

**ALGISAL GERİ BİLDİRİMLERİN DAVRANIŞSAL
DEĞİŞKENLİK ÜZERİNDEKİ ROLÜNÜN KONTROL
TEORİSİ YÖNTEMİYLE ARAŞTIRILMASI**

**INVESTIGATING THE ROLE OF SENSORY FEEDBACK
ON BEHAVIORAL VARIABILITY VIA CONTROL-
THEORETIC APPROACHES**

MUHAMMED SEYDA CÖMERTLER

DR. İSMAİL UYANIK

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

ÖZET

ALGISAL GERİ BİLDİRİMLERİN DAVRANIŞSAL DEĞİŞKENLİK ÜZERİNDEKİ ROLÜNÜN KONTROL TEORİSİ YÖNTEMİYLE ARAŞTIRILMASI

Muhammed Seyda CÖMERTLER

Yüksek Lisans, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. İsmail UYANIK

EYLÜL 2021, 75 sayfa

Canlılar genellikle hem bireylerin kendisinde meydana gelen hem de bireyler arasında ortaya çıkan dramatik morfolojik ve fizyolojik farklılıklara karşı tutarlı davranışlar sergilemektedirler. Ancak canlıların bu gürbüz ve hassas davranışsal başarıyı elde etmek için hangi stratejilerden faydalandığı henüz tam olarak bilinmemektedir. Bu konuda önde gelen hipotezlerden birisi algısal geri bildirimlerin iyi bir şekilde uyumlanmamış denetleyiciler varlığında bile hassas davranışsal cevaplara olanak sağladığı yönündedir. Bununla birlikte davranışsal değişkenliğin algısal geri bildirim sinyallerinin belirginliği ve çeşitliliğine ne kadar duyarlı olduğu halen açık bir şekilde ifade edilememektedir. Bu çalışmada daha önce zayıf elektrik balıklarının bir türü olan *Eigenmannia virescens* balıklarının sığınak takibi davranışı üzerine toplanmış iki güncel veri kümesi incelenmektedir. Bu veri kümeleri çok çeşitli algısal geri bildirim koşullarında gerçekleştirilmiş deneyler içermektedir. Çalışmamız algısal geri bildirim sinyallerinin belirginliği ve çeşitliliğinin artmasının çok daha gürbüz ve hassas davranışsal cevaplara yol açtığını göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen bulgularımız mühendislik tasarımlarında odağın algısal geri bildirim sinyallerinin belirginliği ve çeşitliliğinin iyileştirilmesine yönlendirilmesini teşvik etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Davranışsal değişkenlik, algısal geri bildirim, zayıf elektrik balıkları, duyumotor kontrol, algısal belirginlik, *Eigenmannia virescens*

ABSTRACT

INVESTIGATING THE ROLE OF SENSORY FEEDBACK ON BEHAVIORAL VARIABILITY VIA CONTROL-THEORETIC APPROACHES

Muhammed Seyda CÖMERTLER

Master Of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Dr. İsmail Uyanık

September 2021, 75 pages

Animal behaviors are often robust to dramatic variations in morphophysiology both within and between individuals. However, what strategies the animals use to achieve these sorts of robust yet precise behavioral performances is still not known. A prominent hypothesis suggests that sensory feedback enables precise behavioral responses even in the face of poorly tuned neural controllers. Nevertheless, it is yet unclear how sensitive the behavioral variability is to the salience and versatility of the sensory feedback. Here, we examine two recent datasets on the refuge tracking response of *Eigenmannia virescens*, a species of weakly electric fishes. These datasets include experiments conducted in a wide variety of sensory conditions. We show that increasing the salience and versatility of the sensory feedback yields more robust and precise behavioral responses. Our findings may inspire the engineers to shift their focus more on improving the salience and versatility of the available sensory feedback.

Keywords: Behavioral variability, sensory feedback, weakly electric fish, sensorimotor control, sensory salience, *Eigenmannia virescens*

TEŞEKKÜR

Öğrenim yolumda en büyük desteği ve ilhamı veren değerli ailem başta olmak üzere bilgi, tecrübe ve bütün emeği ile bana her zaman destek olan danışman hocam Sayın Dr. İsmail Uyanık'a, tezin geliştirilme aşamasına değerli zamanını ayıran Sayın Fatmagül İbişoğlu'na, bugünlere kadar üzerimde emeği geçen bütün değerli öğretmenlerime, gösterdikleri anlayıştan dolayı iş arkadaşlarıma, farklı bakış açıları kazandıran dostlarıma ve eğlenebileceğimiz hafta sonları çalışmalarımın bitmesine sabır gösteren değerli eşime çok teşekkür ediyorum.

Tez ve beraberinde yürüttüğümüz makale çalışmasına katkı sağlayan çok değerli hocalarım Prof. Dr. Ömer Morgül, Prof. Dr. Hüseyin Demircioğlu, Dr. Mustafa Mert Ankaralı, Dr. Şölen Kumbay Yıldız, Dr. Burcu Ünlütapak, Dr. Derya Altunay ve Dr. Gürhan Bulu'ya da teşekkürlerimi bir borç bilirim. Bununla beraber tezimin geliştirilmesinde bana desteğini esirgemeyen değerli dostlarım Evren Ünlübilgin'e ve Celal Adanur'a çok teşekkür ediyorum.

Ayrıca mühendislik çalışmalarımı çatısı altında yürüttüğüm HAVELSAN A.Ş. ve yüksek lisans eğitimimi tamamladığım Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü ve Fen Bilimleri Enstitüsü'ne minnettarlığımı bildirmek isterim.

İÇİNDEKİLER

ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Hayvanlarda Ritmik Hareketler, Değişkenlik ve Gürbüz Davranışlar	1
1.2. Geri Besleme Teorisi ve Değişkenlik Üzerindeki Etkisi.....	5
2. MATERYALLER VE METOTLAR.....	13
2.1. Çevredeki Algısal Koşulların Değiştirilmesi ile Algısal Belirginliğin Modülasyonu	14
2.2. Çevreden Algılanan Algısal Geri Beslemenin Güçlendirilip Zayıflatılması .	17
2.3. Veri Analizi: Değişkenlik Metrik Çıktısının Eldesi.....	21
2.3.1. Ön Hazırlık Süreci:.....	22
2.3.2. Ana Metrik Süreci:.....	25
2.3.3. İleri Metrik Süreci:	26
2.4. Lokomotor Dinamikleri ve Duyumotor Denetleyici için Hesaplamalı Modeller.....	28
2.5. Değişkenliği etkileyen faktörlerin ANOVA ile analizi	30
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	34
3.1. Algısal Geri Bildirimden Sağlanan Bilgilerin Belirginliği ve Çeşitliliğinin Davranışsal Değişkenlik Üzerindeki Rolü	34
3.2. Algısal Geri Beslemenin Güçlendirilmesi/Zayıflatılması.....	40
3.3. Geri Beslemeli Kontrol Sistemlerinin Değişkenliğinin Algısal Geri Beslemeye Duyarlılığı.....	43
3.3.1 Benzetim Ortamında Algısal Geri Beslemenin Güçlendirilip Zayıflatılmasının Davranışsal Değişkenlik Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi	43

3.3.2 Davranışsal Tepkilerin Algısal Geri Beslemeye Olan Hassasiyetinin İncelenmesi.....	46
4. YORUM.....	50
5. KAYNAKLAR	52
EK 1 – Spektrumlar, diğer grafikler.....	55
EK 1.1 ANOVA Sonuç Raporu.....	55
EK 1.2 Tezde Kullanılan Teknik Terimlerin Açıklaması.....	56
EK 4 - Tezden Türetilmiş Yayınlar	57
EK 6 - Tez Çalışması Orjinallik Raporu	58
ÖZGEÇMİŞ.....	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Boyları, cinsiyetleri, kiloları birbirinden farklı olan bireylerin benzer ritmik hareket performansları sergilemeleri ve değişkenlik kavramı.....	2
Şekil 1.2 Değişen algısal belirginlik koşulları altında sığınak takip davranışı. (A) Eigenmannia virescens sığınak yani $r(t)$ hareket ettikçe bulunduğu pozisyonu yani $y(t)$ 'yi korumak için ileri ve geri yönde yüzmektedir. (B) Balığın sığınak takip davranışının kapalı döngü geri beslemeli kontrol modeli. (C) Deneyde aydınlık ve pencere koşullarının değişimine göre balıkta değişen algısal geri bildirim gösterimi.....	7
Şekil 1.3. Kapalı döngü sistemde algısal geri besleme manipülasyonu sonucunda algısal bilginin güçlendirilmesi ile balığın gördüğü ve gözlemcinin gördüklerinin temsili gösterimi.	10
Şekil 1.4. Balık hareketinin, sığınak hareketine eklenmesiyle algısal geri beslemenin modülasyonunun güçlendirilmesi ya da zayıflatılmasının kapalı döngü gösterimi. (A) Balık hareketi geri beslenir ve sığınağın açık döngü yörüngesine gerçek zamanlı ve çevrim içi olarak eklenir. (B) Buradaki modülasyon, çevreden algılanan algısal geri beslemenin güçlendirilerek ya da zayıflatılarak balığın kendi hareketinin algısal sonucunun değiştirilmesi olarak ortaya çıkar.....	11
Şekil 2.1. Sığınak Takip Hareketinin Deney Düzenineğinin Gösterimi.....	14
Şekil 2.2. Kapalı döngü sistemde aydınlık ve karanlık koşullarda geri beslemesinin manipüle edildiği durumda sığınak takibi deneyi için balık ve sığınağın pozisyonunun gösterimi.	18
Şekil 2.3. Algısal Geri Besleme Sisteminin doğal ve eklenmiş geri beslemesinin birleştirilmesi sonrası oluşturulan yapının öbek şeması	19
Şekil 2.4 Metrik eldesini sağlayan yazılımın iş akış şeması.....	22
Şekil 2.5. Aynı koşullar altında, 15 cm sığınak uzunluğu, pencereli yapı, 0.55 Hz sığınak hareket frekansı sabit koşulları altında, aydınlık ve karanlık değişken koşulları değişkenliğin gösterimi.	27
Şekil 2.6. Farklı iki gruptaki bireylerin makale yazma oranına yüksek lisans yapmanın etkisinin gösterildiği ANOVA analizinin öbek şeması.	31
Şekil 3.1. Balığın davranışsal değişkenliğinin değişen çevresel faktörlere göre, kategorisel olarak gösteriminin sağlandığı histogram.....	36
Şekil 3.2.Pencereli ve 11.1 cm uzunluğundaki sığınakta yapılan deneylerde γ kazanç değeri değiştirilerek manipüle edilen geri besleme sonucunda balığın aydınlık ve karanlık koşullar altında 20 farklı kazanç değeri için ortaya çıkan değişkenlik eğrisi.....	41
Şekil 3.3. Hesaba dayalı balık modelinin sanal olarak sığınak takibi deneyinde kullanılan kapalı döngü öbek şeması.	43
Şekil 3.4. Hesaplamalı balık modellerinin gözlemlenen değişkenlik çıktısı.....	44
Şekil 3.5. Çevrede mevcut olan algısal geri beslemenin kalitesini temsil eden $H(s)$ geri besleme faktörünün bulunduğu kapalı döngü kontrol sisteminin öbek şeması	46

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Kapalı döngü manipülasyon deneylerinde kullanılan γ değerleri	20
Çizelge 2.1 Birinci deney düzeneği için örnek bir koşul belirleme tablosu.....	23
Çizelge 2.2 Lokomotor sistemi ve Davranışsal Denetleyici parametreleri.....	29
Çizelge 3.1 Birinci deney düzeneğinde koşulların gösterimi.....	35

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$P(s)$	Laplace Alanında Lokomotor Dinamiği
$C(s)$	Laplace Alanında Davranışsal Denetleyici
$T(s)$	Laplace Alanında Kapalı Döngü Transfer Fonksiyonu
$H(s)$	Laplace Alanında Geri Besleme Faktörü
$L(s)$	Laplace Alanında Açık Döngü Kazancı
$Y(s)$	Laplace Alanında Sistem Çıktısı
$R(s)$	Laplace Alanında Referans Girişi, Sığınak Yörüngesi
$E(s)$	Laplace Alanında Hata Sinyali
$u(t)$	Kapalı Döngüde Kontrol Sinyali
$r(t)$	Zaman Alanında Referans Girişi, Sığınak Yörüngesi
$y(t)$	Zaman Alanında Sistem Çıktısı, Balık Hareketi
$e(t)$	Geri Besleme ile Sistem Referans Girişi Arasındaki Fark, Hata Girişi
A	DC kazancı
k	Kazanç (N/m)
ζ	Sönümleme Katsayısı
m	Kütle Sabiti (kg)
b	Sönümleme Sabiti (Ns/m)
ω_n	Doğal Açısız Frekans (rad/s)
ω	Açısız Frekans (rad/s)
s	Laplace Alanında Kompleks Frekans
p	Önemlilik Derecesi
F	İstatistiksel Önemlilik Etkisi
S	Hassasiyet
M	Değişkenlik Metrik Çıktısı

t_s	Örnekleme Zamanı
γ	Kapalı Döngülü Sistemin Geri Besleme Kazanç Değeri
kg	Kilogram
k	Uyarıcı kazancı
U	Sığınak Yörünge Konumu
V	Sığınak Yörünge Hızı

Kısaltmalar

DCD	Gelişimsel Koordinasyon Bozukluğu (<i>Developmental Co-ordination Disorder</i>)
Hz	Hertz
Cm	Santimetre
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
PVC	Polivinil klorür
PC	Kişisel Bilgisayar
Sin	Sinüs
Cos	Kosinüs
ANOVA	Varyans Analizi (<i>Analysis of Variance</i>)
MANOVA	Çok Değişkenli Varyans Analizi (<i>Multivariate Analysis of Variance</i>)
SPSS	Sosyal Bilimler için İstatistiksel Paket Programı (<i>Statistical Package for the Social Sciences</i>)
IBM	Uluslararası İş Makineleri (<i>International Business Machines</i>)
BCI	Beyin-Bilgisayar Arayüzü (<i>Brain-Computer Interface</i>)

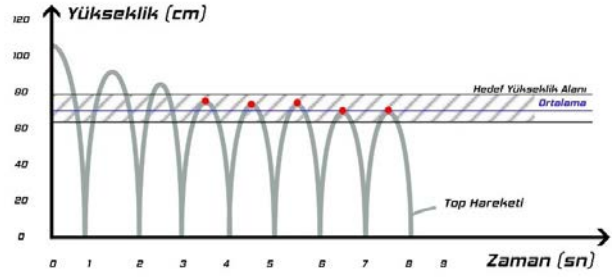
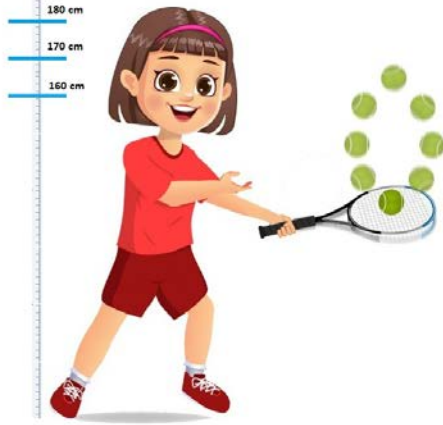
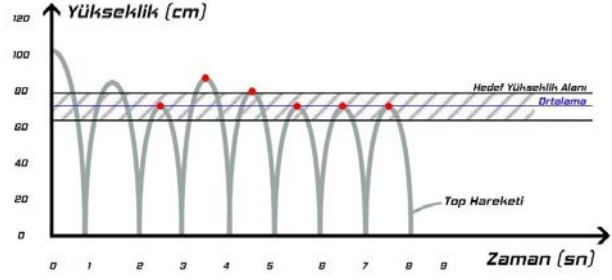
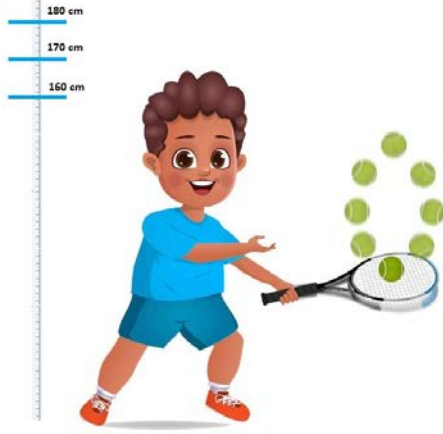
1. GİRİŞ

1.1. Hayvanlarda Ritmik Hareketler, Değişkenlik ve Gürbüz Davranışlar

Hayvan davranışlarının en temel özelliklerinden birisi, genel olarak değişken çevre koşullarına karşın dayanıklı ve istikrarlı yani gürbüz davranışsal çıktılara sahip olmalarıdır. İlaveten hayvanlar yapıları ve ağırlıkları gibi fiziksel özelliklerinin ani değişimlerine karşın davranışlarında yine gürbüz bir performans sergileyebilmektedirler [1]. Bunun yanı sıra bireyler arasında doğal ve kaçınılmaz olarak mevcut olan morfolojik ve fizyolojik farklılıklara karşın da farklı bireylerin davranışları istikrarlı olarak benzer performanslar göstermektedir [2-4].

Bu durum en iyi ritmik davranışlar üzerinden inceleyebilir. Doğadaki canlılar günlük hayatlarında birçok farklı ritmik hareketler sergilerler. Örneğin insanlardaki yürüme davranışını ele alırsak boy ve kilo gibi fiziksel özellikleri birbirinden ne kadar farklı olursa olsun tüm insanların ağırlık merkezi oldukça benzer bir periyodik salınım gerçekleştirmektedir. Hatta bu benzerlik ilgili davranışların gayet basit matematiksel modellerle ifade edilmesine olanak sağlayan önemli bir fenomendir [5,6]. Ancak burada asıl soru, fiziksel olarak birbirinden çok farklı morfolojik ve fizyolojik özelliklere sahip insanların nasıl olurda bu kadar benzer davranışsal başarımlar sergileyebildiğidir. Bu durum tabii ki başka birçok ritmik davranış üzerinden de gözlemlenebilir.

Şekil 1.1.'de top sektiren bir çocuğun, topla raketinin her döngüde temas ettiği noktalar kümesi, topun hareketinin her bir devri için vardığı en üst noktalar kümesi ve çevrimin periyodik süresi grafikte incelenebilir. Değişkenlik kavramının daha iyi anlatılabilmesi bakımından topun her seferinde vardığı en üst noktaların oluşturduğu kümedeki noktalar arasındaki farklar dikkate alınarak değişkenlik hesaplanabilir.



Şekil 1.1. Boyları, cinsiyetleri, kiloları birbirinden farklı olan bireylerin benzer ritmik hareket performansları sergilemeleri ve değişkenlik kavramı

Birbirinden bağımsız iki farklı birey için tekrarlanan aynı ritmik hareketin incelenmesi sonucunda, raket ile topa vurulan noktalar ve topun izlediği yörüngelerin büyük oranda benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 1.1.'de gösterilen kavramsal yaklaşım, 2013 yılında Ankaralı ve arkadaşlarının çalışmasındaki sonuçlar temel alınarak, ritmik hareket performansındaki benzerliği görselleştirmek için sentetik veriler üzerinden hazırlanmıştır [7].

