V, Narang Y, Ramos F, Matusik W, Garg A, ve ark. Accelerated Policy Learning with Parallel Differentiable Simulation. In: *International Conference on Learning Representations*; 2022. .
- [47] Zhakatayev A, Avazov N, Rogovchenko Y, Patzold M. Human Motion Synthesis Using Trigonometric Splines. *IEEE Access*. 2023;11:14293–14308.
- [48] Gong D, Yan J, Zuo G. A Review of Gait Optimization Based on Evolutionary Computation. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*. 2010;2010:1–12.
- [49] Eiben AE, Smith JE. *Introduction to evolutionary computing*. Springer Berlin Heidelberg; 2003.
- [50] Yang XS. Multi-Objective Optimization. In: *Nature-Inspired Optimization Algorithms*. Elsevier; 2014. p. 197–211.
- [51] Stork J, Eiben AE, Bartz-Beielstein T. A new taxonomy of global optimization algorithms. *Natural Computing*. 2020 nov;21(2):219–242.

- [52] MATLAB. 9.10.0.1710957 (R2021a) Update 4. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.; 2021.
- [53] Dempster WT. Space Requirements Of The Seated Operator, Geometrical, Kinematic, And Mechanical Aspects Of The Body With Special Reference To The Limbs. MICHIGAN STATE UNIV EAST LANSING; 1955.
- [54] Contini R, Drillis RJ, Bluestein M. Determination of Body Segment Parameters. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 1963 oct;5(5):493–504.
- [55] Umbarkar AJ, Joshi MS. Review Of Parallel Genetic Algorithm Based On Computing Paradigm And Diversity In Search Space. *ICTACT Journal on Soft Computing*. 2013 jul;03(04):615–622.
- [56] Hunter LC, Hendrix EC, Dean JC. The cost of walking downhill: Is the preferred gait energetically optimal? *Journal of Biomechanics*. 2010 jul;43(10):1910–1915.
- [57] Gaesser GA, Poole DC, Angadi SS. Quantifying the benefits of inefficient walking: Monty Python inspired laboratory based experimental study. *BMJ*. 2022 dec;p. e072833.
- [58] van der Kruk E, Silverman AK, Koizia L, Reilly P, Fertleman M, Bull AMJ. Age-related compensation: Neuromusculoskeletal capacity, reserve and movement objectives. *Journal of Biomechanics*. 2021 jun;122:110385.
- [59] Boyer KA, Hayes KL, Umberger BR, Adamczyk PG, Bean JF, Brach JS, et al. Age-related changes in gait biomechanics and their impact on the metabolic cost of walking: Report from a National Institute on Aging workshop. *Experimental Gerontology*. 2023 mar;173:112102.
- [60] Black MI, Allen SJ, Forrester SE, Folland JP. The Anthropometry of Economical Running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 2019 sep;52(3):762–770.
- [61] de Rugy A, Loeb GE, Carroll TJ. Muscle Coordination Is Habitual Rather than Optimal. *The Journal of Neuroscience*. 2012 may;32(21):7384–7391.
- [62] Wallace IJ, Kraft TS, Venkataraman VV, Davis HE, Holowka NB, Harris AR, et al. Cultural variation in running techniques among non-industrial societies. *Evolutionary Human Sciences*. 2022;4.

- [63] Mombaur K, Clever D. Inverse Optimal Control as a Tool to Understand Human Movement. In: Springer Tracts in Advanced Robotics. Springer International Publishing; 2017. p. 163–186.
- [64] Clever D, Schemschat RM, Felis ML, Mombaur K. Inverse optimal control based identification of optimality criteria in whole-body human walking on level ground. In: 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). IEEE; 2016. .
- [65] Byeon S, Sun D, Hwang I. An Inverse Optimal Control Approach for Learning and Reproducing Under Uncertainties. IEEE Control Systems Letters. 2023;7:787–792.
- [66] Tang B, Peng Y, Luo J, Zhou Y, Pang M, Xiang K. Cost Function Determination for Human Lifting Motion via the Bilevel Optimization Technology. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2022 may;10.
- [67] Weng J, Hashemi E, Arami A. Human Gait Cost Function Varies With Walking Speed: An Inverse Optimal Control Study. IEEE Robotics and Automation Letters. 2023 aug;8(8):4777–4784.
- [68] Leboeuf F, Bessonnet G, Seguin P, Lacouture P. Energetic versus sthenic optimality criteria for gymnastic movement synthesis. Multibody System Dynamics. 2006 oct;16(3):213–236.
- [69] Yeadon MR, Trewartha G. Control Strategy for a Hand Balance. Motor Control. 2003 oct;7(4):421–442.
- [70] Blenkinsop GM, Pain MTG, Hiley MJ. Balance control strategies during perturbed and unperturbed balance in standing and handstand. Royal Society Open Science. 2017 jul;4(7):161018.