Literatürde bireysel ve çevresel değişimlere karşın davranışsal başarımının benzerliğinin sebebini açıklamaya çalışan iki farklı hipotez bulunmaktadır. Bu konuda geçmişten gelen en önemli hipotezlerden birisi merkezi sinir sisteminin, vücudun kas ve iskelet sistemine mükemmel bir şekilde uyarlanarak hassas bir kontrol uygulamasıdır. Bu hipotez günümüzde her ne kadar popülerliğini yitirmiş olsa da sinirsel denetleyicilerin vücut mekaniğine oldukça hassas bir şekilde uyum sağlaması kolaylıkla göz ardı

edilemeyecek bir algıdır. Ancak eğer bu yaklaşım doğru olsaydı sistemde yaşanan anlık morfolojik ya da fizyolojik değişimler (örneğin tek bir beslenmede sinekkuşlarının vücut ağırlıklarının %20 artması gibi) sinirsel kontrol döngülerinin uyarlanması için ihtiyaç duyduğu uzun süre sebebiyle davranışsal cevaplarda da anlık değişimlere neden olurdu [3]. Zira bu anlık bozucu etkilerde davranışsal başarımın korunması için beynin kas ve iskelet sistemine mükemmel bir şekilde ve çok kısa bir sürede uyumlandırılması gerekmektedir. Biyolojik sistemler için pratikte pek de mümkün olmayan bu durum göz önüne alındığında bu hipotezin canlılardaki gürbüz davranışsal başarım sergileyebilme fenomenini açıklamak için tek başına yeterli olamayacağı görüşü ortaya çıkmıştır.

Bu noktada algısal geri bildirimlerin davranışsal değişkenliği düzenlediği yönündeki ikinci ve sıklıkla kabul gören bir diğer hipotez ön plana çıkmaktadır. Bu hipotez ani bozucu etkiler varlığında davranışsal değişkenliği azaltan temel etkenin hassas bir şekilde uyumlu olmuş bir sinirsel denetleyiciden ziyade sürekli bir şekilde işlenen algısal geri bildirim sinyalleri olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda bu tez çalışması geri beslemeli duyumotor kontrol davranışları sırasında algısal geri bildirim sinyallerinin davranışsal değişkenlik üzerindeki rolünü araştırmayı hedeflemektedir.

Bu ikinci hipotezi destekleyecek en önemli çalışmalardan birisi, algısal geri beslemenin varlığında, sistem ve denetleyicinin uyumsuzluğuna karşın da davranışsal cevapların gürbüz kaldığının gösterilmesidir [9]. Bunu kanıtlamak için, 2020 yılında Uyanık ve arkadaşları bir tür zayıf elektrik balığı olan üç farklı *Eigenmannia virescens* balığının sığınak takip davranışları esnasında sistem ve denetleyicilerinin veriye dayalı modellerini elde etmişlerdir. Bu modellerde, bireyler arasındaki sistem ve denetleyiciler hesaplamalı olarak değiş tokuş edilmiştir, yani balıklardaki denetleyiciler ve lokomotor sistemler bir balıktan diğerine aktarılarak benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, bu durumda bile Uyanık ve arkadaşları sürekli ve benzer kapalı döngü başarımı elde etmişlerdir. Normal şartlarda denetleyicileri değiş tokuş edilen balıkların kısa vadede yeni bir denetleyici sistem uyarlanması yapılmadan benzer performanslar sergilemesi beklenmez iken, balıklar denetleyicileri değiş tokuş yapılmadan önceki performanslarına yakın performanslar sergilemişlerdir. Bu da sinirsel denetleyicilerin gürbüz davranışsal başarımlar üretmesi için sisteme hassas şekilde ayarlanmasına ve uyarlanmasına gerek olmadığını göstermektedir. Buna ek olarak, Uyanık ve arkadaşları algısal geri beslemeyi benzetim ortamında engelleyerek sinirsel denetleyicinin sisteme mükemmel ve hassas bir

şekilde ayarlanması durumunda bile algısal geri bildirim yoksa davranışsal değişkenliğin önemli ölçüde arttığını göstermektedir [9].

Literatürdeki araştırmalar, algısal geri beslemenin davranışsal değişkenlik üzerindeki kritik rolünü destekleyen birçok deneysel gözlem içermektedir. 2013 yılında Ankaralı ve arkadaşları özel bir deney sistemi tasarlamış ve insanlar üzerinde sanal arayüzü bulunan bir raket ile top sektirme deneyi yapmışlardır. Ankaralı ve arkadaşları bu araştırmalarında sadece görsel geri besleme ile yapılan deney sonuçlarına ek olarak dokunsal geri beslemenin devreye girmesi ile sağlanan çıktılarının değişkenliğinin döngüden döngüye azaldığını göstermişlerdir [7]. Bu çalışmaya benzer olarak, 2008 yılında Mackenzie ve arkadaşları, Gelişimsel Koordinasyon Bozukluğu (**D**evelopmental **C**oordinatioon **D**isorder, DCD) olan çocukların basit motor hareketlerini gerçekleştirirken (örneğin yürürken ayak sesleri ile alkışlarını koordine etme gibi görevlerde) sağlıklı bireylere kıyasla algısal eksikliklerden kaynaklı olarak davranışsal değişkenliğin arttığını gözlemlemişlerdir [10]. Buna ek olarak ise 2004 yılında Pearson ve arkadaşları, kedilerin yürüme davranışlarının istikrarlı ve gürbüz şekilde sürdürülmesinde kas proprioseptörlerinden gelen geri beslemeler sayesinde elde edilen majör faz geçiş zamanlamasının büyük katkı sağladığını göstermişlerdir. Hayvanların biyomekanik durumuna uygun motor sinyallerinin üretilmesini sağlayan algısal geri beslemelerin hayvanlardaki davranışsal değişkenliği azalttığı belirtilmiştir [11]. Daha güncel bir çalışma olarak, 2015 yılında Cullins ve arkadaşları bir tür deniz yumuşakçası olan *Aplysia*'ların geri beslemenin mümkün olduğu durumlarda göreve dayalı motor örüntülerinin bireyler arasında çok daha az değişkenliğe sahip olduğunu göstermişlerdir. Algısal geri besleme varlığında, bireylerin daha geniş bir ortak çözüm alanına sahip olduğu ve bireyden bireye davranışsal değişkenliğin azaldığı sonucuna varılmıştır [12]. Bu araştırmalarda eksik kalan temel parça ise kontrollü olarak ayarlanmış bir çerçevede algısal geri beslemenin modüle edilerek algısal geri bildirim sinyallerinin belirginliği ve çeşitliliğinin davranışsal değişkenlik üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır.

Burada önemli bir nokta hassas denetleyici uyumu ve algısal geri bildirim mekanizmaları için öne sürülen bu hipotezlerin birbirinden bağımsız ya da karşıt olarak incelenmesinden ziyade bu iki yapının biyolojik sistemler için kısa ve uzun vadeli zaman dönemlerinde birbirini tamamlayıcı şekilde çalıştığının her zaman göz önünde bulundurulmasıdır. Zira sinirsel denetleyiciler uzun vadede özellikle algısal geri bildirim sinyallerinden gelen bilgiye göre vücuda daha iyi uyum sağlamaktadırlar. Örneğin, ritmik

hareket performansının aynı bireyde zamanla oluşan morfolojik ya da çevresel değişimlere rağmen benzer kalması bu iki hipotezin farklı zaman süreçlerinde birbiriyle etkileşim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Kısacası özellikle ani etkiler varlığında sinirsel denetleyiciler hassas bir kontrol sergileyemese de algısal geri bildirimlerin davranışsal başarımlar üzerinde önemli bir rolü olduğu, uzun vadede bu etkinin sinirsel denetleyicilerin vücuda daha iyi uyum sağlamasına da destek olduğu temel alınmalıdır.

Araştırmamızda temel olarak geri beslemeye odaklanılmış ve algısal geri bildirim sinyallerinin kalitesi ve çeşitliliği üzerinde etkili çevresel faktörlerin davranışsal değişkenlik üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu bağlamda algısal geri bildirim sinyallerinin kalitesi ve çeşitliliğini etkileyen morfolojik ve çevresel kaynaklı parametreler kontrollü olarak kayba uğratılmış ya da güçlendirilmiştir. Böylece algısal geri beslemenin davranışsal değişkenlik üzerindeki rolü incelenebilmiştir.

Bu çalışmada denetim kuramı yöntemlerinden faydalanarak bu gürbüz davranışsal başarımın altında yatan mekanizmaları incelemeyi amaçlıyoruz. Bu bağlamda biyolojik sistemleri denetim kuramı düzleminde analiz edebilmek amacıyla bu mekanizmaların çevre ile fiziksel etkileşim kuran kısmına “*sistem*”, sinirsel denetleyici kısmına “*denetleyici*” ve geri beslemenin işlendiği kısma ise “*algısal geri besleme*” denmektedir [9,13,14].

Bu araştırmadan elde edilen sonuçların mühendisliğin önemli alanlarında ve tasarımsal yaklaşımlarda yenilikler sağlaması ön görülmektedir. Bazı engelli insanlar için tasarlanan Beyin Bilgisayar Arayüzlü (**Brain-Computer Interface, BCI**) sistemlerde, yeni lokomotor rehabilitasyon sistemlerinde, sinirsel protez arayüzlerinde olduğu gibi birçok spesifik alanda bu araştırmamızdan elde ettiğimiz bulguların literatüre katkı sağlaması beklenmektedir.

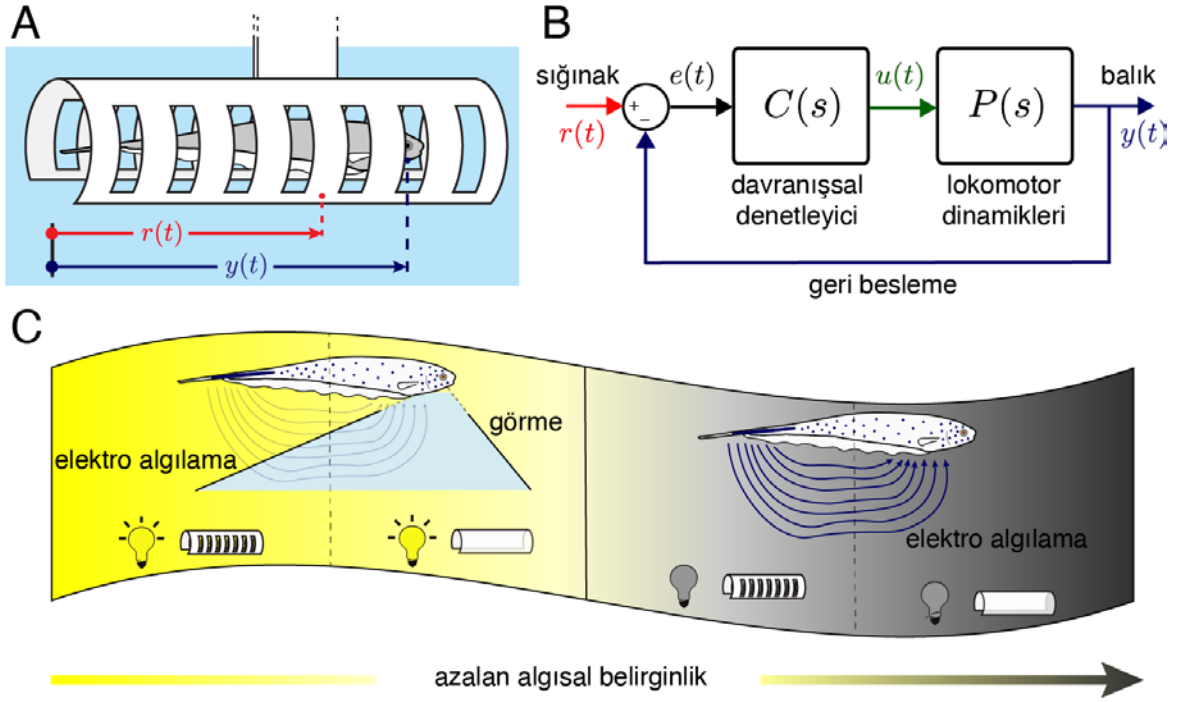
1.2. Geri Besleme Teorisi ve Değişkenlik Üzerindeki Etkisi

Canlılardaki gürbüz davranışsal başarımların kabiliyetinin anlaşılması için hayvanlardaki ritmik hareketler uzun yıllardır mühendislikte kullanılan temel denetim kuramının sınırları kapsamında modellenmiştir [15,16]. Bu modeller genellikle karmaşık olmayan doğrusal ve zamandan bağımsız yapılar halinde sunulmuştur. Bu durum denetim kuramında yer alan frekans cevabı, kararlılık analizleri, gözlenebilirlik analizleri gibi birçok tekniğin biyolojik kontrol sistemlerinde uygulanabilmesine olanak

sağlamıştır [17]. Benzer bir şekilde denetim kuramı teknikleri sinirbilim alanında hücre düzeyinde sinirsel aktivitelerin yorumlanması amacıyla da kullanılmaktadır [18].

Bu çalışmamızda zayıf elektrik balıklarının bir türü olan *Eigenmannia virescens* balıkları üzerinde daha önceden yapılan deneysel çalışmalar temel alınarak, toplanan veri kümelerindeki davranışsal değişkenlik tekrar yorumlanacak ve son bölümde benzetim ortamında yapılan bu çalışmaların doğrulaması sunulacaktır. Elde edilen deney gruplarında balıkların en temel içgüdülerinden biri olan “sığınak takibi” hareketi temel alınacaktır. Bu içgüdü sayesinde balık, sığınığın hareket ettirilmesiyle sığınığı takip ederek güvenli alanda kalıp hayatta kalmaya çalışacaktır.

Eigenmannia virescens balığının sığınak takibi davranışı için önceki yıllarda toplanan iki deney kümesinin verisi kullanılarak davranışsal değişkenlik üzerinde algısal belirginliğin ve çeşitliliğin etkisini araştırmak amacıyla çalışmalar yapılmıştır [19,20]. Balıklar ileri ve geri yönde hareket ederek doğal sığınak takibi davranışı sergilerler, bu sayede tek boyutta hareket eden sığınak içerisinde saklı kalabilmektedirler (Bkz. Şekil 1.2 A) [21]. Daha önce de belirtildiği üzere sığınak takibi olarak adlandırılan bu eşsiz davranış özellikle veri güdümlü sistem tanıyımına oldukça elverişlidir. Burada balıkların serbest ve sınırlandırılmamış hareketleri esnasında denetim kuramı yaklaşımının tercih edilmesi gayet kullanışlıdır [22,23]. (Bkz. “kapalı döngü model” için Şekil 1.2. B). Bu davranış, mühendislik alanında birçok çalışmanın da ilham kaynağı olmuştur [24,25].



Şekil 1.2 Değişen algısal belirginlik koşulları altında sığınak takip davranışı. (A) *Eigenmannia virescens* sığınak yani $r(t)$ hareket ettikçe bulunduğu pozisyonu yani $y(t)$ 'yi korumak için ileri ve geri yönde yüzmektedir. (B) Balığın sığınak takip davranışının kapalı döngü geri beslemeli kontrol modeli. (C) Deneyde aydınlık ve pencere koşullarının değişimine göre balıkta değişen algısal geri bildirim gösterimi.

Bu çalışmada kullanacağımız ilk veri kümesi algısal uyarıların aktif algılama hareketlerinin üretilmesi üzerindeki etkisinin incelenmesi için daha önce 2019 yılında Uyanık ve arkadaşları tarafından toplanmıştır [27]. Bu çalışmada ise, biz ortamdaki algısal belirginliğin balığın davranışsal değişkenliği nasıl etkilediğini araştırmak için bu veri kümesini farklı bir açıdan yeniden analiz edeceğiz. *Eigenmannia virescens*, olağan dışı elektro-algılama sistemi sayesinde çok geniş ve farklı ölçüde algısal belirginlik koşullarının değişmesi durumunun hayvan davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi için mükemmel bir model olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu balıklar tamamen karanlık ortamda olsalar bile elektrik organları sayesinde suda ürettikleri elektromanyetik alanı modüle ederek inanılmaz bir şekilde çevrelerini algılayabilmektedirler [28]. Böyle bir yeteneği olan balık, ışığın var olduğu ortamda hareketlerini kontrol etmek için hem görsel hem de elektromanyetik geri beslemeyi birlikte kullanabilmektedir. Fakat tamamen karanlık ortamda, bu balıklar görsel bilgiden mahrum kaldıkları için temel olarak elektro-algılama sisteminden gelen geri bildirimlerle hareket ederler. Balığın görsel ve elektro-

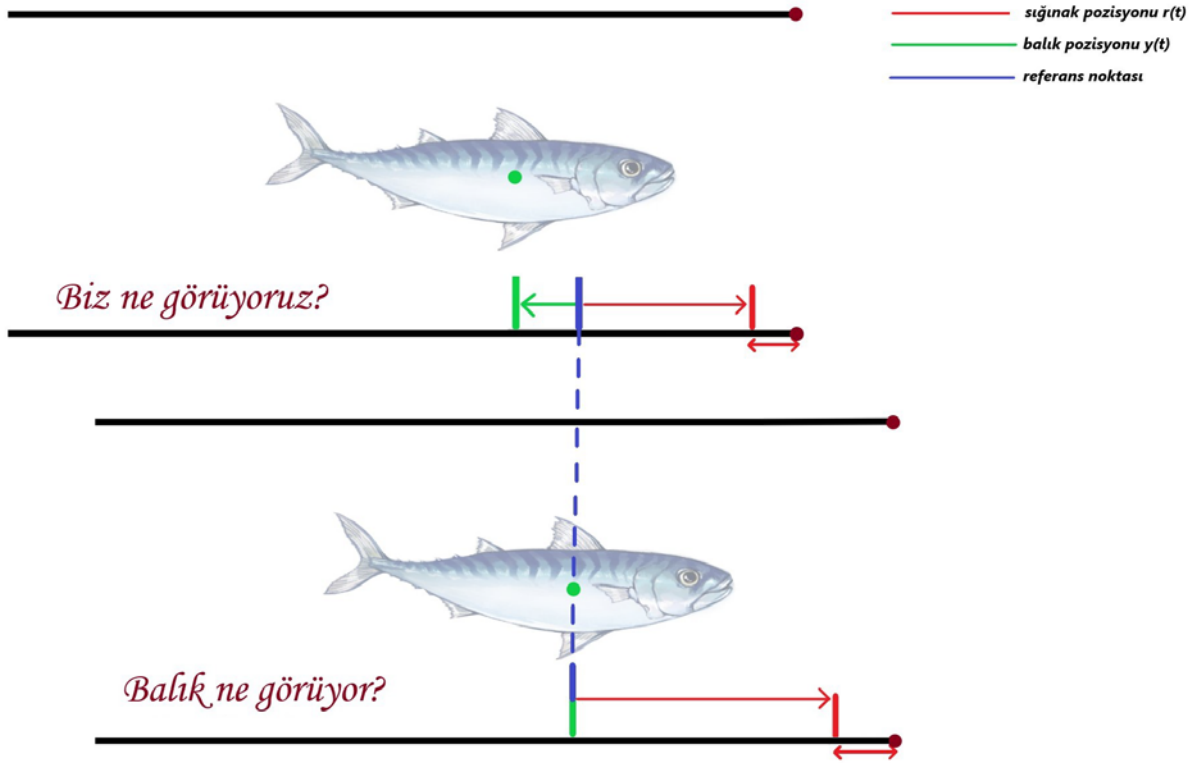
algılama geri bildirimlerinden gelen bilgiler sayesinde, sığınak takip davranışında gürbüz ve hassas hareketler üretilebilmesi için geri besleme kullanım oranları değişmektedir. Değişen bu kullanım oranları geri beslemelerin içerdiği bilgilerin kalitesi ve diğer çevresel faktörlere bağlıdır. Bu çalışmada bunlardan bazılarının değişimini inceliyor olsak da genel olarak deneyin yapıldığı suyun basıncı, deneyin yapıldığı bölgedeki atmosfer basıncı, suyun sıcaklığı, suyun saflığı, suyun akıntısı ve balıkların teste hazırlanması gibi parametreler sabit tutulmuştur. Deneyin yapıldığı sistemdeki referans noktanın lazer ile gösterimi ve koku gibi geri beslemeyi etkileyebilecek olası bazı parametrelere ise bu veri kümesinde yer verilmemiştir. Bununla birlikte sığınak uzunluğu, pencerenin varlığı veya yokluğu, ışığın varlığı veya yokluğu ve son olarak da sığınak hareketinin frekansı kontrollü bir şekilde değiştirilmiştir. Temelde balığın görsel ve elektro-algılama geri bildirimlerindeki değişimleri gözlemlemiş olsak da ilerleyen çalışmalarda “yanal sistem” (lateral system) yani balığın su hareketini ve akışını algılayarak davranışını ona göre biçimlendirmesini sağlayan geri besleme yapısının da incelenmesi mümkündür. Aynı şekilde bu veri kümesinde sabit tutulan ya da hiç yer verilmemiş diğer parametreler bir sonraki çalışmalarda kontrollü olarak değiştirilerek sonuca olan etkisi incelenebilecektir.

Bu araştırmada kullanılacak ilgili geri beslemelerin çeşitliliğinin ve miktarının değişimi, davranışsal başarımlar için ihtiyaç duyulan bilginin kullanımında da değişime neden olur. Böylece ışığın kapatılıp açılması algısal bilginin çeşitliliğinin kategorisel değişimini tetiklemektedir. Bunun da ötesinde ışık parametresinin değişiminin yanı sıra deneyler, duvarlarında küçük pencerelerin olduğu ve olmadığı koşulların sağlandığı PVC tüplerle yapılmıştır. Pencerenin olması durumunda hem görsel hem de elektro-algılama açısından algısal belirginliğin artması beklenmektedir (Bkz. Şekil 1.1. C, aydınlığın sağlandığı koşullarda algısal durum). Burada ışığın olmaması durumunda pencerenin var olması, yok olması koşuluna göre elektro-algılama açısından balığın elektromanyetik modülasyonuna katkı sağlamaktadır. Görsel algı belirginliği (yani bulunduğu konumu algılama farkındalığı ve sığınak hareketini takip yeteneği) pencerenin var olması sabit koşulunun yanında ışıklı durumda ışiksiz duruma görece oldukça fazla bilgi sağlar. Bununla birlikte ışiksiz durumda pencerenin varlığı ise elektro-algılama geri bildirimleri bilgisinin artmasını sağladığı bu çalışmamızda araştırılmış ve sunulmuştur.

Sonuç olarak yukarıda bahsedilen her koşulda dört farklı sığınak boyu için tek tek üç ila beş tekrarlı deneyler yapılmıştır. Işığın varlığı veya yokluğu, pencerenin varlığı

veya yokluğu ve dört farklı sığınak boyunun kombinasyonunda 16 farklı koşul elde edilmektedir ki bu koşullar çevredeki algısal belirginlik ve çeşitliliği geniş bir şekilde kategorize etmektedirler. Aslında bu veri kümesi, her deney durumu için üç farklı sığınak hareket frekansı da içermektedir. Ancak yapılan literatür araştırmaları, toplanan bilgiler ve bu hareket frekansının değişim miktarı (1.55 Hz'e kadar) göz önüne alındığında, sığınak hareket frekansının algısal belirginlikte önemli bir değişiklik oluşturması beklenmemektedir. Toplanan bilgilerin ve sezgisel beklentinin deneysel olarak doğruluğunu görmek için sığınak hareket frekansının da davranış değişkenliği üzerindeki etkisi ayrıca incelenmiştir. Neticede *Eigenmannia virescens* için çevredeki algısal belirginlik ve çeşitliliğin artmasının davranışsal değişkenliği azalttığı keşfedilmiştir. Bu çalışmada, çevresel koşullarda geri beslemeyi güçlendirecek bilgilerin artması ve buna bağlı olarak balığın deneydeki takip hareket performansını iyileştirmesiyle beraber hareketin değişkenliğinin azaldığı gözlemlenmiştir.

İkinci veri kümesi sanal gerçeklik donanımlarıyla hazırlanan bir deney sisteminden alınan ve direkt olarak algısal geri beslemenin güçlendirilip/zayıflatılması üzerinde yoğunlaşan bir yapıdır. Buradaki sığınak takip davranışında, balığın hareketi anlık olarak takip edilir ve yapay bir geri besleme ile sığınak hareketine gerçek zamanlı olarak belirli bir kazanç katsayısı ile çarpılarak eklenir (Bkz. Şekil 1.4.). Bu eklenilmiş geri besleme döngüsü, balığın kendi hareketlerinin hızlandırılmış ya da yavaşlatılmış halini sığınak hareketine ekleyerek balığın kendi hareketlerinin algısal sonuçlarının manipüle edilmesini sağlar. Böylelikle çevredeki algısal belirginlik koşullarından bağımsız olarak güçlendirilmiş ya da zayıflatılmış geri besleme sinyalleri elde edilebilmektedir. Bu sistemde balığın hareketi çevrim içi ve gerçek zamanlı olarak tespit edilerek kontrollü bir şekilde sığınak hareketine eklenir. Sığınak hareketini sağlayan motorun balığın hareketine göre kontrollü şekilde sürülmesi ile sanal olarak balığın geri bildirimleri manipüle edilmiş olur. Sıgımdan başka bir algısal referansı olmayan balık için, kendi gözünden baktığında verdiği tepkiler dışardan bakan birine göre daha güçlü ya da daha zayıf şekilde görünmektedir (Bkz. Şekil 1.3.). Balık sığınak hareketini dış dünya referansı olmadan takip ettiği için kendi hareketine görece sığınmanın ne kadar tepki verdiğini bilememektedir ve bu sayede görsel olarak manipüle edilmiş olur. Bu tezde, algısal geri besleme sinyallerinin güçlendirilmesi ya da zayıflatılmasının hayvanlarda davranışsal değişkenliği nasıl değiştirdiğini gözlemek için ilgili veri kümesi yeniden incelenmiştir.

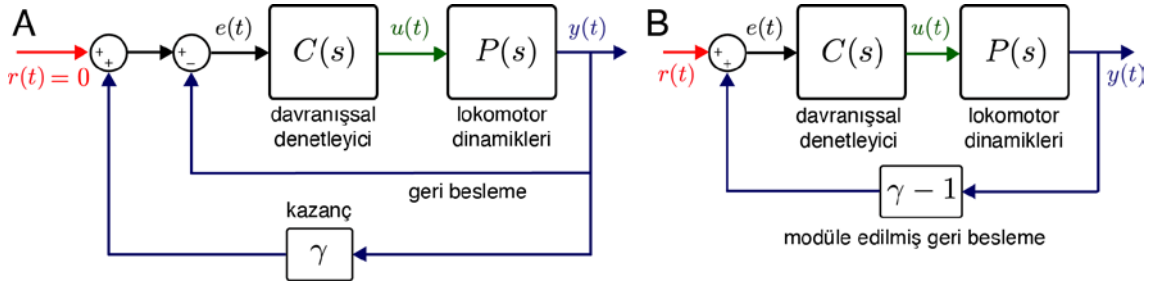


Şekil 1.3. Kapalı döngü sistemde algısal geri besleme manipülasyonu sonucunda algısal bilginin güçlendirilmesi ile balığın gördüğü ve gözlemcinin gördüklerinin temsili gösterimi.

Oluşturulan deney düzeneğinde, geri beslemenin güçlendirilmesi koşulunda, üstteki balığın orijin noktasından, yani balığın üzerinde belirtilen yeşil noktadan itibaren, balık yönüne göre 1 cm öne doğru gitmesiyle, sığınak 1 cm geriye doğru hareket ettirilir. Sığınakların kıyaslama noktaları alt ve üst resimlerde aynı noktadadır ve sığınakların başlangıcına olan mesafeleri sabittir. Birinci durumda orijinde yani referans noktasında duran balık ikinci durumda 1 cm ileri gider. Kurulan deney düzeneği balığın 1 cm öne gittiğini algılar ve motora buna uygun olarak ilgili değerin daha önceden belirlenen çarpan ile çarpılarak sığınanın ters yönde hareket etmesi için gerekli emri verir, bu çarpan Şekil 1.3 için -1 olup balık hareketi kadarının tersini sığınak hareketine ekler, yani ikinci durumda balık 1 cm öne gidince sığınak tersi yönde 1 cm hareket eder. Gözlemci dışarıdan baktığında balığın yere göre 1 cm ileri gittiğini görür ancak kapalı bir sığınak içerisinde bulunan balık, sığınanın yere göre geri hareketini algılayamayacak, bu sebeple kendisinin ilk konumuna göre 2 cm ileriye gittiğini zannedecektir (Bkz. Şekil 1.3.). Şekilden de görüleceği üzere sığınak kıyaslamasında kullanılan referans noktası ile

balığın konumu, balık gözünden bakılan çizimde aynı noktadır. Dışarıdan bakıldığında ise balığın yere göre konumu ile sığınak noktası arasında fark artmıştır ve hata sinyali güçlendirilmiştir. Balığın, yaptığı hareketten daha fazla hareket ettiğini gösterdiğimiz sisteme **güçlendirilmiş geri beslemeli sistem**, kendi hareketinden daha yavaş hareket ettiğini gösterdiğimiz sisteme ise **zayıflatılmış geri beslemeli sistem** olarak adlandırılmaktadır. Yukarıda anlatılan kurgu güçlendirilmiş geri beslemeye bir örnektir.

Bu deney grubundan elde ettiğimiz sonuçlar algısal geri besleme sinyallerinin güçlendirilmesinin davranışsal değişkenliği azalttığını, tersine algısal geri besleme sinyallerinin zayıflatılmasının ise geri besleme modülasyonunun yeteneğini azaltarak değişkenliği dramatik bir şekilde arttırdığını göstermektedir. Bu analizi tamamlamak için Uyanık ve arkadaşlarının gerçek balık hareketlerinden faydalanarak oluşturduğu sanal balık modellemeleri yapısı kullanılmıştır [8]. Bu matematiksel modeller kullanılarak benzetim çalışmaları gerçekleştirilip yukarıda bahsedilen ikinci deney grubundaki bulgular benzetim ortamında da analiz edilerek doğrulama yapılmıştır.



Şekil 1.4. Balık hareketinin, sığınak hareketine eklenmesiyle algısal geri beslemenin modülasyonunun güçlendirilmesi ya da zayıflatılmasının kapalı döngü gösterimi. (A) Balık hareketi geri beslenir ve sığınakın açık döngü yörüngesine gerçek zamanlı ve çevrim içi olarak eklenir. (B) Buradaki modülasyon, çevreden algılanan algısal geri beslemenin güçlendirilerek ya da zayıflatılarak balığın kendi hareketinin algısal sonucunun değiştirilmesi olarak ortaya çıkar.

Algısal geri beslemenin güçlendirilip zayıflatılması esnasında davranışsal değişkenliği nasıl değiştirdiğini araştırmak için benzetim çalışmalarımızda kontrol sinyali olan $u(t)$ 'ye *bant-limitli beyaz gürültü* bozucusu eklenmiştir. Bu gürültü sistemlerin doğal ortamda bireysel olarak sahip oldukları değişkenliği temsil etmektedir. Her balığın doğası gereği bireyden bireye değişen bir iç değişkenliği vardır ve bu bozucu etmen bunu ifade

etmeye çalışır. Benzetim çalışması sonuçları, deneysel sonuçlarla uyum göstererek davranışsal değişkenlik üzerinde algısal geri beslemenin önemli etkisini göstermiştir.

Bu tezde yürütölen çalışmaların sonuçları göstermiştir ki, biyolojik sistemler kapalı döngü davranışlar sergilerken benzer ve tutarlı şekilde görevler gerçekleştirmek için sinirsel denetleyici ve bireye ait lokomotor sistemi arasında hassas bir şekilde uyumlandırma yapılmasına gerek duymamaktadır. Yeteri kadar algısal geri besleme mevcut olduğunda, davranışın kapalı döngü kontrolü istikrarlı ve uyumlu cevaplar vermektedir. Araştırmamızdan elde ettiğimiz bulguların mühendislere tasarladıkları sistemlerde denetleyicinin sisteme hassas şekilde ayarlanması ve uyumlandırılmasına harcanan eforun yerine algısal geri beslemenin belirginliği, kalitesi ve çeşitliliğinin geliştirilmesine harcanan efora daha fazla dönüştürölmesi konusunda ilham verici olacağı düşünülmektedir.

2. MATERYALLER VE METOTLAR

Bu tezde, zayıf elektrikli cam balığı olarak da bilinen *Eigenmannia virescens* balıklarının sığınak takibi davranışları sırasında elde edilen iki farklı veri kümesi kullanılmıştır [19,20]. Bu veri kümelerine olanak sağlayan deneysel çalışmalar, Johns Hopkins Üniversitesi Hayvan Bakımı ve Kullanımı Komitesi tarafından incelenerek kabul görmüştür. Ayrıca bu veri toplama çalışmaları Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Ulusal Araştırma Konseyi ve Sinirbilim Derneği tarafından verilen yönergelere uygun olarak sürdürülmüştür. Bu kısımda, elde edilen sonuçlar sergilenmeden önce kullanmış olduğumuz veri kümelerinin iç yapıları incelenecektir. Davranışsal değişkenlik için direkt olarak kullanılacak ham verilerde balığın boylamsal hareketi, zaman bilgisi, çevresel faktörler gibi bileşenler detaylı anlatılacak, dolaylı yoldan kullanılacak ya da hiç kullanılmayacak olan suyun iletkenliği gibi parametreler görece daha az detaya inilerek anlatılacaktır. Çok daha detaylı bilgiler ise 2019 yılında Uyanık ve arkadaşlarının ve de 2018 yılında Biswas ve arkadaşlarının orijinal çalışmalarından alınabilir.

Kullanılan bu iki veri kümesi, daha önce yapılan çalışmalarda belirli bir sıraya uygun olarak toplanmıştır. Her bir veri parçasının içeriği aynı bilgi yoğunluğuna sahiptir. Bu ham veriler havuzu yapılan çalışmaya göre yeniden sıraya dizilmiş, kümelenmiş ve belirlenen şartlar altında tekrar analiz edilmiştir.

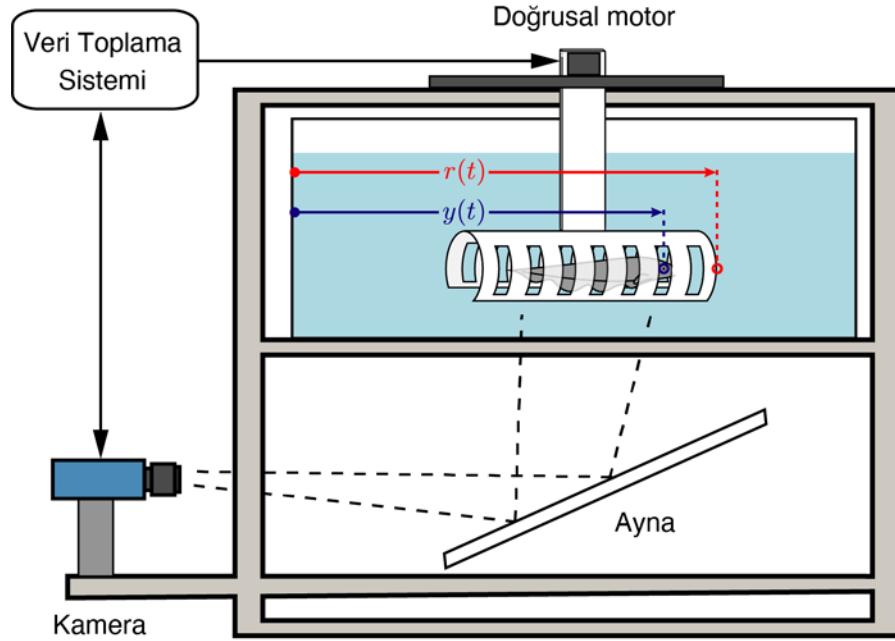
Veri kümesine ek olarak bu kısımda araştırmamızda yaptığımız veri analizinin detayları da verilmiştir. Değişen algısal koşullar altında davranışsal değişkenliği ölçmek için tüm veri kümeleri yeniden analiz edilmiştir. Bununla birlikte, tüm bu deneysel çalışmaları doğrulamak ve teorik altyapısını daha iyi araştırmak için benzetime dayalı hesaplamalı analizler de yapılmıştır.

Özetlemek gerekirse, birinci veri kümesi ile değişen çevresel faktörlerin davranışsal değişkenlik üzerindeki etkisinin analizi yapılmıştır. İkinci veri kümesinde direkt olarak algısal geri beslemenin iki farklı koşul altında güçlendirilip zayıflatılması ile davranışsal değişkenlik çıktısının analizi yapılmıştır. Son kısımda ise ikinci veri kümesinin doğrulaması için gerçek dünyadan alınan bilgilere dayanılarak oluşturulan sanal balık modelleri ile aynı deneyin MATLAB Simulink ortamında tekrar edilmesi incelenmektedir.

2.1. Çevredeki Algısal Koşulların Değiştirilmesi ile Algısal Belirginliğin Modülasyonu

İlk veri kümesi sığınağın takibi deneyinde, çevredeki algısal belirginliğin modülasyonu için algısal koşulların kontrollü olarak değiştirildiği verileri içermektedir. Başka bir deyişle, birinci veri kümesi çevresel faktörlere bağlı olarak ortamdaki algısal belirginliğin modüle edildiği deneyleri içermektedir [19]. Biz bu çalışmada algısal belirginliğin, dolayısıyla algısal geri beslemenin değişimiyle balıkların davranışsal değişkenliğinde meydana gelebilecek değişimi inceleyeceğiz.

Deney düzeneği, doğrusal şekilde sığınağın hareketini sağlayan bir motor ve balık hareketlerini anlık olarak kaydedebilen bir kameranın bulunduğu, sığınağın ve balık hareketinden anlık olarak veri toplayabilen bir test sistemidir. Doğrusal eyleyici, balığın tek boyutta ileri ve geri yüzdüğü sığınağın hareketini kontrol etmektedir. Burada balığın yanal ve dikey hareketleri dikkate alınmaz. PVC'den yapılan bu sığınağın, daha önceden bilgisayar ortamında belirlenen sabit bir frekansta sinüzoidal dalga formunda hareket ettirilir. Kamera ise 30 Hz'de sığınağın hareketini gerçek zamanlı olarak kaydeder ve bu verileri toplayarak ana bilgisayara gönderir. Kamera görüntülerinin her karesi özel olarak hazırlanmış bir takip yazılımından geçirilerek balık ve sığınağın konumu dijitalleştirilmiştir [29].



Sığınak daha önceden programlanan frekansta hareket ettirildikçe, balık sığınmakta güvende kalma amacıyla sığınak takibi davranışını gerçekleştirmektedir. Böylelikle, balık sığınağın hareketini tek eksenle takip eder ve bu esnada kamera ise bu hareketin ham verilerini bilgisayara aktarır. Şekil 2.1.'de gösterildiği üzere balıklar sırasıyla bu düzenekte sığınak takibi deneyine tabii olurlar.

Her deney toplamda 60 saniye sürmektedir. Deneylerin ilk ve son 10 saniyesinde ise sığınak hareketinin yumuşak başlangıcı ve bitirilişi sağlanarak balığın ani ve beklenmeyen tepkileri azaltılmaya çalışılmıştır. Her deneyin sığınak hızı 1.2 cm/s olup, bu deneyler 40 saniyelik bir zaman dilimi için kullanılabilir veriler içermektedir. Deneyler arasında, balıkların dinlenmesi için en az 2 dakikalık dinlenme süreleri verilmiştir. Toplamda, gözle görülebilir fiziksel farklılıkları olmayan 4 adet balık için, aynı koşullar altında birden çok kez toplanan ham veriler göz önünde bulundurularak 710 deney verisi elde edilmiştir.