## 8 EKLER

## EK-1 SÖZLÜK

Bu bölümde metin içinde kullanılan terimlerin İngilizce karşılıkları verilmektedir.

- Ağırlıklı ölçek :** Weighted metric
- Ara değerlendirme :** Interpolation
- Bedava yemek yoktur teoremi :** No free lunch theorem
- Benzetimli tavlama :** Simulated annealing
- Biricik :** Unique
- Boyutsallık laneti :** Curse of dimensionality
- Çapraz geçiş :** Crossover
- Çok amaçlı optimizasyon :** Multi-objective optimization
- Çok doruklu optimizasyon :** Multimodal optimization
- Çoklu başlangıç yaklaşımı :** Multi-start approach
- Derin Destekli Öğrenme :** Deep Reinforcement Learning
- Dalgacık dönüşümü :** Wavelet transform
- Doğrudan tanzim :** Direct collocation
- Eniyileştirme :** Optimization
- Eyleyici :** Actuator
- Numaralama :** Enumeration
- Faydalanma stratejisi :** Exploitation strategy
- Küresel eniyi :** Global optimum
- Hemen hemen kesinlikle :** Almost surely
- Kas çabası :** Muscular effort
- Katı cisim :** Rigid body
- Koşu :** Run
- Keşif stratejisi :** Exploration strategy
- Maliyet fonksiyonu :** Cost function
- Nişleme :** Nicheing
- Numaralama :** Enumeration
- Eniyileştirme :** Optimization
- Eniyileştirme ölçęęi :** Optimization metric
- Eniyileştirme sahası :** Optimization landscape
- Parçacık Sürü Eniyileştirmesi :** Particle Swarm Optimization

**Prensip öğrenimi :** Policy learning

**Tahminsel :** Predictive

**Takipsel :** Tracking

**Ters eniyi kontrol :** Inverse optimal control

**Sıklık Grafiği :** Histogram

**Sonlu durum makinesi :** Finite state machine

**Yerel eniyi :** Local optimum

## EK-2 ENİYİLEŞTİRME

Bu ek bölümde tezde kullanılan eniyileştirme ile ilgili notasyon geliştirilecek, çeşitli tanımlar tezde kullanıldığı şekliyle verilecektir.

**Tanım** (Minimal ve maksimal değer).  $f : A \rightarrow B$  bir fonksiyon olsun.  $\forall i, a_i \in A, b_i \in B$  için  $f(a_i) = b_i$  kabul edelim. Eğer  $\forall i, f(a_o) = b_o \leq b_i$  ise  $b_o$  değerine  $f$  fonksiyonunun **minimal değeri**, eğer  $\forall i, f(a_o) = b_o \geq b_i$  ise  $b_o$  değerine  $f$  fonksiyonunun **maksimal değeri** denir.

**Tanım** (Eniyi değer). Bir fonksiyonun maksimal ve/veya minimal değerlerine **eniyi değer** denir.

**Tanım** (Kısmi ve tam sıralama).  $A$  bir küme olsun.  $\nabla \subseteq A \times A$  kümesi, aşağıdaki koşulları sağlıyorsa  $A$  üzerinde tanımlı bir **kısmi sıralama**dır:

- $\forall a \in A, (a, a) \in \nabla$ ,
- $\forall a, b \in A, (a, b) \in \nabla$  ve  $(b, a) \in \nabla$  ise  $a = b$ ,
- $\forall a, b, c \in A, (a, b) \in \nabla$  ve  $(b, c) \in \nabla$  ise  $(a, c) \in \nabla$

Eğer  $\nabla$ , şu koşulu da sağlıyorsa **tam sıralama** adını alır:

- $\forall a, b \in A, (a, b) \in \nabla$  veya  $(b, a) \in \nabla$

Yazım kolaylığı açısından  $(a, b) \in \nabla$  yerine  $a \nabla b$  yazılabilir. Örneğin  $\leq$  (küçük eşittir) ilişkisi  $\mathbb{R}$  (reel sayılar) üzerinde bir tam sıralama olarak  $a \leq b$  şeklinde kullanılır.