Bu veri kümelerinin önemli bir detayı, balığın 710 deneysel deneme esnasında değişen algısal belirginlik koşullarıdır. Değişen bu algısal belirginlik koşullarına daha detaylı bakmak gerekirse; ilk incelenecek olanı aydınlatma koşuludur ki bu çevre koşulu deneyin aydınlık ya da karanlıkta yapılmasıyla ilgilidir. Her bir balık hem aydınlıkta yani beyaz ışık altında (300 – 500 lüks), hem de karanlıkta yani kızılötesi ışığın altında deneye tabii tutulmuştur.

Eigenmannia virescens türünde balıkların tamamen karanlıkta bile çevrelerini algılayabildikleri bir elektro-algılama sistemine sahip oldukları önceki bölümlerde bahsedilmişti. Bazı canlılarda karanlıkta algının önemli oranda ortadan kalkması beklenirken, bu özel balık türünde aydınlık koşuldan karanlık koşula geçişte algısal kapasitesinde önemli bir değişim ortaya çıksa da algılama devam etmektedir. Ortaya çıkan fark, aydınlıkta görsel geri besleme ile beraber elektro-algılama geri bildirimlerini kullanan balığın, karanlık ortamda olsa bile görsel geri beslemesini kaybetmesine rağmen elektro-algılama geri bildirimlerini kullanmaya devam etmesidir. Burada vurgulanması gereken bir diğer detay, balığın karanlık durumlar haricinde ana ve esas geri bildirimlerinin çoğunlukla görsel sinyaller olduğudur. *Eigenmannia virescens*, karanlıkta her ne kadar elektro algılama yapısıyla çevresini algılasa da ışık var olduğu anda görsel geri besleme baskın hale gelmektedir [26].

Bu veri kümelerinde ikinci kontrollü değiştirilen çevresel etken ise PVC sığınak tüplerinin duvarlarındaki pencerelerin varlığı ya da yokluğudur. Pencerelessığınaklar, penceresiz sığınaklara göre ek görsel ve elektro-algılama belirginliği sağlamaktadır. Sığınak üzerindeki pencereler optik ışık sinyalleri ve elektromanyetik elektro-algılama sinyalleri için örüntüler oluşturarak balığın sığınak içerisindeki konum kestirimine destek olmaktadır. Bu nedenle sığınaklarda kontrollü olarak her koşul için pencerelessığınak ve penceresiz çevresel etken değiştirilmektedir. Pencerelerin tamamı özdeş dikdörtgen şeklinde olup 0.625 cm genişliğine ve 2 cm boşluğa sahiptir. Sığınakın her iki yüzünde eşit sayıda pencere bulunmaktadır.

Bunların yanı sıra, şu ana kadar anlatılan iki kategorisel koşul, sığınak uzunluğunun dört farklı boyu için de ayrı ayrı tekrar edilmiştir. Sığınak 7.5, 12.5, 15, 22.5 cm'lik dört farklı uzunlukta tasarlanmıştır. Her bir uzunluk için pencerelessığınak ve penceresiz koşullara göre ayrı sığınaklar üretilmiştir. Son değişken parametre ise sığınak hareketini sağlayan motorun hareketinin uyarıcı frekansının değiştirilmesidir. Burada daha önceden de bahsedildiği üzere toplanan bilgiler ve literatürdeki araştırmalardan elde edilen bilgiler ışığında 1.55 Hz'e kadar frekans değişiminin davranışsal değişkenlik açısından önemsiz olacağı beklense de 0.1, 0.55 ve 1.15 Hz değerleri için daha önce bahsi geçen bütün koşullar altında deneyler tekrar edilmiştir.

Sığınak yörüngesi için frekanslar deneyden deneye değiştirilse de her bir deney boyunca bu frekanslar tamamen sabit tutulmuştur. Balığın her deneyde kat ettiği mesafeyi, yani birim zamandaki hızını sabit tutabilmek amacı ile motoru uyarıcı sinüs sinyalinin frekansı arttıkça o sinyalin şiddetinin büyüklüğü azalmaktadır. Böylelikle daha hızlı salınım yapan sığınaklar için daha kısa yörüngeler ve daha yavaş salınımlı hareketler yapan sığınaklara ise daha uzun yörüngeler çizdirilerek balıkların toplam test süresince kat ettiği mesafe eşit tutulmaya çalışılmıştır. Sığınak konumunun uyarıcı motor sinyallerinin ifadeleri aşağıda gösterilmiştir.

$$1.ışaret \quad U_1 = 0.166 \times \sin(1.15 \times 2\pi t) \quad (1)$$

$$2.ışaret \quad U_2 = 0.347 \times \sin(0.55 \times 2\pi t) \quad (2)$$

$$3.ışaret \quad U_3 = 1.91 \times \sin(0.1 \times 2\pi t) \quad (3)$$

Yukarıda belirtilen her üç işaret sığınak konum sinyallerinin denklemleri olup, yörünge hızlarının aynı olduğunu göstermek için ifadelerin türevleri alınabilir.

$$\text{Sığınak Yörünge Hızı} = (\text{Uyarıcı Sığınak Konumu Sinyali})' \quad (4)$$

Her bir frekans için yörüngenin hızları hesaplanabilir:

$$V_1 = (0.166 \times \sin(1.15 \times 2\pi t))' = 1.199 \times \cos(1.15 \times 2\pi t) \quad (5)$$

$$V_2 = (0.347 \times \sin(0.55 \times 2\pi t))' = 1.199 \times \cos(0.55 \times 2\pi t) \quad (6)$$

$$V_3 = (1.91 \times \sin(0.1 \times 2\pi t))' = 1.199 \times \cos(0.1 \times 2\pi t) \quad (7)$$

Uyarıcı sığınak yörüngesi sinyalleri, deney süreleri aynı olan balıkların hızlarını sabit tutabilmek için özel olarak ayarlanmış, denklemlerde de görüldüğü üzere sığınak yörüngesinin hızı her frekansta aynı tutulmuştur. Bu durumun balığın davranışsal kontrolünde doğrusal olmayan dinamiklerin devreye girmesini önlemek adına özel olarak tasarlanmıştır.

Toplanan ham veri havuzu, her ham veri bloğu içerisinde balığın ismini, sığınak uyarıcı frekansını, deneyin aydınlatma durumunu, sığınanın uzunluğunu, sığınanın pencere durumunu içermektedir. Bunlarla beraber bu veri kümesinde direkt olarak işlenmeyen ancak farklı amaçlarla kullanılan başka parametreler de bu blokta mevcuttur. Örneğin suyun iletkenliği, hangi tarihte toplandığı, toplanan verinin kalitesi ve işlenebilirliği de bu bloklarda yer almaktadır. Tez kapsamında yazılan ve ham verileri tekrardan kümeleyip işleyen yazılım, yukarıda belirtilen dört ana koşul için sınıflandırma yapmaktadır, diğer koşullar ise ek bilgilendirme olarak kullanılmaktadır.

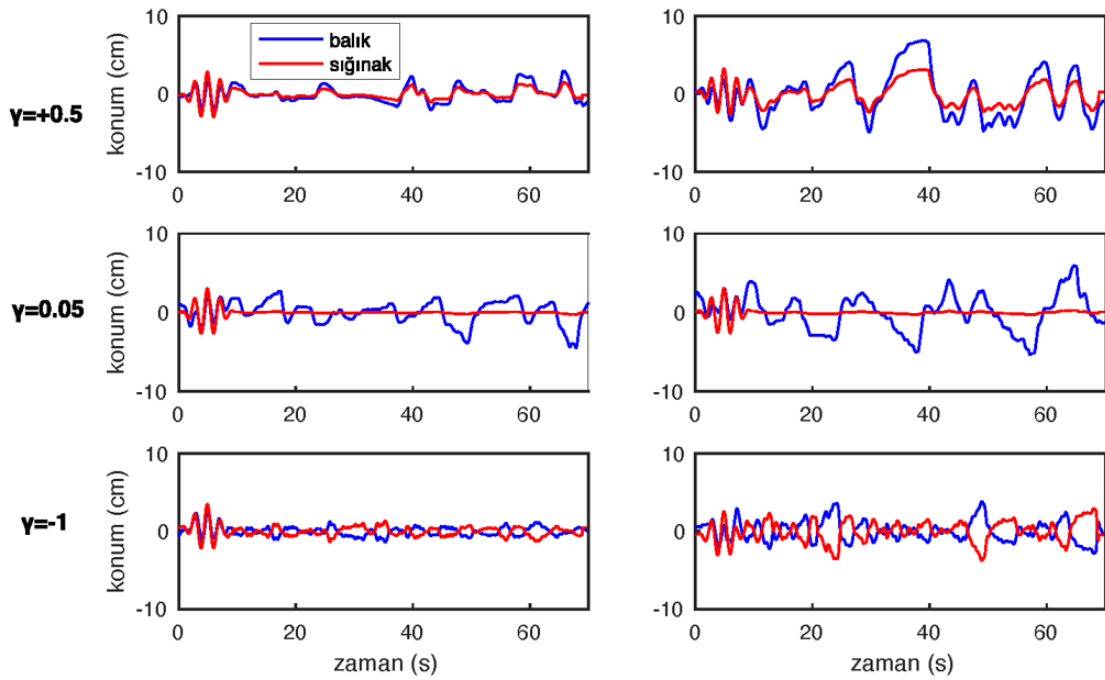
2.2. Çevreden Algılanan Algısal Geri Beslemenin Güçlendirilip Zayıflatılması

İkinci veri kümesi bir sanal gerçeklik ortamı yardımıyla balığın çevreden aldığı algısal geri bildirim sinyallerinin güçlendirilmesi ve zayıflatılmasına olanak sağlayan özel bir deney sisteminden toplanmıştır [20]. Burada tasarlanan deney düzeneği önceki başlıkta anlatılan deney düzeneğine büyük ölçüde benzerlikler göstermektedir. İlkinde olduğu gibi yine sığınacı hareket ettiren bir doğrusal eyleyici ve balığın hareketini kaydeden bir kamera bulunmaktadır. Bununla birlikte bu düzeneğin en temel farkı, balık hareketini çevrim içi bir şekilde izleyerek balığın konumunu, yazılımla belirlenen ve ayarlanabilir olan bir katsayı ile çarpıp sığınak hareketine eklenebilmesine olanak

vermesidir. Sığınak hareketine sağlanan bu geri besleme ile balık algısal bakımdan kolaylıkla kandırılabilir. Sanal olarak oluşturulan bu geri besleme sisteminde kullanılan kat sayının yönü ise balık tarafından algılanan duyuşsal geri bildirim sinyallerinin güçlendirilmesi veya zayıflatılmasına neden olur.

Deneylerin tamamı 11.1 cm uzunluğunda PVC'den yapılmış deney tüplerinde gerçekleştirilmiştir. Önceki deney düzeneğine benzer şekilde pencereler özdeş dikdörtgen şeklinde olup 0.6 cm genişliğine ve 1.9 cm boşluğa sahiptir.

Şekil 1.4.A'da yeni oluşturulmuş kapalı döngü sistemin öbek şeması gösterilmektedir. Kameradan alınan görüntüden sonra yazılım ile sayısallaştırılmış balık konumu bir kazanç değeri γ ile çarpılır ve daha sonra sığınakın açık döngü olan yörüngesine eklenir. Dikkat edilmelidir ki, bu deneylerde balık hareketinin direkt oransal olarak sığınak hareketine dönüşümü için, sığınak öncelikle bir başlangıç hareketi sağlar, daha sonra ise bu tanımlanmış referans sığınak yörüngesi sinyali otomatik olarak $r(t)=0$ 'a ayarlanır. Bu kabuller sonucunda, geri besleme döngülerinin birleştirilmesi ve manipüle edilebilir hale gelmesiyle oluşturulan öbek şema gösterimi Şekil 1.4. B'de verilmiştir.

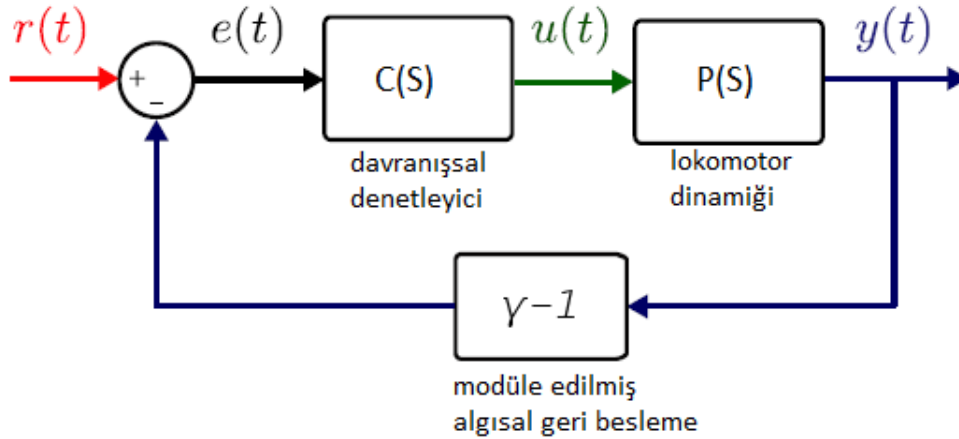


Şekil 2.2. Kapalı döngü sistemde aydınlık ve karanlık koşullarda geri beslemesinin manipüle edildiği durumda sığınak takibi deneyi için balık ve sığınak pozisyonunun gösterimi.

Şekil 1.4.B’de verilen öbek şema, eklenen yeni geri besleme döngüsü ile balığın kendi hareketlerinin algısal beslemeyi ve sonucunda bu beslemenin modülasyonunu nasıl etkilediğini gösterir. Kısacası burada belirlenen kazanç, çevreden algılanan algısal geri beslemeyi güçlendirir ya da zayıflatır.

Şekil 2.2’de bu deney düzeneğinde teste tabii olan balığın aydınlık ve karanlık koşullarda ve üç örnek geri besleme kazanç katsayısı için hareket grafiği verilmiştir. Görüldüğü üzere $\gamma=0.5$ için balık hareketine görece aynı yönde ancak zayıflatılmış bir sığınak hareketi mevcuttur. $\gamma=0$ durumunda sığınak hareketi herhangi bir şekilde değiştirilmemektedir, bununla beraber $\gamma=-1$ için ise balık hareketi ile aynı genlikte ancak tam zıt yönde sığınak hareketi sağlanmaktadır.

Bu veri havuzunda altı farklı balık bireyinin, aydınlık ve karanlık koşullar altında γ değeri değiştirilerek geri besleme açısından manipüle edilmesi irdelenmektedir. Daha önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere, aydınlatmanın varlığı veya yokluğu algısal geri besleme bilgisi açısından oldukça önemli farklar oluşturur. Bu deney düzeneğinde 6 farklı balık için γ değeri değiştirilerek geri besleme manipülasyonuna ek ortam aydınlatması da değiştirilerek davranışsal değişkenliğin üzerindeki etkiler incelenmektedir.



Şekil 2.3. Algısal Geri Besleme Sisteminin doğal ve eklenmiş geri beslemesinin birleştirilmesi sonrası oluşturulan yapının öbek şeması

Yapılan görsel manipülasyonun matematiksel ifadesini ve kazanç katsayısının bu ifadeye olan etkisini incelemek için Şekil 2.3’de görülen öbek şemadan kapalı döngü geri beslemenin denklemi yazılırsa:

$$r(t) - (\gamma - 1).y(t) = e(t) \quad (8)$$

elde edilir. Burada $r(t)$ sığınak hareketi, $y(t)$ ise balığın kendi konumu, $e(t)$ ise referans hareket ile balık konumu arasındaki duyusal hata olarak ifade edilmiştir. Denklemi biraz daha açarak yazdığımızda:

$$r(t) - (\gamma.y(t) - y(t)) = e(t) \quad (9)$$

Burada daha önceden de belirtildiği üzere referans sığınak hareketi $r(t)=0$ 'a eşitlenirse,

$$-y(t)(\gamma - 1) = e(t) \quad (10)$$

denklemini elde edilir. Görüldüğü üzere sonuç itibari ile geri besleme ($\gamma-1$) ile ifade edilen bir orana denk gelmektedir. Burada γ 'nın değiştirilmesi ile direkt olarak geri bildirim sinyallerini güçlendirilebilir ya da zayıflatılabilir.

γ kazancı	0,5	0,48	0,46	0,43	0,41	0,38	0,34	0,31	0,27	0,22	0,17	0,12	0,05	-0,03	-0,12	-0,23	-0,36	-0,52	-0,72	-1
	yavaş tepke bölgesi												doğal tepke bölgesi			hızlı tepke bölgesi				

Çizelge 1.1 Kapalı döngü manipülasyon deneylerinde kullanılan γ değerleri.

Çizelge 1.1.'de sunulan değerler deneylerde kullanılan γ duyusal kazanç değerlerinin tamamıdır. γ değerinin pozitif olması geri beslemenin zayıflatılması, negatif olması ise güçlendirilmesi anlamına gelir. Örneğin $\gamma=-1$ değeri için, yani beslemenin güçlendirilme durumunda, balık 1 cm sağa hareket ettiğinde sığınak 1 cm sola hareket edecektir. Bunu dışardan gören birisi rahatlıkla anlayacak ancak dış referansı olmayan balık, sığınanın fazladan hareket etmediğini, kendisinin 2 cm sağa hareket ettiğini sanacaktır, burada iki katlık bir güçlendirmeden bahsedilebilir. Aynı şekilde, eğer $\gamma=0.5$ için işlem incelenirse, balık 1 cm sağa hareket ettiğinde sığınak da 0.5 cm sağa hareket edecek, balık kendisinin 0.5 cm sağa gittiğini sanacaktır. Neticede yaptığı hareketten daha azını gören balığın görsel geri beslemesi zayıflatılmış olacaktır.

Bu veri kümesinde her bir balık karanlık ve aydınlık koşullar altında Çizelge 1.1'de verilen kazanç değerleri ile teste sokulmuştur. Her balık her koşulda 3 kere test edilmiştir, doğal olarak balık başına test sayısı hesaplanmak istenirse 2 aydınlatma

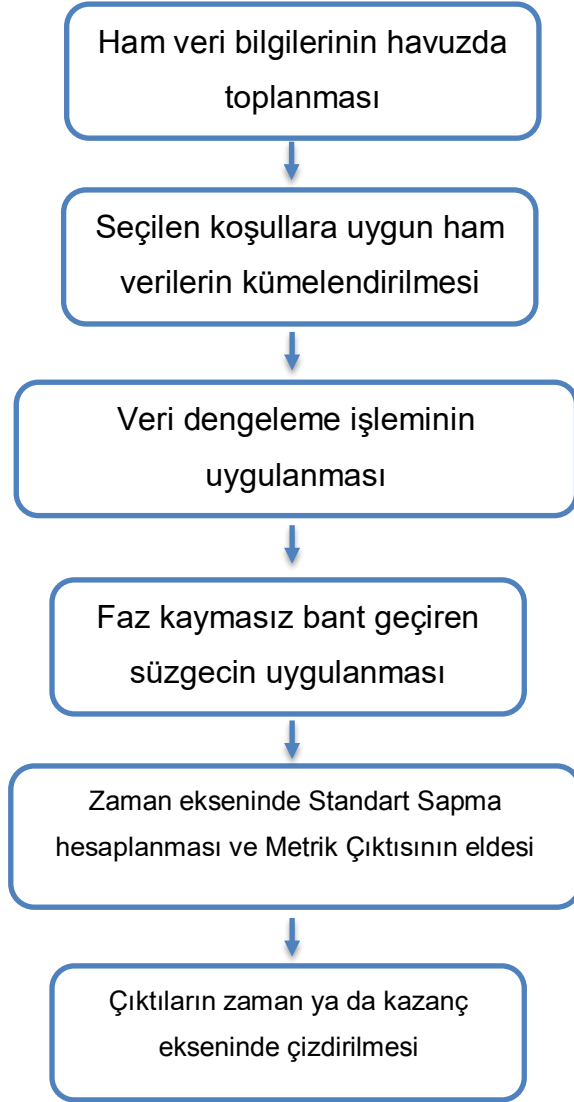
koşulu, 20 farklı geri besleme katsayısı ve 3 deney tekrarı nedeni ile toplamda 120 deney yapılmıştır. Bütün balıkların bütün koşulları için ise 720 deney mevcuttur. Deneyleerin her biri 70 saniye sürmekte, ilk 10 saniyesi balığın uyarlanması için veri işlemede ihmal edilmektedir. Ayrıca açık döngü sığnak yörüngesinin referans sinyali, verilerin işlenebilir olduğu 60 saniye boyunca sifira eşitlenmiştir ($r(t)=0$).

2.3. Veri Analizi: Değişkenlik Metrik Çıktısının Eldesi

Bu bölümde amacımız balıkların davranışsal değişkenliğini sayısallaştıracak bir metrik tanımlayabilmektir. Böylece farklı koşullarda değişkenlik miktarının adil bir şekilde karşılaştırılması sağlanacaktır. Şu ana kadar işlenecek olan iki farklı deney düzeneğinden ve bunlardan elde edilen veriler kümesinden bahsedilmiştir. İlk veri kümesinde, çevresel faktörlerin değişimi ile davranışsal değişkenliğin değişimi incelenirken, ikinci deney düzeneğinde daha çok algısal geri beslemenin direkt olarak güçlendirilip zayıflatılmasının davranışsal değişkenlik üzerindeki etkisi incelenmiştir. İkincil deney durumu için geri besleme katsayısının değişiminin yanı sıra yalnızca aydınlık ve karanlık koşulu sağlanabilmektedir. Devam eden kısımlarda anlatılacak olan davranışsal değişkenlik veri işleme bölümleri, her iki veri kümesi için de işleyiş açısından ortak olmakla beraber, içeriklerin ve veri yoğunluklarının farklı olmasından kaynaklı olarak bazı farklılıklar içerir. Sonuç olarak; değişkenlik çıktısının yazılımda hesaplandığı ana blok her deney verisi için aynıdır.

İlk kısımda “*ön hazırlık süreci*” ile verilerin ana işlem bloğuna nasıl hazırlandığı anlatılacak, daha sonra “*ana metrik süreci*” ile değişkenlik çıktısının eldesinin detayları aktarılacaktır. Son bölümünde yani “*ileri metrik süreci*” kısmında ise elde edilen çıktıların daha iyi yorumlanabilmesi için görselleştirilmesi sunulacaktır. En nihayetinde değişen çevresel faktörlerin davranışsal değişkenliğe olan etkisinin matematiksel çıktısı olan değişkenlik metriği elde edilecek ve yorumlanabilir şekilde sunulacaktır.

Genel itibari ile yazılım bloklarının izleyeceği yol aşağıdaki akış şemasında adım adım verilmiştir.



Şekil 2.4 Metrik eldesini sağlayan yazılımın iş akış şeması

2.3.1. Ön Hazırlık Süreci:

Daha önceden toplanan ham veri havuzunda veriler, belirlenen koşullar altında *ön-süreç* yazılımı ile yeniden sınıflandırılmıştır. Balık verilerinin her biri, ilk deney düzeneği için; aydınlatma koşuluna, sığınak uzunluğuna, pencerenin varlığına ve sığınak hareket frekansına göre, ikinci deney düzeneğinde ise; geri besleme katsayısına ve aydınlatma koşuluna göre ayrı ayrı sınıflandırılabilir ve işlenmek için yeniden kümelendirilebilirler. Bu sayede, örneğin birinci deney düzeneğinde, sığınak uzunluğu 15 cm, pencereli ve hareket frekansı 0.55 Hz olan sığınakta teste tabii olan bütün balıkların

aydınlık ve karanlık koşullar altında iki farklı kümede ham verilerinin toplanması mümkün olmaktadır. Örnek bir ön-süreç yazılımı birinci deney düzeneği için sınıflandırma parametrelerinin tablosu aşağıdaki gibi olabilir.

Ortak Koşul 1	Frekans=0.55Hz	
Ortak Koşul 2	Sığınak Uzunluğu=15cm	
Ortak Koşul 3	Pencere Durumu:Var	
Değerlendirilecek koşullar	<i>Aydınlık</i>	<i>Karanlık</i>
İşlenebilir ham veri bloğu sayısı:	16	15

Çizelge 2.1 Birinci deney düzeneği için örnek bir koşul belirleme tablosu

Daha sonra ise ilgili kümelerin içerisinde belirlenen parametrelere uygun olarak işlenebilecek veriler, kümelенmiş ve işlenmeye hazır durumda olacaktır. Bu çıktıların eldesi için öncelikle yazılımda ham veri havuzunun bulunduğu klasör referans verilir, daha sonra girilen parametreler sonucunda istenilen koşullar altında sürdürülen deney verilerine ulaşım sağlanabilir.

Her bir veri bloğu birçok veri matrisi içermektedir. Burada yapının daha iyi anlatılabilmesi için ilk deney düzeneği örnek gösterilirse, veri bloklarının içerisinde örneklenen 1800 zaman noktası için, balığın y ekseninde enlemsel, x ekseninde boylamsal hareketi 1x1800'lük iki farklı matristir. Aynı şekilde, aynı zaman noktaları için sığınakın kendi hareketi de deney süresi boyunca toplanan 1x1800'lük bir matristir. Yapılan analizlerde balığın ileri geri hareketi ile sığınak içerisinde kalması analiz edildiğinden x eksenindeki veriler ile sığınak hareketine ait veriler işlenmek üzere seçilirler, balığın yanal ve dikey hareketleri ise işleme alınmazlar. Yukarıda verilen Çizelge 2.1'e göre, pencereli, 0.55 Hz frekanslı ve 15 cm'lik sığınak için işlenebilir veri blokları göz önüne alındığında, balığın boylamsal hareketini içeren ham veriler açısından aydınlıkta 16x1800'lük bir matris ve karanlık için ise 15x1800'lük bir matris işlenmeye hazır hale getirilir. Aynı koşul altında farklı balıkların işlenebilir veri sayısı görüldüğü üzere değişmektedir. Bu durum, veri toplama süreci ile alakalıdır.

Her şeyden önce bu matrislere, verilerin birbiri ile daha iyi kıyaslanabilmesi için veri dengeleme işlemi uygulanır. Balıklar yörüngeyi takip ederken tahmin edileceği üzere konum açısından aynı noktayı seçmeyebilirler, her balık kendine farklı bir referans

noktası seçerek aynı davranışı sığınak içerisinde birbirinden farklı lokasyonda yapabilir. Veri dengeleme ile her hareket verileri, aynı koşulda o deney için işlenen hareket verilerinin tamamının ortalamasından çıkarılarak oluşan konum sapmaları yok edilir ve balık hareketi referans sinyal hareketini ortalar. Bu sayede balık hareketinden toplanan verilerin oluşturduğu sinyaller, sığınak hareketinin etrafına ölçekli bir şekilde oturtulmuş olur. Neticede verilerin niteliği değiştirilmeden eksen üzerinde daha okunabilir grafikler oluşturulmuştur.

Bir sonraki adımda ise ele alınan balığa göre boylamsal konum bilgileri, yapılacak olan analizlerde daha sağlıklı sonuçlar vermesi bakımından bir süzgeç işleminden geçer. Burada sığınak hareketine görece yüksek ve düşük frekanstaki balık hareketleri filtre ile süzölmüştür. Balığın doğrusal olmayan hareketleri ve anlamlandırılabilmiş ancak aktif takip hareketi dışında kalan hareketler süzölmektedir [19]. Bu hareketler ve detayları Uyanık ve arkadaşları tarafından daha detaylı incelenmiştir.

“Çift yönlü sıfır-fazlı bant-geçiren filtre” kullanılarak yapılan süzme işlemi belirtilen frekanslarda elektronik olarak hem ileri yönde hem de geri yönde yapılarak verilerin zaman çizgisinde kaymamasını, yani balık ve sığınak konumu verileri arasında zaman ekseninde faz farkı olmamasını sağlar. Kullanılan çift yönlü filtre sonucunda sıfır faz bozulması sağlanmıştır. Matlab yazılımında “*filtfilt*” komutu kullanılarak oluşturulan çift yönlü sıfır-fazlı bant-geçiren filtre sinyal işlemeden bilinen “digital biquad filter” olup ikinci dereceden tekrarlı doğrusal filtredir (*recursive linear filter*). İki kutuplu ve iki sıfır içerir, Z alanında transfer fonksiyonu;

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2}}{a_0 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}} \quad (11)$$

Burada genel olarak $a_0=1$ seçilerek katsayılar normalize edilir. Sonuç olarak denklem 12 transfer fonksiyonu olarak elde edilir.

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}} \quad (12)$$

Sığınak hareketinin frekansı en fazla 2 Hz olacağından bant geçiren süzgecin yüksek frekans kesim noktası 3 Hz ve düşük frekans kesim noktası ise 0.01 Hz olarak seçilmiştir. Filtreler bilgisayar ortamında yazılımsal olarak gerçekleştirildiği için oldukça

yüksek dereceli keskin bant geçişine sahip filtreler kullanılarak veri üzerindeki istenmeyen etkiler en aza indirilmiştir.

Aynı şekilde ikinci deney düzeneğinde toplanan veriler havuzdan çekilerek belirlenen koşullar için işlenmeye hazır hale getirilir. Aydınlık ya da karanlık koşullar altında her bir algısal geri besleme katsayısı için veriler kümelendirilmektedir.

Bu noktaya kadar kıyası yapılması istenen çevresel faktör ve sabit tutulmak istenen diğer faktörlere göre veriler seçilmiştir. Görsellik ve işlenebilirlik açısından daha konforlu olması amacı ile ölçeklendirilmiş ve dengelenmiş veri daha temiz ve anlamlı olması amacıyla da filtrelenmiş ve ana metrik bloğuna hazır hale getirilmiştir.

2.3.2. Ana Metrik Süreci:

Değişkenlik kavramı varyans analizi yapılarak oluşturulmuştur. En temelde izlediğimiz yaklaşımda, belirlenen koşullar altında balığın zaman eksenine göre yapmış olduğu boylamsal hareketleri her bir deney için aynı zaman noktasında birbirlerine göre kıyaslanmış ve balığın o koşulda yaptığı hareketin ne kadar değişkenlik gösterdiği incelenmiştir.

Sabit tutulacak ve kıyaslanacak koşulları belirlenmiş örnek bir hesaplama için, zaman eksenindeki bir t_s anında, işlenebilir bütün veri satırlarının o t_s anındaki pozisyon veri noktaları kendi aralarında standart sapma işlemine tabii olurlar. Rakamlarla örneklendirmek gerekirse aynı koşul altında işlenebilir ve birbiri ile kıyaslanacak olan 10 farklı hareket eğrisinin ilgili t_s anında 10 farklı konum noktası mevcuttur. Bu veriler kendi arasında standart sapmaya maruz bırakılarak sonuçta tek bir değer elde edilir. İşte bu hesaplama, tüm örnekleme zaman noktaları için yapılırsa, işlenebilir eğrilerin tamamının 1800 farklı zaman noktasında aynı hesap için 1×1800 'lük bir standart sapmalar eğrisi elde edilir. Daha sonra belirlenen bir koşul için elde edilen bu eğrinin örneklendirme noktalarının tamamı, örneklendirmenin sürdürüldüğü zaman iterasyonları temel alınarak aritmetik ortalamaya alınır ve sonuçta tek bir değer olarak metrik çıktısı elde edilir.

Yapılan işlemleri genelleştirmek için, belirlenen bir koşulda M farklı deney olduğunu varsayalım. Öncelikle veriler, sığınak hareketlerindeki örnekleme noktaları ile birebir eşleştirilsin ve zaman ekseninde örneklendirilen her bir veri noktası N tane olsun. $y[i,j]$, i^{nci} deney için j^{nci} veri noktasını temsil eder. Daha sonra M denemede j^{nci} veri noktalarının standart sapması alınır ise:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y[i,j] - \mu_j)^2} \quad (13)$$

Burada:

$$\mu_j = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y[i,j] \quad (14)$$

Daha sonra ise değişkenlik şu şekilde tanımlanabilir:

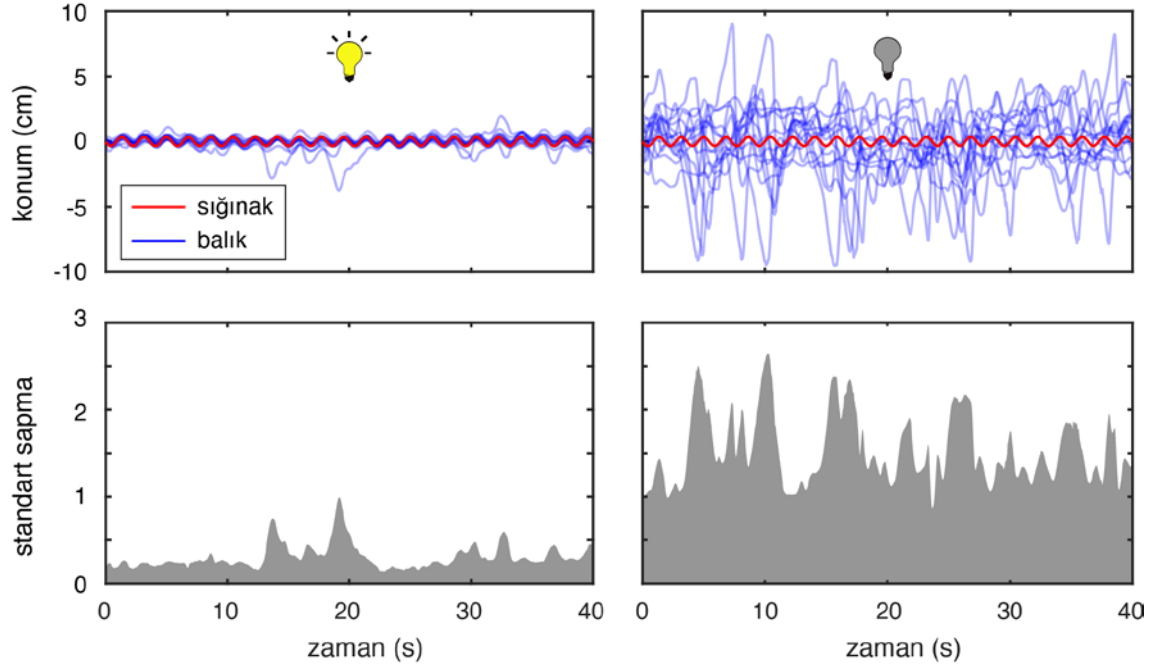
$$\text{değişkenlik} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sigma_j \quad (15)$$

Aynı şekilde ikinci deney düzeneğinde belirlenen aydınlık/karanlık koşul sonrasında her bir geri besleme katsayı için zaman ekseninde veri bloğu başına 1800 zaman noktası ve bunlara karşılık gelen boylamsal konum verileri bulunmaktadır. Aydınlık koşulu ve kazanç değeri seğimi sonrasında ana metrik süreci devreye girer. İlgili kazanç değeri için belirlenen aydınlık koşulu altında standart sapmalar eğrisi üretilir, daha sonra ise ortalama işlemi ile metrik çıktıısı elde edilir.

2.3.3. İleri Metrik Süreci:

Bu kısımda istenilen metrik çıktıısının elde edilmesinden sonra, ilgili çıktıyı çeşitli şekillerde sunabilmek ve yorumlamak için çıktının görselleştirildiği farklı yazılım blokları bulunmaktadır. İlk deney düzeneğindeki görsellik kavramı, farklı koşulların kıyasında zaman ekseninde elde edilen 1800 örnekleme zamanındaki boylamsal pozisyon verileri için aynı koşulda tekrar eden bütün deneylerden toplanan verilerin üst üste çizdirilmesi ile oluşturulur. Kıyaslanan koşullar ise yan yana çizdirilir ve çevresel koşulların değişiminin davranışsal değişkenlik üzerindeki etkisi net bir şekilde takip edilebilir. Zaman ekseninde sürekli yapılan standart sapma hesabı ilgili grafiklerin altlarına yerleştirilerek değişkenlik çıktıısı değişimi net bir şekilde gözler önüne serilmiştir.

Yukarıda verilen genelleştirilmiş denklemleri, örnek olarak verilen Çizelge 2.1 koşulları için işlediğimizde, ileri süreç yazılımının çıktısı olarak Şekil 2.5’deki gibi bir görsel oluşmaktadır.



Şekil 2.5. Aynı koşullar altında, 15 cm sığınak uzunluğu, pencereyi yapı, 0.55 Hz sığınak hareket frekansı sabit koşulları altında, aydınlık ve karanlık değişken koşulları değişkenliğinin gösterimi.

Şekil 2.5’de sol tarafta aydınlık ve sağ tarafta ise karanlık durum için sığınak hareketi takibi deneyinde balıkların çizdiği rotalar mavi ile gösterilmiştir. Açıkça görülmektedir ki karanlık koşul için balık takip performansı azalmaktadır ve hareket değişkenliği artmaktadır. Bir alt kısımda, solda aydınlık koşul için hareketin zaman ekseninde her bir örnekleme noktası için standart sapma grafiği ve aynı şekilde sağ tarafta ise karanlık koşul için standart sapma grafiği bulunmaktadır. Metrik çıktısı, yani davranışsal değişkenliğin değeri ise bu standart sapmanın zaman ekseninde aritmetik ortalamasının alınmasıdır. Şekil 2.5’de aydınlık koşul için elde edilen değişkenlik çıktısı karanlık koşula göre yaklaşık 5 kat azdır ($M_{\text{aydınlık}}=0.30731$, $M_{\text{karanlık}}=1.5391$).

İkinci deney düzeneğinde kullanılan 20 farklı kazanç katsayısı ve 2 farklı aydınlatma koşulu için, her bir kazanç ve aydınlatma koşulunda bir adet metrik değeri elde edilir. Bu metrik eldeleri, metrik çıktısı ile kazanç değerlerinin eksenlerini oluşturduğu bir grafikte sunularak kazancın değişiminin metriği nasıl değiştirdiğini,

aslında davranışsal değişkenliğe nasıl bir etkisi olduğunu göstermektedir. Aynı şekilde farklı aydınlatma koşulları altında bu değişken kazanç değerlerinin ve aydınlık koşullarının değişkenlik çıktısına etkisi sunulmaktadır.

2.4. Lokomotor Dinamikleri ve Duyumotor Denetleyici için Hesaplamalı Modeller

Söz konusu ikinci deney düzeneği verilerinin sonucunu doğrulamak amacı ile balıkların duyumotor denetleyicisi ve lokomotor sisteminin daha önceden yapılan çalışmalardan yararlanarak hesaplamalı modelleri hazırlanmış ve benzetim ortamında analizleri gerçekleştirilmiştir [9,30]. Bu modeller, deneysel sonuçların hesaplamalı analizle eşleşip eşleşmediğini değerlendirmek için algısal geri beslemenin benzetim ortamında manipüle edilmesine olanak sağlar.

Şekil 2.3. bir balığın sığınak izleme davranışının, kapalı döngü öbek şema modelini sunar. 2020 yılında Uyanık ve arkadaşları, herhangi bir kısıtlama altında bırakılmayan balıklardan topladıkları davranışsal hareket verileri ile üç farklı balığın davranışsal denetleyici ve lokomotor sistem dinamiklerini tanımlamıştır. Deneysel sonuç bulgularının tutarlılığını doğrulamak amacı ile kurulacak benzetim ortamında, balığın sığınak izleme tepkisinin benzetimini elde etmek için bu modeller kullanılmıştır.