Bu çalışmada **tam sıralama** yerine **ölçek** ifadesi kullanılmaktadır.

$g$  fonksiyonunun eniyi değerinden bahsederken  $g_{\leq}$  ya da  $g_{\geq}$  ifadeleriyle eniyileştirmenin, sırasıyla minimizasyon mu ( $\nabla = \leq$ ) yoksa maksimizasyon mu ( $\nabla = \geq$ ) olduğunu da kolayca ifade edebiliriz. Örneğin bir nesnenin en alçak ya da en yüksek konumuna işaret etmek istediğimizde sırasıyla  $yukseklık_{\leq}$  ya da  $yukseklık_{\geq}$  ifadeleri kullanılabilir.

**Tanım** (Eniyi Değer).  $g : A \rightarrow B$  bir fonksiyon,  $\nabla \subseteq B \times B$  de bir ölçek olsun.  $g$  fonksiyonunun  $\nabla$  ölçeğine göre **eniyi değeri** aşağıda belirtilen koşulu sağlayan  $a \in A$  değeridir:

$$\forall b \in B, g(a) \nabla b$$

**Tanım** (Yerel eniyi).  $g : A \rightarrow B$  bir fonksiyon,  $\nabla \subseteq B \times B$  bir ölçek,  $(a_0, a_1) = A' \subseteq A$  aralığı da  $A$ 'nın bir alt kümesi olsun. Eğer  $\forall a' \in A'$ ,  $g(a) \nabla g(a')$  ve  $a \neq a_0$ ,  $a \neq a_1$  koşullarını sağlayan bir  $a \in A'$  elemanı varsa,  $g(a) \in B$  elemanına  $g$  fonksiyonunun  $A'$  içerisinde  $\nabla$  ölçeğine göre **yerel eniyisi** denir.

**Gözlem.** Komşuluğunda kendisinden daha optimal bir değer olmayan noktalara yerel eniyi denilir.

**Tanım** (Küresel eniyi).  $g : A \rightarrow B$  bir fonksiyon,  $\nabla \subseteq B \times B$  da bir ölçek olsun. Eğer  $\forall a' \in A'$ ,  $g(a) \nabla g(a')$  koşulunu sağlayan bir  $a \in A$  elemanı varsa,  $g(a)$  elemanına  $g$  fonksiyonunun  $\nabla$  ölçeğine göre **global eniyisi** denir.

**Gözlem.** Her küresel eniyi, aynı zamanda bir yerel eniyidir.

**Tanım** (Pareto baskın).  $g : A \rightarrow B^N$  bir fonksiyon,  $\nabla_i \subseteq B \times B \forall i \in \{1, \dots, N\}$  da  $N$  adet ölçek olsun.  $a, a' \in A$  için,  $g(a) \nabla_i g(a') \forall i \in \{1, \dots, N\}$  ise  $a$  çözüm adayı,  $a'$  çözüm adayına **Pareto baskındır** denir. Bu durum  $a' \prec a$  şeklinde gösterilir. Eğer  $\exists i \in \{1, \dots, N\}$  için  $\forall a, a' \in A$ ,  $(g(a), g(a')) \notin \nabla_i$  ise bu durum  $a' \not\prec a$  şeklinde gösterilir.

**Tanım** (Pareto cephe).  $g : A \rightarrow B$  bir fonksiyon,  $\{a_1, \dots, a_M\} = A' \subseteq A$  da bir çözüm adayları kümesi olsun. Aşağıdaki koşulları sağlayan  $\hat{A} \subseteq A'$  kümelerine **Pareto cephe** denir:

$$\begin{aligned} \forall a_i \in A', \exists \hat{a} \in \hat{A} \quad a_i \prec \hat{a} \\ \forall \hat{a}, \bar{a} \in \hat{A} \quad \bar{a} \not\prec \hat{a} \ \& \ \hat{a} \not\prec \bar{a} \end{aligned}$$

### EK-3 KOŞULAR

Çalışma boyunca bir çok genetik algoritma tasarlanmış, çeşitli iyileştirmelerle adım adım sonuca yaklaşılmıştır. Her bir tasarım ya da değişiklik için de birden fazla eniyileştirme yürütülmüştür. Aşağıdaki nedenlerden dolayı bu sürecin tamamen belgelenmesi mümkün olamamıştır:

- Tasarımların çokluğu ve bu çok sayıda tasarımın depolanmasının ve işlenmesinin zorlukları,
- Programda bulunan (ve düzeltilen) hataların, önceki koşuların geçerliliğine gölge düşürmesi,
- Tasarımlar arasındaki farkların heterojenliği (bazıları tek bir parametrenin çeşitlendirilmesi iken bazılarının tasarımında temel bir değişiklik olması)

Yine de şeffaflık adına çeşitli tasarımların belgelenmesi ve okuyucuya yöntem hakkında daha fazla bilgi sunulabilmesi için bu ekte koşuların bir kısmı verilecektir.

#### EK-3.1. Saf Genetik Algoritma

Saf genetik algoritma denemesi çalışmanın ilk denemesi olarak, en basit genetik algoritma konfigürasyonu ile insan hareket sentezinin uygulanabilirliğini test etmek için yapılmıştır. En saf ve en kısıtlı biçimde oluşturulan koşu, şu algoritma tasarımı ile şekillenmiştir:

Model	kısıtlanmış amut modeli
Başlangıç nesli	rastgele başlangıç
Ebeveyn Seçimi	rastgele seçim
Varyasyon Operatörleri	TNV
Eliminasyon	en kötülerini sil

Bu deneme sonucunda model amut hareketini yapamamış, çeşitli yerel optimumlara takılmıştır. Fakat amut hareketini gerçekleştirme potansiyelini göstermiştir.

### EK-3.2. Geleneksel Saf Genetik Algoritma

Geleneksel saf genetik algoritma denemesi varyasyon operatörü çeşitliliğini artırmak amacıyla klasik varyasyon operatörlerinin çalışma kapsamına uyarlanmış hallerini test eden bir koşudur:

Model	kısıtlanmış amut modeli
Başlangıç nesli	rastgele başlangıç
Ebeveyn Seçimi	rastgele seçim
Varyasyon Operatörleri	TNV Silme Yerleştirme
Eliminasyon	en kötülerini sil

Koşu sonucunda model amut hareketini yapamamış, çeşitli yerel eniyilere takılmıştır.

### EK-3.3. Genişletilmiş Saf Genetik Algoritma

Genişletilmiş saf genetik algoritma denemesi varyasyon operatörü çeşitliliği artırılarak kaydedilen ilerlemenin sürdürülebilirliğini test etmek için tasarlanmış bir koşudur:

Model	kısıtlanmış amut modeli
Başlangıç nesli	rastgele başlangıç
Ebeveyn Seçimi	rastgele seçim
Varyasyon Operatörleri	TNV Silme Yerleştirme Çapraz geçiş Kes ve doldur k-nokta çapraz geçiş
Eliminasyon	en kötülerini sil

Koşu sonucunda model amut hareketini yapamamış, çeşitli yerel eniyilere takılmıştır. Fakat operatörlerin performanslarını değerlendirmek için önemli bir veri sağ-

lamıştır: Bütün operatörler, eniyileştirmenin çeşitli evrelerinde üzerlerine düşen görevi yapabilmektedir.

### **EK-3.4. Eliminasyon Denemesi**

Eliminasyon yönteminin değiştirildiği bu deneme, bir önceki geliştirilmiş saf genetik algoritmanın zorlandığı nüfus fazlalığı problemini ortadan kaldırmaya yönelik bir tasarımıdır.

Model	kısıtlanmış amut modeli
Başlangıç nesli	rastgele başlangıç
Ebeveyn Seçimi	rastgele seçim
Varyasyon Operatörleri	TNV Silme Yerleştirme Çapraz geçiş Kes ve doldur k-nokta çapraz geçiş
Eliminasyon	UYB

Eliminasyon denemesi çerçevesinde eliminasyon yönteminin eniyileştirme sürecini yönlendirme etkisinin araştırılması planlanmıştır. Koşu sonucunda model amut hareketini başarıyla sentezleyebilmiştir.