Balıkların kapalı döngü transfer fonksiyonu $T(s)$ ve lokomotor sistemi dinamiği $P(s)$ aşağıda ikinci dereceden transfer fonksiyonu formlarında verilmektedir:

$$T(s) = \frac{A\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (16)$$

Uyanık ve arkadaşları yaptığı çalışmada balık sistemini aşağıdaki gibi tanımlamışlardır:

$$P(s) = \frac{k}{ms^2 + bs} \quad (17)$$

Elde edilen bu bilgilerle oluşturulan bu sanal balık modelleri, 3 farklı balıktan toplanan verilere uygun olarak tasarlanmıştır. Aşağıda verilen Çizelge 2.2, verileri toplanan üç farklı balığın parametreleridir.

	A	ξ	ω_n (rad/s)	k (N/m)	M (KG)	B (NS/M)
BALIK 1	0.53	0.58	8.55	0.3228	0.0025	0.0417
BALIK 2	0.60	0.55	9.51	0.2200	0.0025	0.0186
BALIK 3	0.52	0.52	7.88	0.1622	0.0025	0.0218

Çizelge 2.2 Lokomotor sistemi ve Davranışsal Denetleyici parametreleri

Burada verilen yapı basit geri beslemeli denetim kuramı yaklaşımlarından esinlenmektedir. Böylece karmaşık ve doğrusal olmayan modeller yerine daha basit, doğrusal ve zamandan bağımsız geri beslemeli kontrol modelleri kullanılmıştır. Balığın $P(s)$ ile ifade edilen lokomotor sistemini bulurken kullanılan parametreler de m balıkların kütle sabitini, k kazancı, b sönümleme sabitini temsil ettiği gibi transfer fonksiyonu $T(s)$ 'de ise ζ sönümleme katsayısını, ω_n doğal açısal frekansı temsil eder. Ayrıca s Laplace Alanında kompleks frekansıdır.

Şekil 2.3. göz önünde bulundurularak, transfer fonksiyonu kapalı döngü denkleminde göre tekrardan yazılırsa:

$$T(s) = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} \quad (18)$$

klasik gösterimi sağlanabilir. Denklem 18 tekrardan düzenlenirse:

$$C(s) = \frac{T(s)}{(1 - T(s))P(s)} \quad (19)$$

olarak gösterilebilir. 19. denklem içerisinde $T(s)$ ve $P(s)$ yerlerine konulursa ve gerçek deneylerden elde edilen Çizelge 2.2.'deki parametreler de denklemde yerine yerleştirilirse, her bir balık için davranışsal denetleyici elde edilir. Sonuç olarak sanal balıklar için gereken lokomotor sistemler $P_1(s)$, $P_2(s)$, $P_3(s)$ ve davranışsal denetleyiciler $C_1(s)$, $C_2(s)$ ve $C_3(s)$ elde edilmiş olur.

MATLAB Simulink ortamında kurulan yapıda, kapalı döngü geri beslemeli yapı, Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Geri beslemeye eklenen çarpan bloğu içerisinde ise kazanç

katsayıları konularak davranışsal değişkenlik analizi yapılmıştır. Sonuçta denetleyici ve sistemlerin denklemleri aşağıdaki gibidir. Birinci balık için denetleyici ve sistem eldesi aşağıdadır:

$$C_1(s) = \frac{-16.6794s}{(24.5788s^2 + 9.7831)} \quad (20)$$

$$P_1(s) = \frac{0.3228}{0.0025s^2 + 0.0417s} \quad (21)$$

İkinci balık için denetleyici ve sistem denklemleri şu şekildedir:

$$C_2(s) = \frac{-7.4333s}{(27.3675s^2 + 8.8161)} \quad (22)$$

$$P_2(s) = \frac{0.22}{0.0025s^2 + 0.0186s} \quad (23)$$

Aynı şekilde 3.balık için hesaplamalar yapılırsa aşağıdaki ifadeler elde edilir:

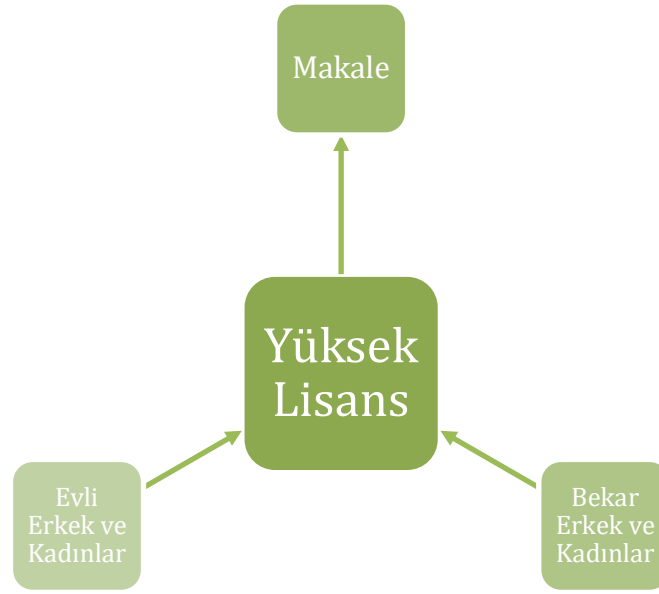
$$C_3(s) = \frac{-8.7161}{16.8346s^2 + 12.9931} \quad (24)$$

$$P_3(s) = \frac{0.1622}{0.0025s^2 + 0.0218s} \quad (25)$$

2.5. Değişkenliği etkileyen faktörlerin ANOVA ile analizi

ANOVA (*analysis of variance*) bir tür varyans analizi olup, belirlenen bağımsız değişkenlerin kendi aralarında nasıl etkileşime girdiklerini ve bu etkileşimlerin bağımlı değişkenler üzerindeki etkisini incelemeye yarayan bir metottur. ANOVA, tanımlanan bir veya birkaç grup için, her bir grup içinde ya da gruplar arasında, üzerinde durulmak istenen bir veya birden çok özellik açısından, deney birimleri arasında gözlenen farkların oluşmasının ne kadarı araştırılan faktörden ne kadarı uygulama kaynaklı farklardan ve ne kadarı da tesadüfen oluşmaktadır sorusunu, herkes tarafından kabul edilen sınırlar ile belirlemeye yarayan analizdir. Tanımda belirtilen üzerinde değerlendirilme yapılacak olan gruplar bağımlı değişkenleri, bu grupların üzerinde etkisi araştırılan faktörler ise bağımsız değişkenleri temsil etmektedir. Yapılan varyans yaklaşımında, verilerin ve hata terimlerinin dağılımının normal, varyansların homojen ve sonucu değiştiren faktörlerin etkilerinin toplanabilir olduğu kabul edilir.

Tek yönlü ANOVA tek bir faktörün, ki buna bağımsız değişken denir, diğer bağımlı bileşenler üzerindeki etkisinin incelenmesini ele alır. Bu analizde iki temel varsayım söz konusudur. Bunlardan ilki verilerin *normal dağılması* ve diğeri ise *H0 hipotezi*, yani “*verilerin dağılımı homojendir*” yaklaşımıdır. Önemlilik derecesi, belirlenen değerden ($p=0.05$) yukarıda ise homojenite ön kuralı geçerli olup ilgili parametrenin sonuca olan etkisi istatistiksel açıdan önemsizdir denmektedir.



Şekil 2.6. Farklı iki gruptaki bireylerin makale yazma oranına yüksek lisans yapmanın etkisinin gösterildiği ANOVA analizinin öbek şeması.

Örneğin evli erkek ve kadınların bulunduğu bir grup ile bekar erkek ve kadınların bulunduğu başka bir grubun makale yazma oranlarında bireylerin lisansüstü eğitim durumlarının etkisi araştırılmak istensin. Burada ANOVA analizi yapılarak lisansüstü eğitim durumunun farklı gruplarda makale yazımdaki etkisinin istatistiksel açıdan önemli derecede olup olmadığı incelenebilir. Sonuç olarak yüksek lisans eğitimi evli ya da bekar erkek ve kadınlar açısından makale yazmak için istatistiksel olarak önemli ya da önemsizdir çıkarımını yapmak mümkün olacaktır.

“*Çok yönlü Varyans Analizi*”, diğer bir adıyla “*Çok yönlü ANOVA*”, kısaca “*MANOVA*” iki veya daha fazla kategorisel değişkene bağlı olan sonuç değişkeninin nasıl

hesaplandığını gösteren istatistiksel metottur. Temelde dört farklı yaklaşıma sahiptir. Bunlardan ilki, “sonuç değişkeninden bağımsız olarak kategorisel değişkenler rastgele seçilir” şeklinde tanımlanabilir. İkinci yaklaşım, “verilen her kategorisel grup içerisindeki her bir gözlemlenen grup diğer gruplardan bağımsızdır” denebilir. Üçüncü yaklaşım içinse, “sonuç değişkeninin varyans miktarı oluşabilecek bütün kategorisel değişkenlerle aynı olmalıdır (*varyansın homojenitesi*)” denmektedir. Sonuncu varsayım, “sonuç değişkeninin dağılımında örnekleme sayısı yeterince çok olmalıdır” şeklinde tanımlanmaktadır (*Merkezi Limit Teoremi*) [31].

ANOVA analizi formülasyonu belirlenmiş bir analiz metodu olup kullanıcılara paket programlar aracılığı ile sunulmaktadır. Yapılan çalışmalarda IBM firmasının *SPSS Statistics 20* yazılımı kullanılmıştır, ancak farklı programları da aynı analizi gerçekleştirebilmektedirler. Paket programın farklı birçok analizi yeteneği bulunmakla beraber bu çalışmada “genel doğrusal model” (*general linear model*) seçilmiş olup “tek değişkenli analiz” (*univariate analysis*) metodu ile çalışılmıştır. Tek değişkenli analizde yalnızca bir adet bağımlı değişken ve birden çok bağımsız değişken seçilebilir. Ayrıca bağımsız değişkenler sabit bağımsız değişken, rastgele bağımsız değişken ve eş değişken faktör olarak seçilebilir. Bu çalışmada bütün bağımsız değişkenler sabit bağımsız değişken olarak seçilmiştir. Eğer ki araştırılmak istenen bağımlı değişken sayısı birden çok ise “çok değişkenli analiz” (*multivariate analysis*) seçilebilir.

ANOVA, değişkenlik çıktısına etkileyen çevresel faktörlerin hangisinin sonuca istatistiksel etkisinin diğerine oranla daha yüksek ya da düşük olduğunu belirlemeye yarayan metottur. Yapılan deneylerde kontrollü değiştirilen çevresel faktörlerin, performans kriteri olan değişkenliği ne kadar etkilediği ANOVA analizi yapılarak bulunabilmektedir. Etkisi araştırılmak istenen iki veya daha fazla bağımsız değişkenin devreye girmesi ile çok yönlü analiz yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında ilk veri kümesi için dört farklı kategorisel koşulun davranışsal değişkenlik üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bağımlı değişken, davranışsal değişkenliği ifade eden metrik çıktısı olup bağımsız değişkenler pencere, aydınlatma, sığınak uzunluğu ve uyarıcı frekanstır. Pencerenin var ya da yok olmasının etkisi, aydınlatmanın olup olmamasının etkisi, sığınak uzunluğunun dört farklı boyda olup her birinin çıktıya etkisi ve frekansın sürekli fonksiyon parametresi olarak çıktıya etkisi incelenmiştir. Sonuçta “önemlilik derecesi” 0.05’den ne kadar küçük olursa, bağımlı değişkene yani davranışsal değişkenlik metriğinin değişimine olan istatistiksel etkisi o kadar büyüktür. Önemlilik derecesi “*p*”

ile gösterilir ve $p < 0.05$ ise var olan farklılık anlamlıdır ve H_0 hipotezi geçerlidir. Bu durumda, grupların varyansları homojendir, verilerin %95'i normal dağılımlıdır. Eğer $p > 0.05$ ise farklılık anlamsızdır ve H_0 hipotezi geçerli değildir. Bu durumda ise grupların varyansları homojen değildir H_1 hipotezi geçerlidir, yani verilerin %95'i normal dağılımlı değildir.

Yapılan analizin raporlamasında ilgili faktörün sonuca istatistiksel etkisinin önemliliği $F(x,y)=a$ değeri ile ve önemlilik derecesini $p=\alpha$ ile gösterilir. Sonuçlar kısmında her çevresel faktör için bu raporlama sunulmuştur. Verilen x değeri grup içerisinde mevcut olan serbestlik derecesidir, yani ilgili parametrenin değişebileceği “en fazla farklı koşul” ihtimalidir. Örneğin aydınlatma durumunda ışık var ve yok için iki ihtimal oluşur ve doğal olarak aydınlatma parametresinin serbestlik derecesi 1'dir. Aydınlıktan karanlığa ya da karanlıktan aydınlığa yalnızca iki parametre arasında geçiş var iken sığınak uzunluğunun serbestlik derecesi ise 3'tür. Verilen ifadede y değeri gruplar arasında toplam durumların serbestlik derecesini temsil eder.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölüme kadar çevresel faktörlere bağlı olarak algısal geri bildirim sinyallerinin belirginliğinin ve çeşitliliğinin balığın davranışsal değişkenliği üzerindeki rolünü ortaya çıkaracak gerekli materyaller ve kullanılacak teknikler aktarılmıştır. Bu bağlamda farklı deneysel koşullar için ilgili teknikler kullanılarak davranışsal değişkenlik hesaplanmış ve kapsamlı bir karşılaştırma yapılmıştır. Buna ek olarak algısal belirginlik durumundan bağımsız bir şekilde balığın aldığı algısal geri bildirim sinyalleri bir sanal gerçeklik ortamı aracılığıyla güçlendirilmiş veya zayıflatılmıştır. Elde edilen bulguların teorik altyapılarının da irdelenebilmesi amacıyla benzetim ortamında hesaplamalı analizlerle ilgili yaklaşımlar doğrulanmıştır. Tüm bu deneylerin detayları, nasıl yapıldığı, verilerin nasıl işlendiği ve sergilendiği önceki bölümde anlatılmıştır. Burada ise bu deneylerin sonuçları detaylıca irdelenecektir.

Sunulan tez iki farklı deney kurgusu ve doğrulama amaçlı yapılan benzetim çalışmalarının bilgilerini içermektedir. Bu bölümde iki farklı deney düzeneğinin sonuçları farklı alt başlıklarda incelenecek, son bölümde ise daha önce de bahsedilen ‘değişkenliğin geri beslemeye olan duyarlılığı’ hakkında yapılan çıkarımlar anlatılacaktır.

3.1. Algısal Geri Bildirimden Sağlanan Bilgilerin Belirginliği ve Çeşitliliğinin Davranışsal Değişkenlik Üzerindeki Rolü

Eigenmannia virescens sığınak takibi davranışı sırasında çeşitli duyu organları tarafından algıladığı algısal geri bildirim sinyallerini kullanarak davranışsal hareketlerini gerçekleştirmektedir. Biz bu noktada balığın iki temel algısal sistemi olan görsel ve elektro-algılama geri bildirimleri üzerinde değişimler yaparak algısal geri bildirimlerin belirginliğinin ve çeşitliliğinin davranışsal değişkenlik üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmaya çalışmaktayız. Bu veri kümesinde taranan algısal belirginlik parametreleri aşağıdaki çizelgede detaylı olarak gösterilmiştir.

Koşul	Durum
Aydınlatma	Aydınlık
	Karanlık
Pencere	Var
	Yok
Sığınak Uzunluğu	7.5 cm
	11.25 cm
	15 cm
	22.5 cm
Uyarıcı Frekansı	0.1 Hz
	0.55 Hz
	1.15 Hz

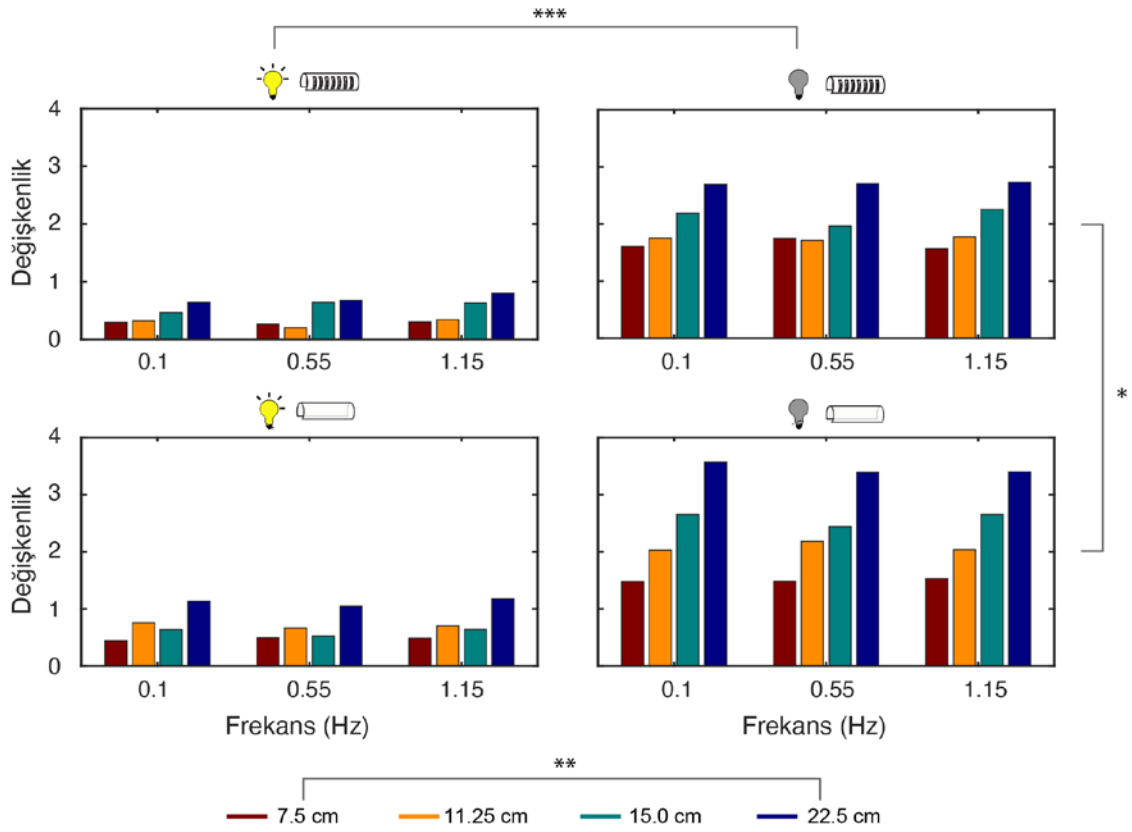


Toplamda 48 kategorisel çevresel faktör ihtimali mevcuttur.

Çizelge 3.1 Birinci deney düzeneğinde koşulların gösterimi

Balıklara ait tüm deney sonuçları algısal koşullara göre kategorize edilmiş ve etiketlenmiştir. Burada yapılan kümeleme, seçilen koşullara uygun olarak kıyaslanabilir biçimdedir, zira her koşul için oldukça benzer sayıda deney yer almaktadır. Her algısal koşul için ilişkili deneyler ve bunlara bağlı farklı değişkenlik çıktıları daha önceki bölümde anlatılan metrik yazılımı sonucunda elde edilmiştir. Elde edilen tüm bu sonuçların daha iyi yorumlanabilmesi adına ve algısal koşulların balığın değişkenliği üzerindeki etkilerini daha iyi araştırabilmek için varyans hesaplama temelli bir analiz metodu olan “Çok Yönlü ANOVA” kullanılmıştır. Metrik cinsinden değişkenlik çıktısının değişen çevresel faktörlere göre gösteriminin sağlandığı Şekil 3.1. incelenebilir.

Burada aynı zamanda çok yönlü ANOVA’nın da gösteriminde istatistiksel önemlilik derecesinin gösterimi resim üzerindeki yıldızlar ile sağlanmıştır. Yıldız sayısının artması, değişkenlik çıktısına olan etkisinin diğer parametrelere göre daha fazla olduğu anlamına gelir.