### **EK-3.5. Varyasyon Operatörleri Üzerine 2. Deneme**

Eliminasyon yöntemi değişikliği ile görece başarılı bir sonuç elde edilmesi ardından varyasyon operatörü çeşitliliğinin tekrar azaltılması gündeme gelmiştir. Bunun gerekçesi; varyasyon operatörleri ile amaçlanan faydalanma ve keşif stratejileri konusunda bir savaş gözlemlenmesidir. Her operatör kendi faydalanma ya da keşif stratejisini hayata geçirirken aynı hedefe yönelik bir çok operatörün varlığı merak uyandırmıştır.



Model	kısıtlanmış amut modeli
Başlangıç nesli	rastgele başlangıç
Ebeveyn Seçimi	rastgele seçim
Varyasyon Operatörleri	TNV Silme Yerleştirme
Eliminasyon	UYB

Koşu sonucunda model amut hareketini başarıyla sentezleyebilmiştir. Başka bir deyişle, bu koşullarda hareketin sentezlenebilmesi için eliminasyon süreci, varyasyon operatör çeşitliliğinden daha önemli bir rol oynamaktadır.

### **EK-3.6. Bağımsız Amut Modeli İçin Saf Deneme**

Kısıtlanmış amut modeli ile amut hareketini başarıyla sentezleyebilen yöntemin bağımsız model ile aynı başarıyı gösterip gösteremeyeceğini test eden bu koşulda bir önceki koşuya göre model değişikliği dışında bir değişiklik uygulanmamıştır.

Model	bağımsız amut modeli
Başlangıç nesli	rastgele başlangıç
Ebeveyn Seçimi	rastgele seçim
Varyasyon Operatörleri	TNV Silme Yerleştirme
Eliminasyon	UYB

Koşu sonucunda model amut hareketini başarıyla sentezleyememiştir. Modelin elleri yerden kesilmiş, tekrar yerle temas edememiştir. Yani benzeşim fiziksel anlamda başarılı olmamasına rağmen sadece bir çözüme ulaşabildiği için matematiksel anlamda başarılı olduğu gözlenmiştir.

### **EK-3.7. Temas Kısıtlaması**

Sıradaki deneme, bağımsız amut modeli benzeştirildiğinde ellerin yerden kesilmesini engellemek için bu koşulu ihlal eden hareketlerin geçersiz sayılmasına dayanan bir deneme olmuştur. Buna yardımcı olmak için rastgele tork değerlerinden vazgeçil-

miş, sadece bütün tork değerleri sıfır olan bir birey ile başlanmıştır.

Model	bağımsız amut modeli
Başlangıç nesli	sıfır değerlerle başlangıç
Ebeveyn Seçimi	rastgele seçim
Varyasyon Operatörleri	TNV Silme Yerleştirme
Eliminasyon	Varsa sadece pozitifleri alma UYB

Ellerin yerden kesilmesi problemini çözmesine rağmen bu deneme sonucunda model amut hareketini başarıyla sentezleyememiş, çeşitli yerel eniyilere takılmıştır.

### **EK-3.8. Varyasyon Operatörleri Üzerine 3. Deneme**

Bu denemede daha önce varyasyon operatör çeşitliliğinin artırılması olumlu etki gösterdiği için eliminasyonun varyasyon operatörlerinden daha önemli bir rol oynadığı bulgusu tekrar ziyaret edilmiştir.

Model	bağımsız amut modeli
Başlangıç nesli	sıfır değerlerle başlangıç
Ebeveyn Seçimi	rastgele seçim
Varyasyon Operatörleri	TNV Silme Yerleştirme Çapraz geçiş Kes ve doldur k-nokta çapraz geçiş
Eliminasyon	Varsa sadece pozitifleri alma UYB

Deneme sonucunda model amut hareketini başarıyla sentezleyememiş, çeşitli yerel eniyilere takılmıştır. Bu noktada yapılan tespit, modelin denge konumundan uzaklaşmaya eğilimli olduğudur.

### EK-3.9. Bir Eniyileştirme Hedefi Olarak Denge

Bağımsız amut eniyileştirmesini çok-hedefli bir eniyileştirme problemi olarak ele alınması ve bu tür problemler için uygun olan Pareto cephe yönteminin test edilmesi için gerçekleştirilen bu çalışmada ağırlık merkezinin yerden yüksekliği yanı sıra denge de bir hedef olarak belirlenmiştir. Denge ölçütü, ağırlık merkezinin yere izdüşümünün ellere yakınlığı olarak belirlenmiştir.

Model	bağımsız amut modeli
Başlangıç nesli	sıfır değerlerle başlangıç
Ebeveyn Seçimi	rastgele seçim
Varyasyon Operatörleri	TNV Silme Yerleştirme Çapraz geçiş Kes ve doldur k-nokta çapraz geçiş
Eliminasyon	Varsa sadece pozitifleri alma Pareto cephe

Deneme sonucunda model amut hareketini başarıyla sentezleyememiş, çeşitli yerel eniyilere takılmıştır.

### EK-3.10. Ara Değerleme İle Veri Azaltma

Bir önceki çalışmada gözlemlenen eniyileştirme işleminin yavaşlığının çözüm kümesinde bir kısıtlama aracılığıyla giderilebileceği düşünülerek yapılan bu deneme; varyasyon operatörlerinin sabit kontrol noktalı ara değerlendirme ile uyumlu bir şekilde güncellenmesi ile gerçekleştirilmiştir.

Model	bağımsız amut modeli
Başlangıç nesli	sıfır değerlerle başlangıç
Ebeveyn Seçimi	rastgele seçim
Varyasyon Operatörleri	Ara Değerlemeli TNV Ara Değerlemeli silme Çapraz geçiş Yönlü ara değerlendirme
Eliminasyon	Varsa sadece pozitifleri alma Pareto cephe

Deneme sonucunda model amut hareketini başarıyla sentezleyememiş, çeşitli yerel eniyilere takılmıştır. Ayrıca Pareto cephenin giderek büyümesi benzeşim süresini uzatmış ve bu her neslin hesaplanmasının giderek daha da uzun sürmesine yol açmıştır.

### **EK-3.11. Pareto Cephe İçin Bir Kısıtlama**

Bu koşuda Pareto cephenin giderek büyümesi ile baş edebilmek ve bunu yaparken hareket çeşitliliğini kısmen de olsa koruyabilmek için hareketlerin benzerliklerini hesaplayıp, benzer hareketler içinde bir alt Pareto cephe oluşturan bir yöntem denenmiştir.

Model	bağımsız amut modeli
Başlangıç nesli	sıfır değerlerle başlangıç
Ebeveyn Seçimi	rastgele seçim (çapraz geçiş için) ölçek-oranlı seçim (diğer varyasyon operatörleri için)
Varyasyon Operatörleri	Ara Değerlemeli TNV Ara Değerlemeli silme Çapraz geçiş Yönlü ara değerlendirme
Eliminasyon	Varsa sadece pozitifleri alma Eşitleri silme Ölçek eşlemeyle kısmi baskınlanmışları silme Pareto cephe

Bu girişim sonucunda bağımsız amut hareketi başarıyla sentezlenebilmiştir. Ne yazık ki sonuç bir çok defa tekrarlanmaya çalışılsa da tekrarlanamamıştır. Dolayısıyla başarısız olarak değerlendirilen bu koşu, genetik algoritmalarla önyargısız insan hareketi sentezi için umut verici olmuştur.

## EK-4 ETİK KURUL İZİN BELGESİ



T.C.  
HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
Girişimsel Olmayan Klinik Araştırmalar Etik Kurulu

Sayı : 16969557-2180

Konu : ARAŞTIRMA PROJESİ DEĞERLENDİRME RAPORU

**Toplantı Tarihi** : 29 KASIM 2022 SALI  
**Toplantı No** : 2022/20  
**Proje No** : GO 22/1170 (Değerlendirme Tarihi: 15.11.2022)  
**Karar No** : 2022/20-63

Üniversitemiz Spor Bilimleri Fakültesi öğretim üyelerinden Dr. Öğr. Üyesi Serdar ARITAN'ın sorumlu araştırmacı olduğu, Volkan Dağhan YAYLIOĞLU'nun doktora tezi olan, GO 22/1170 kayıt numaralı "*Genetik Algoritmalarla İnsan Hareketinin Sentezi ve Modellemesi*" başlıklı proje önerisi araştırmacının gerekçe, amaç, yaklaşım ve yöntemleri dikkate alınarak incelenmiş olup, 04 Aralık 2022 – 01 Mayıs 2023 tarihleri arasında geçerli olmak üzere etik açıdan **uygun bulunmuştur**. Çalışma tamamlandığında sonuçlarını içeren bir rapor örneğinin Etik Kurulumuza gönderilmesi gerekmektedir.