Şekil 3.1. Balığın davranışsal değişkenliğinin değişen çevresel faktörlere göre, kategorisel olarak gösteriminin sağlandığı histogram

Şekil 3.1. içerisinde sunulan yıldızlar ile istatistiksel önemlilik dereceleri anlaşılmıştır: *** $p < 10^{-30}$ aydınlatmanın, ** $p < 10^{-20}$ sığınak uzunluğunun, * $p < 10^{-10}$ ise pencere durumunun değişkenlik çıktısının üzerindeki etkisinin gücünü temsil eder. Yıldız sayısı arttıkça ilgili parametrenin değişkenlik çıktısının değişimine olan direkt etkisi de artmaktadır. Burada doğrusal eyleyicinin uyarıcı frekansı, yani sığınak hareket frekansının önemlilik derecesi yeterli seviyede değildir. Diğer bir deyişle değişen uyarıcı frekansının balık hareketindeki değişkenlik üzerinde etkisi istatistiksel açıdan önemli bir seviyede değildir.

Şekil 3.1.'de balığın davranışsal değişkenliği, algısal geri beslemenin belirginliği ve çeşitliliğine bağlıdır. Aydınlatma durumu ve sığınak penceresinin mevcudiyeti küçük ikonlar ile gösterilirken sığınak uzunluğu farklı renkler kullanılarak gösterilmiştir. Frekans değişimi x ekseninde ve değişkenlik metrik çıktısı y ekseninde gösterilmiştir.

Yapılan ANOVA analizi net bir şekilde göstermektedir ki, davranışsal değişkenlik üzerindeki en önemli parametre aydınlatmadır, [$F_{(1,48)}=5003$, $p=9.93 \times 10^{-37}$]. Başka bir deyişle, görsel geri beslemenin varlığı ve yokluğu davranışsal değişkenlik üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Ayrıca görsel sonuçlarda açıkça görülebilmektedir ki karanlık koşullardaki değişkenlik oranı aydınlık koşullara göre önemli ölçüde yüksektir. Bunlara ek olarak şöyle bir çıkarım yapılabilir: balık hem görsel hem de elektro-algılama geri bildirimlerini kullanırken, yalnızca elektro-algılama geri bildirimlerini kullandığı koşula kıyasla çok daha tutarlı davranışlar sergileyebilmektedir. Bu kategorik değişimi tetikleyen temel faktör ise ortamda ışığın bulunup bulunmamasıdır.

Değişkenlik metrik çıktısından da görüleceği üzere, davranışsal değişkenliğin en önemli ikinci faktörü sığınak uzunluğudur [$F_{(3,48)}=360$, $p=9.69 \times 10^{-25}$]. Tüm algısal belirginlik koşullarında, sığınak uzunluğu arttıkça değişkenlik hemen hemen düzenli formda artmaktadır. Sığınak boyunun değişkenlik üzerindeki etkisinin istatistiksel önemlilik derecesinin bu kadar büyük olmasının nedeni, sığınak boyu kısaldıkça balığın görsel ve elektro-algılama açısından daha rahat çevre algılaması yapmasıyla birlikte, bulunduğu konumu algılaması ve daha tutarlı davranışlar sergilemesidir.

Deneylerde sığınak duvarındaki pencerenin varlığı ya da yokluğunun davranışsal değişkenlik üzerindeki etkisi, önemlilik derecesi yüksek bir diğer parametredir [$F_{(1,48)}=170$, $p=2.21 \times 10^{-14}$]. Pencerenin varlığı hem görsel açıdan hem de elektro algılama sinyalleri bakımından önemli bir belirginlik sağlar. Balık aydınlık ön koşulunda pencerenin varlığında, yokluğuna oranla daha iyi görsel bilgi edinirken, ışığın varlığı ya da yokluğu durumunda pencerenin olması çok daha fazla elektro-algılama modülasyonu sağlar ve daha iyi bir takip performansı gösterir. Şu ana kadar yapılan ANOVA analizlerinde frekans parametresi eklenmeyerek yalnızca sığınak uzunluğu, sığınak penceresi ve aydınlatma durumu için hesaplamalar yapıldı. Bunun amacı, elde edilen değerlerin çözünürlüğünün ve doğruluğunun yüksek olmasıdır.

Son olarak ise sığınak hareketinin uyarıcı frekansının değişiminin balık takip performansındaki değişkenliğinin üzerindeki etkisi de incelenmiştir [$F_{(1,144)}=0.732$, $p=0.399$]. Yapılan bu analize frekans parametresi de eklenerek diğer koşulların çözünürlüğü azalsa da frekans faktörünün önemlilik derecesi incelenmiştir. Görüldüğü üzere ANOVA analizi, frekans değişiminin balık davranışsal değişkenliği üzerinde istatistiksel açıdan önemli bir etkisinin olmadığını ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca Şekil

3.1.'de da verilen histogramda, değişkenlik çıktılarının frekansa göre değişimi ANOVA analizini desteklemektedir.

Yapılan tüm bu analizlere ek olarak balık davranışsal değişkenliğinde algısal belirginlik koşullarının birbirleri üzerindeki etkileşimleri de analiz edildi. Burada amaç farklı parametrelerin davranışsal değişkenlik üzerindeki etkisinin birbirilerine bağlı olarak değişip değişmediğinin ortaya çıkartılmasıdır. Görüldü ki sığınak uzunluğunun değişimi ile beraber aydınlatma koşulunun değişimi [$F_{(3,144)}=85.8, p=2.18 \times 10^{-15}$] ya da sığınak pencere durumunun değişimi [$F_{(3,144)}=25.8, p=1.33 \times 10^{-8}$] davranışsal değişkenlik üzerinde etkili en önemli kombinasyonlardır. Kısacası sığınak uzunluğunun davranışsal değişkenlik üzerindeki etkisi ışık ve pencere durumuna bağlı olarak değişmektedir. Fakat bununla beraber, pencere ve ışığın ikili kombinasyonu davranışsal değişkenlik üzerinde önemli bir etkiye neden olmamıştır [$F_{(1,144)}=3.33, p=0.77$]. Bu durum da pencerelerin varlığı ya da yokluğu ışığın varlığı ya da yokluğundan bağımsız olarak davranışsal değişkenlik üzerinde etkilidir şeklinde yorumlanabilir. Yukarıda içeriği anlatılan ANOVA analiz raporu Ek 1.1.'de bulunmaktadır.

Genel olarak sonuçlarımız göstermektedir ki çevreden algılanan algısal geri beslemenin çeşitliliği ve belirginliği davranışsal değişkenlik üzerinde kritik bir rol oynamaktadır. Deneylerde görüldüğü üzere veri kümelerindeki çevresel faktörler kullanılarak algısal bilgilerin farklı özellikleri sistematik bir şekilde değiştirilmektedir. En önemli parametre ortam aydınlatmasının varlığı ya da yokluğudur. Aydınlik ortamda balıklar çevrelerini algılamak için hem elektro-algılama hem de görsel bilgiyi birleştirir, ancak ağırlıkta olarak görsel besleme kritiktir [26]. Fakat karanlıkta görsel bilgi ortadan kalkar, bu nedenle balık hareketleri temel geri besleme olarak elektro-algılama bilgiye bağlıdır. Elektro-algılama geri besleme, görsel bilgiye kıyasla kalite ve menzil açısından oldukça limitlidir [28]. Neticede ışığın yokluğu sert bir şekilde algısal geri beslemenin belirginliği ve çeşitliliğini azaltırken, balık davranışsal değişkenliğini arttırmaktadır.

Davranışsal değişkenlik açısından bir diğer önemli parametre ise balığın içerisinde yüzdüğü sığınanın boyudur. Deneylerde kullanılan balıkların boyları ortalama 8-12 cm arasındadır. Bu boy aralığı balıklarda elektro-algılama sistemi için sığınak kenarını algılama açısından en iyi kurgudur. Daha önceki çalışmalarda balığın sığınak kenarlarına yakın yüzdüğü gösterilmiştir [27]. Sığınak boyu uzadıkça balık sığınanın kenarlarından merkeze doğru kaymaktadır ve bu da balığın sığınak içerisinde konumunu tahmin etmesini oldukça zorlaştırmaktadır. Bununla beraber sığınak içerisinde güvenli

bölgede kalma içgüdüğü uzun sığınaklarda balığın kendini güvende hissetmesine, dolayısı ile sığınak hareketini önemsememesine de yol açmaktadır. Neticede sığınak boyu uzatıldıkça balığın algısal belirginliği ve buna olan ihtiyacı, sonuçta ise sığınak hareket performansı azalmaktadır. Balığın uzun sığınakta yapmaya çalıştığı bu zayıf konum tahmini doğal olarak davranışsal değişkenliği de arttırmaktadır [34].

Önem sırasında üçüncü sırada olan faktör, sığınak duvarında pencere olup olmadığıdır. Görsel geri besleme açısından, pencerenin olması balığın konum tahmini yapmasını pozitif yönde etkilemektedir. Bununla birlikte, sığınak duvarında pencere olmaması, balığa konumunun tahmini açısından daha zor bir koşul oluşturur. Elektroalgılama sistemi göz önüne alındığında, balık çevresini algılamak için elektriksel alan üretir ve bu alanın genlik ve fazında modülasyon yapar. İşte pencerenin varlığı bu modülasyona artı yönde katkı sağlayarak balığa konum tahmininde yardımcı olmaktadır. Neticede pencerenin var olduğu durum, ışık varken ve yokken de pencerenin olmadığı duruma görece daha az değişkenliğe sahiptir.

Teorik olarak, yukarıda bahsedilen bütün algı parametreleri balıklardaki algısal belirginlik ve çeşitliliğin bileşenleridir. Balık, sığınak içerisinde konumunun tahmini için, başka bir deyişle durum kestirimi yapabilmek için yoğun bir şekilde bu bilgileri kullanır. Böylece, yüksek kaliteli algısal bilgi mevcudiyeti balığın gözlenebilirliğine katkı sağlar. Bu bağlamda, doğru konum tahmini yapabilen balık, gürbüz davranışsal çıktılarını üretmek için hareketlerini daha iyi optimize eder [32].

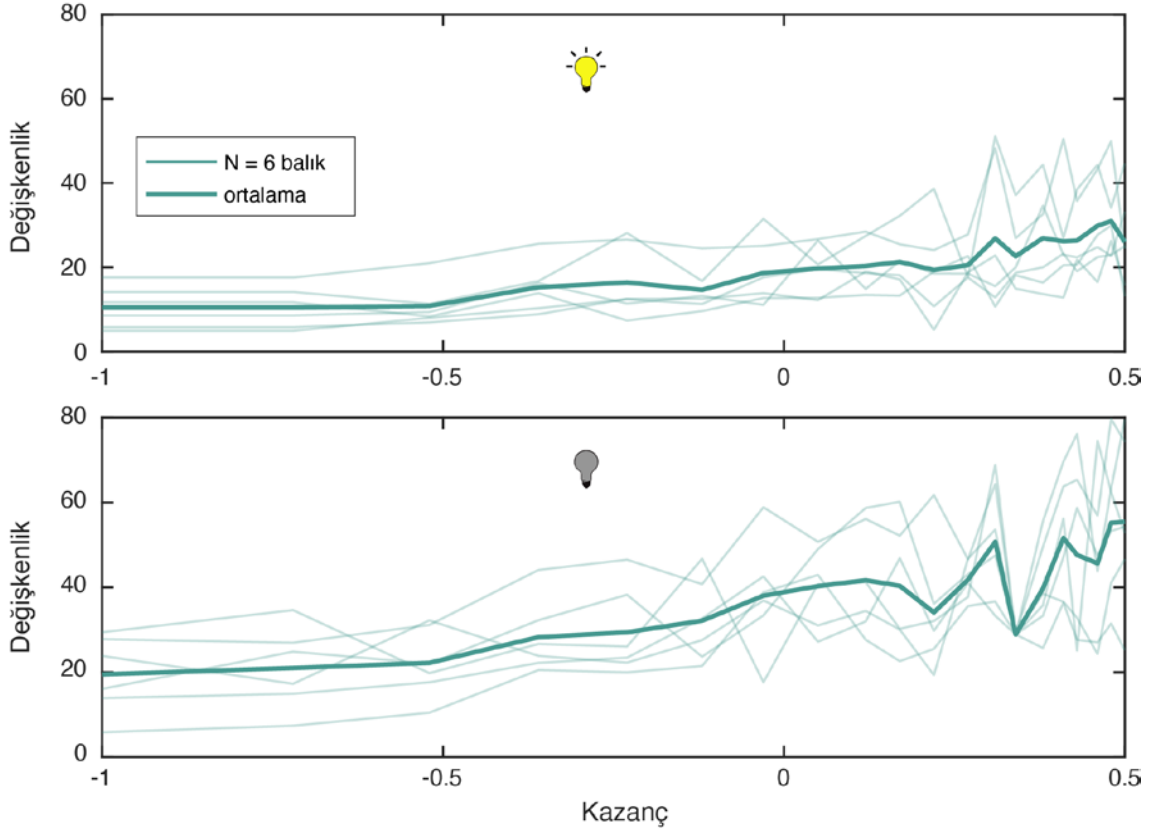
Sığınak hareketinin uyarıcı frekansının değişiminin, algısal bilginin belirginliği ve çeşitliliğine olan direkt bir etkisi yoktur. Bu nedenle, tıpkı beklediğimiz gibi sığınak hareketinin frekansının değişiminin davranışsal değişkenlik üzerinde bir etkisi olmadığı gözlenmiştir. Burada seçilen frekans aralığı balığın sığınak takibi performansının tepkisi için balığın frekans tepki aralığına uymaktadır. Tahmin edileceği üzere frekansın çok daha fazla artırılması sonucunda davranışsal değişkenliğin de artabileceği öngörülmektedir. Bu çalışmada incelenen deneylerde farklı frekanslar arasında oluşan küçük değişkenlik farklılıkları, balığın algısal reseptörlerinin frekans tepkilerinde var olabilecek değişikliklerden kaynaklanıyor olabilir, bunun daha derinlemesine araştırılması için frekans temelli daha yoğun süreçler gerekmektedir.

3.2. Algısal Geri Beslemenin Güçlendirilmesi/Zayıflatılması

Bu bölüm algısal belirginlikten tamamen bağımsız olarak çevreden algılanan algısal geri besleme sinyallerinin direkt olarak güçlendirilip zayıflatılması sonucunda ortaya çıkan etkileri incelemektedir. Daha önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere, kazanç katsayısı ayarlanabilen sanal gerçeklik deney düzeneği ile, balığın kendi hareketinin algısal sonucu direkt olarak modüle edilebilmektedir [33]. Bu yapıyla ilgili geri besleme kontrol modeli Şekil 1.4.A'da verilmiştir. Balık hareketi ölçülerek sığınak hareketine gerçek zamanlı ve çevrim içi olarak ikincil bir geri besleme sağlamaktadır. Yapılan bu modülasyon, kendi hareketine bağlı olan yeniden revize edilmiş yeni bir geri beslemeli kontrol modeli sunar ki o da Şekil 2.3.'de gösterilmiştir. İşte bu modifiye edilmiş model, ayarlanabilir kontrol parametresi γ ile balık tarafından algılanan görsel geri besleme sinyallerinin nasıl modüle edileceğini, güçlendirilip zayıflatılabileceğini ve sığınak uyarıcı hareketine eklenebileceğini göstermektedir. Bu veri kümesi ve deney düzeneği ile ilgili daha detaylı bilgi Bölüm 2.2'de ya da 2018 yılında Biswas ve arkadaşları çalışmasında bulunabilir [33].

Aynı deneysel koşullar altında, her bir deneme en az üç kere, 6 farklı balığın her biri için tekrar edilmiş ve davranışsal değişkenlik hesaplanmıştır. Veri kümesi, aydınlık ve karanlık koşullarının her biri için 20 farklı geri besleme kazanç değerinde deneyleri içermektedir. Şekil 3.2'de ayrı ayrı olarak hem aydınlık hem de karanlık koşullar altında 20 farklı kazanç değeri -1'de 0.5'e kadar değiştirilerek davranışsal değişkenlik sonuçları, balıkların her biri için ayrı ayrı en az 3 tekrar ile hesaplanmış ve grafikte çizdirilmiştir. Şekil 3.2'de her bir balığın davranışsal değişkenlik eğrisi yarı saydam-açık renkte çizdirilirken 6 balığın ortalamasının değişkenliği kalın çizgi ile gösterilmiştir.

γ kazanç değeri değiştirilerek balığın kendi hareketine bağlı olarak görsel geri beslemesi değiştirilir, bunun sonucunda davranışsal değişkenlik farklılıkları ortaya çıkar. $\gamma=0$ durumunda, balık geri beslemesinde herhangi bir manipülasyon yoktur, balığın orijinal geri beslemesi sonucunda sağladığı değişkenlik gözlemlenebilir. Ancak, algısal geri besleme, $\gamma=-1$ 'e doğru gittikçe güçlendirilirken, $\gamma=+0.5$ 'e doğru gittikçe zayıflar. Şekil 3.2'de açıkça görülmektedir ki, geri besleme sinyali güçlendirildikçe davranışsal değişkenlik azalmakta ve geri besleme zayıflatıldıkça da davranışsal değişkenlik artmaktadır. Ayrıca yine gözlemlenebilir ki, tüm kazanç değerleri için karanlık koşul aydınlığa göre daha yüksek metrikli değişkenlik eğrisine sahiptir.



Şekil 3.2. Pencere ve 11.1 cm uzunluğundaki sığınakta yapılan deneylerde γ kazanç değeri değiştirilerek manipüle edilen geri besleme sonucunda balığın aydınlık ve karanlık koşullar altında 20 farklı kazanç değeri için ortaya çıkan değişkenlik eğrisi.

Sonuçlar göstermektedir ki, kazanç değeri -1'den +0.5'e doğru gittikçe, yani balığın görsel geri beslemesi zayıflatılmış durumdan güçlendirilmiş duruma doğru gittikçe, hareket performansında görülen davranışsal değişkenlik miktarı azalmaktadır. Hem aydınlık hem de karanlık koşullar altında değişkenlik eğrilerinin eğilimleri birbirine benzerlik göstermektedir, ancak aydınlatma durumu metrik açısından ciddi farklılıklara yol açar. Sezgisel beklentiye ve daha önceki bölümlerde yapılan çıkarımlara paralel olarak burada görülmelidir ki aydınlık koşullarda değişkenlik miktarı karanlık koşullara nazaran azdır. Ayrıca görülmektedir ki benzetim ortamından ve gerçek dünyadan alınan verilerden hesaplanan değişkenlik metriklerinin kıyası yapıldığında değişkenliklerin genlikleri açısından farklılıklar mevcuttur. Bu farklılıkların sebebi, gerçek dünyadaki gürültü miktarı ile benzetim ortamına sağlanan yapay gürültü arasındaki farktır.

Bu bölümde ayrıca, değişkenlik faktörlerinin sonuca istatistiksel etkisini ölçmek için “iki yönlü ANOVA” analizi yapılmıştır. Bu kısımda da sonuçlar berrak bir şekilde aydınlatmanın değişkenlik üzerindeki etkisinin önemli olduğunu sunmaktadır [$F_{(1,200)}=142, p=4.13 \times 10^{-25}$]. Bu sonuç ile beraber bir önceki bölümde yapılan analiz de böylelikle doğrulanmış olur. Benzer şekilde kazanç değerinin değişimi de değişkenlik çıktısına önemli derecede etki eder [$F_{(19,200)}=6.67, p=2.22 \times 10^{-13}$]. Son olarak bu iki kategorisel parametrenin etkileşiminin değişkenlik sonucuna olan etkisi analiz edilmiştir [$F_{(19,200)}=0.86, p=0.63$], ancak etkisinin istatistiksel olarak önemli olmadığı tespit edilmiştir. Bu da her iki kategorisel parametrenin de bağımsız olarak davranışsal değişkenlik sonucuna önemli derecede etkideğini gösterir.