		<b>İZİNLİ</b>	
1. Prof. Dr. Nüket Paksoy ERBAYDAR	(Başkan)	8. Prof. Dr. Hande Güney DENİZ	(Üye)
2. Prof. Dr. G. Burça AYDIN	(Üye)	<del>9. Doç. Dr. Betül Çelebi SALTIK</del>	(Üye)
3. Prof. Dr. M. Özgür UYANIK	(Üye)	10. Doç. Dr. Merve BATUK	(Üye)
		<b>İZİNLİ</b>	
4. Prof. Dr. Ayşe Kin İŞLER	(Üye)	11. Doç. Dr. Gülten KOÇ	(Üye)
5. Prof. Dr. Sibel PEHLİVAN	(Üye)	12. Dr. Öğr. Üyesi Müge DEMİR	(Üye)
6. Prof. Dr. Burcu Balçın DOĞU	(Üye)	13. Dr. Öğr. Üyesi Burcu Ersöz ALAN	(Üye)
		<b>İZİNLİ</b>	
7. Prof. Dr. Tolga YILDIRIM	(Üye)	14. Av. Buket ÇINAR	(Üye)

## EK-5 ORJİNALLİK RAPORU

### AMUT HAREKETİNİN BİYOMEKANİK MODELİNİN BİR GENETİK ALGORİTMAYLA İNCELENMESİ

#### ORIGINALITY REPORT

<b>1</b> %	<b>1</b> %	<b>1</b> %	%
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

#### PRIMARY SOURCES

<b>1</b>	G. Prabhakaran. "Genetic-algorithm-based optimal tolerance allocation using a least-cost model", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 11/2004 Publication	<1 %
<b>2</b>	<a href="http://polen.itu.edu.tr:8443">polen.itu.edu.tr:8443</a> Internet Source	<1 %
<b>3</b>	<a href="http://compalg.inf.elte.hu">compalg.inf.elte.hu</a> Internet Source	<1 %
<b>4</b>	<a href="http://dergipark.org.tr">dergipark.org.tr</a> Internet Source	<1 %
<b>5</b>	<a href="http://drops.dagstuhl.de">drops.dagstuhl.de</a> Internet Source	<1 %
<b>6</b>	<a href="http://pratmukh.files.wordpress.com">pratmukh.files.wordpress.com</a> Internet Source	<1 %
<b>7</b>	<a href="http://9lib.net">9lib.net</a> Internet Source	<1 %

8	Waqas Javed, Niklas Elmqvist. "Stack zooming for multi-focus interaction in time-series data visualization", 2010 IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis), 2010 Publication	<1 %
9	acikbilim.yok.gov.tr Internet Source	<1 %
10	docplayer.biz.tr Internet Source	<1 %
11	openaccess.ogu.edu.tr:8080 Internet Source	<1 %
12	Longitudinal Research with Latent Variables, 2010. Publication	<1 %

Exclude quotes  On

Exclude matches  < 5 words

Exclude bibliography  On

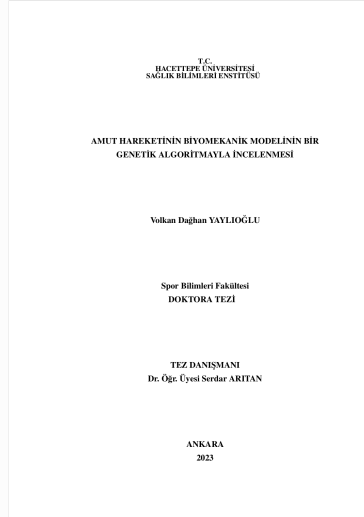


**EK-6 DİJİTAL MAKBUZ****Digital Receipt**

This receipt acknowledges that Turnitin received your paper. Below you will find the receipt information regarding your submission.

The first page of your submissions is displayed below.

Submission author: Volkan Dağhan Yaylıoğlu  
Assignment title: AMUT HAREKETİNİN BİYOMEKANİK MODELİNİN BİR GENETİK...  
Submission title: AMUT HAREKETİNİN BİYOMEKANİK MODELİNİN BİR GENETİK...  
File name: thesis.pdf  
File size: 1.54M  
Page count: 90  
Word count: 12,137  
Character count: 80,137  
Submission date: 01-Aug-2023 03:23PM (UTC+0300)  
Submission ID: 2139969887



## 9 ÖZGEÇMİŞ