Günümüz teknolojisi ile artık çevreden algılanan geri beslemenin manipülasyonu için gerekli olan sanal gerçeklik kurulumlarının tasarlanması zor değildir. Bu konuda Biswas ve arkadaşlarının geliştirmiş olduğu kapalı döngü sanal gerçeklik test kurulumu ile algısal geri beslemeleri modüle edilen *Eigenmannia virescens* balıklarının nasıl aktif algısal takip deneylerini gerçekleştirdiği araştırılmıştır. Burada algısal geri beslemenin modülasyonunun davranışsal değişkenliği nasıl etkilediğini araştırmak için bu çalışmanın veri kümeleri kullanıldığı daha önceleri de belirtilmiştir.

Sonuçlar açıkça göstermektedir ki algısal geri beslemeyi modüle etmeye yarayan kazancın değişiminin davranışsal değişkenlik üzerinde kritik bir rolü vardır. Balıkların, kendi hareketlerinin güçlendirildiği ($\gamma < 0$) durum deneylerinde daha tutarlı davranışsal tepkiler ürettikleri görülmektedir. Aynı mantık ile tersi durumda ($\gamma > 0$) ise algısal geri besleme zayıflatılınca davranışsal değişkenlik hızla artmaktadır.

Algısal geri beslemenin güçlendirilmesi, balığın bulunduğu konumu algılaması ve tahmin etmesi açısından katkı sağlamaktadır. Örneğin $\gamma = -1$ için balık 1 cm ileri giderken sığmak 1 cm geriye gitmektedir, yani balık için algısal bilgi çevreden algıladığından daha güçlüdür. Bir diğer tabir ile $\gamma < 0$ durumlarında balığa aynı miktarda hareketten daha güçlü geri besleme verilmiş olur. Bu yapı negatif geri besleme sistemlerinin iyi bilinen bir özelliğidir. Farklı bir bakış açısı ile yorumlanırsa, benzer miktarda algısal bilginin toplanması gerektiği durumlarda bu bilgi, normalden daha hızlı toplanır ve bu sayede balık daha tutarlı hareket komutları üretir, böylelikle hareket değişkenliği azaltılmış olur.

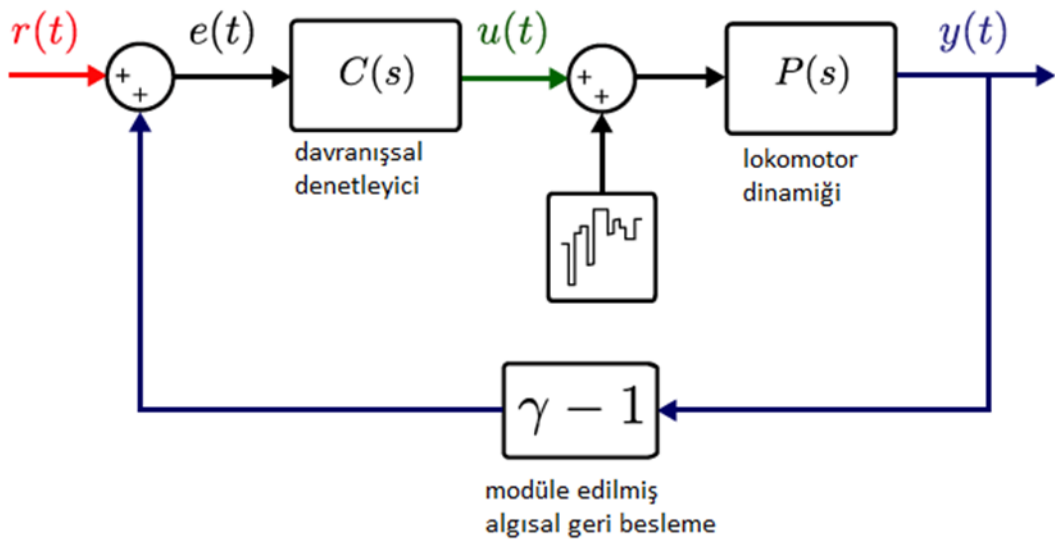
Bu deneyde elde ettiğimiz bir diğer önemli sonuç, geri besleme kazanç değişkeni ve aydınlatma koşulunun, davranışsal değişkenliğe etkisi açısından birbirinden bağımsız

olmalarıdır. Açıkçası çevreden algılanan bilginin güçlenip zayıflamasının mevcut geri besleme bilgisinin varlığını ya da yokluğunu modüle etmediği anlaşılmaktadır, yani algısal besleme bilgisinin güçlendirilip zayıflatılması, onun çeşitliliğini etkilemez. Dahası, kapalı döngü kazanç değerinin değişimi, algısal bilginin belirginlik ve çeşitliliğinin modülasyonu yerine onun direkt olarak miktarını değiştirmektedir, yani mevcut olan hareketten algılanan algısal bilginin miktarını değiştirmektedir.

3.3. Geri Beslemeli Kontrol Sistemlerinin Değişkenliğinin Algısal Geri Beslemeye Duyarlılığı

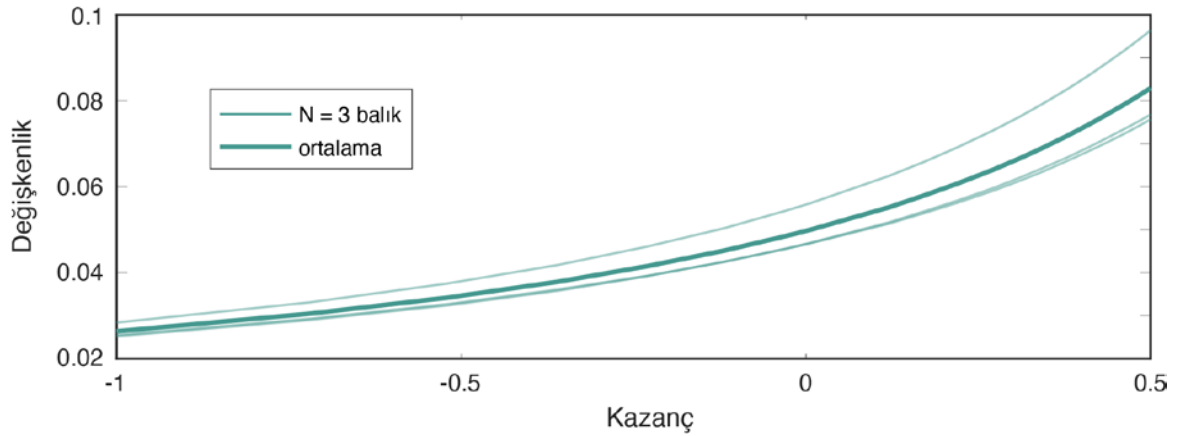
3.3.1 Benzetim Ortamında Algısal Geri Beslemenin Güçlendirilip Zayıflatılmasının Davranışsal Değişkenlik Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere, elde edilen sonuçlar net bir şekilde göstermektedir ki, algısal geri beslemelerin belirginliği ve çeşitliliği balığın davranışsal değişkenliğinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu bölümde bunun biyolojik sistemlerde tamamen bilinmeyen bir fenomen olmasından ziyade, geri beslemeli kontrol sistemlerinin doğal bir özelliği olduğunu göstermek için hesaplamalı balık modelleri kullanılarak benzetim çalışmaları yürütülmüştür. Bu analizi yapabilmek için Şekil 3.3’de verilen kapalı döngü öbek şemadan yararlanılarak MATLAB Simulink ortamında benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3. Hesaba dayalı balık modelinin sanal olarak sığınak takibi deneyinde kullanılan kapalı döngü öbek şeması.

Bireyden bireye var olan değişkenliğin benzetimi için beyaz gürültü bloğu kontrol girişine eklenmiştir. Şekil 3.3’de gösterilen kapalı döngü sistem, bir önceki bölümde anlatılan gerçek deney verileri ile yapılan deneyin hesaplamalı olarak benzetimidir. Modüle edilen geri besleme katsayısı benzetim ortamında kontrollü olarak bir önceki deney düzeneğine uygun şekilde ayarlanmıştır (Bkz. Çizelge 3.1). Ek olarak yer alan ve gücü 0.0005 ve örnekleme zamanı 0.04 saniye olan *bant limitli beyaz gürültü*, bireyler arası ve deneyler arası rastgele değişkenliğin benzetimidir. Bu sayede denemeler arasında farklılıklar oluşturulmaktadır. Aksi halde benzetim ortamındaki her deneme aynı sonucu verecektir. Burada Çizelge 3.1. parametrelerinden elde edilen lokomotor dinamikleri ve denetleyicileri kullanılarak benzetim yazılımı koşturulmuştur. Daha önceden de bahsedildiği üzere bu parametreler Uyanık ve arkadaşları tarafından yürütölen araştırmada üç farklı gerçek balıktan alınan sistem tanıyımı çalışmasından elde edilen parametrelerdir.



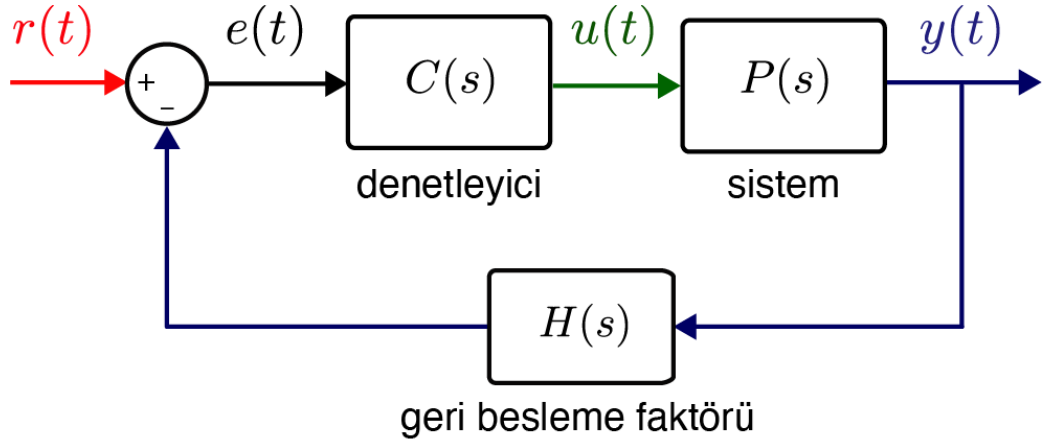
Şekil 3.4. Hesaplamalı balık modellerinin gözlemlenen değişkenlik çıktısı

Şekil 3.4’de göröldüğü üzere sonuçlar, geri beslemenin davranışsal değişkenlik üzerindeki etkisinin gerçekten de kapalı döngü geri beslemeli denetim sistemlerine ait bir özellik olduğunu göstermektedir. Deneysel bulgulara benzer şekilde, benzetim çalışmalarının sonuçları da göstermektedir ki, algısal geri besleme doğal haline göre güçlendirildiğinde değişkenlik azalmaktadır, tersine zayıflatılan geri besleme de yüksek değişkenliğin nedenidir. Sonuçta burada kurgulanan bu basit geri beslemeli kontrol sistemi modelinden elde edilenler açıkça göstermektedir ki davranışsal değişkenliğin üzerinde algısal geri beslemenin önemi yadsınamaz derecede kritik ve önemlidir, bu da bir önceki deney sonuçlarını doğrular niteliktedir.

Kapalı döngü davranışsal tepkilerin tutarlılığının algısal geri beslemeye duyarlı olduğunu yapılan analizler ve gösterilen sonuçlar sunmaktadır. Bu analizler, temelde algısal geri besleme ile davranışsal değişkenlik arasında iki farklı ancak birbirini tamamlayan ilişkinin olduğunu ortaya çıkarmaktadır. İlk yaklaşım, algısal bilginin çeşitliliği ve belirginliğinin davranışsal değişkenlik üzerinde oynadığı rol iken ikinci yaklaşım ise mevcut algısal bilginin çeşitliliği ve belirginliğinden bağımsız olarak bu bilginin güçlendirilip zayıflatılmasının da davranışsal değişkenlikte önemli bir rol oynadığıdır. Yapılacak en önemli çıkarımlardan bir tanesi geri beslemenin kalitesi ne kadar iyi olursa, çevrede var olan gürültünün biyolojik sisteme negatif etkisinin de o kadar az olmasıdır. Biyolojik sistemlerde sistem dışı kaynaklı gürültülerin davranışsal hareketlere olan etkisi kritiktir. Buna ek olarak, gürültülerin hayvanlarda davranışsal değişkenlik miktarında en önemli faktörlerinden biri olduğu bilinmektedir [32].

Neticede bu bölümde gösterilen sonuçlar, deneysel sonuçların teorik temellerini araştırmak amacıyla yapılan tamamlayıcı ve doğrulayıcı benzetim çalışmalarıdır. Dikkat edilmelidir ki kullanılan sanal balık modellerinin tamamı gerçek dünyadan alınan bilgilere dayanan ancak ciddi anlamda teorik hesaplamalar içeren dinamik sayısal uygulamalardır. Gürbüz davranış fenomeninin, kapalı döngü sistemlerinin doğal bir özelliği mi yoksa biyolojik sistemlerde başka bir alt sistem mekanizmasının özelliği mi olup olmadığı bu tezde araştırılmış ve sonuçta bunun denetim kuramının klasik bir özelliği olduğu sonucuna varılmıştır.

Benzetim çalışmaları, şu ana kadar yapılan çalışmalarda reseptörlerden algılanabilecek çevresel faktörlere bağlı değişim bilgilerinin algısal belirginlik ve çeşitliliği ile ilgili kısımlarına ait ham veri içermemektedir. Bu nedenle ilgili parametrelerin değişimi yerine direkt olarak geri besleme kazancının modülasyonuna odaklanmıştır. Diğer bir ifade ile, elimizde aydınlık koşulunun değişimi, pencerenin varlığı/yokluğu ya da sığınak uzunluğunun farklılaşması gibi parametrik verilerin sanal ortam analogileri bulunmadığından yalnızca geri besleme çarpanı ile denemeler sürdürülmüştür. Neticede sonuçlar gerçek balıklardan alınan ham verilerin işlendiği sonuçlarla tutarlıdır ve bu da geri beslemeli kontrol sistemlerinin çıktısının, çevreden algılanan algısal geri beslemeye duyarlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.5. Çevrede mevcut olan algısal geri beslemenin kalitesini temsil eden $H(s)$ geri besleme faktörünün bulunduğu kapalı döngü kontrol sisteminin öbek şeması

Bu sonuçlar aslında bir mühendisin klasik tipte kapalı döngülü denetim sistemlerinde bekleyeceği etki-tepkilerle uyumludur. Bu da tezin başında bahsedilen, uzunca yıllar yeteneklerinden faydalanılabilen denetim kuramının biyolojik sistemlerde davranışsal tepkilerin gürbüz olmasının altında yatan tasarım modellemelerinde kullanılabileceği tezini desteklemektedir.

3.3.2 Davranışsal Tepkilerin Algısal Geri Beslemeye Olan Hassasiyetinin İncelenmesi

Yapıyı daha da detaylandırmak için bu kısımda denetleyici-sistem çiftinin ve algısal geri beslemenin kalitesinin değiştirilmesine karşın davranışsal çıktının hassasiyeti araştırılmıştır. Şu ana kadar anlatılan kısımlarda algısal geri beslemenin davranışsal değişkenliğe etkisi deneysel verilerle sunulmuş, gerçek dünyadan alınan ve teorik altyapı ile şekillenen benzetim çalışmaları ile doğrulanmış ve bu kısımda da tamamen teorik olarak incelenmektedir.

Şekil 3.5. bu yapıyı temsil eden bir öbek şemasıdır. Burada $H(s)$, çevreden algılanan ve modüle edilen algısal geri besleme kalitesinin *geri besleme faktörüdür*. Algısal geri beslemenin değişmesi ile davranışsal çıktının değişimine geri besleme faktörünün hassasiyeti ve birbirine tamamen uyumlu denetleyici-sistem çiftinin değişimi ile davranışsal çıktının değişmesine ise denetleyici-sistem uyumu faktörünün hassasiyeti denmektedir.

Öncelikle Şekil 3.5. için kapalı döngü kontrol sisteminin transfer fonksiyonu ve açık döngü kazancı aşağıdaki denklemler ile yazılabilir:

$$T(s) = \frac{C(s).P(s)}{1 + C(s).P(s)} \quad (26)$$

$$L(s) = C(s).P(s) \quad (27)$$

Algısal geri beslemenin ve birbirine uyumlu denetleyici-sistem çiftinin davranışsal çıktıya olan hassasiyetleri için aşağıdaki denklemler yazılır:

$$S_H^Y = \frac{dY/Y}{dH/H}, \quad S_L^Y = \frac{dY/Y}{dL/L} \quad (28)$$

Kapalı döngü sistemin çıkış ifadesi tek bırakılarak yazılırsa:

$$Y(s) = \frac{L(s)}{1 + L(s)H(s)} R(s) \quad (29)$$

denklemini elde edilir. Daha sonra çıkış ifadesinin kısmi türevi alınarak aşağıdaki ifadeler elde edilebilir:

$$dY(s) = \frac{dL(s)[1 + L(s).H(s)] - L(s)[H(s)dL(s) + L(s).dH(s)]}{(1 + H(s).L(s))^2} . R(s) \quad (30)$$

$$= \frac{dL(s) - L(s)^2 dH(s)}{(1 + H(s).L(s))^2} . R(s) \quad (31)$$

$$= \frac{dL(s) - L(s)^2 dH(s)}{(1 + L(s).H(s)).L(s)} \quad (32)$$

Çıkışın değişimi, denklem 34'teki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{dY(s)}{Y} = \frac{dL(s)[1 + L(s).H(s)] - L(s)[H(s)dL(s) + L(s).dH(s)]}{(1 + H(s).L(s))^2} . R(s) . \frac{1}{R(s)} . \frac{1 + L(s).H(s)}{L(s)} \quad (33)$$

$$= \frac{dL(s) - L(s)^2 dH(s)}{(1 + H(s).L(s))^2} . R(s) \quad (34)$$

Sonuç olarak sistem çıktısında göreceli değişim aşağıdaki gibi oluşmaktadır.

$$\frac{dY(s)}{Y(s)} = \frac{1}{1 + L(s)H(s)} \frac{dL(s)}{L(s)} - \frac{L(s)H(s)}{1 + L(s)H(s)} \frac{dH(s)}{H(s)} \quad (35)$$

Buradan itibaren, eğer ki algısal bilgide değişim yok ise, $dH(s)=0$ olur, bu durumda çıkış denklemi:

$$\frac{dY(s)}{Y(s)} = \frac{1}{1 + L(s)H(s)} \frac{dL(s)}{L(s)} \quad (36)$$

olmaktadır. Geri besleme faktörünün hassasiyeti:

$$S_H^Y = \frac{\partial Y/Y}{\partial L/L} = \frac{1}{1 + L(s).H(s)} \quad (37)$$

Diğer taraftan sistem-denetleyici çiftinde herhangi bir değişim olmaz ise $dL(s)=0$ 'dır. Bu durumda ise çıkış denklemi:

$$\frac{dY(s)}{Y(s)} = - \frac{L(s)H(s)}{1 + L(s)H(s)} \frac{dH(s)}{H(s)} \quad (38)$$

olmaktadır. Denetleyici-sistem uyumu faktörünün hassasiyeti ise aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$S_H^Y = \frac{\partial Y/Y}{\partial L/L} = \frac{L(s).H(s)}{1 + L(s).H(s)} \quad (39)$$

Sistemin çok büyük bir denetleyici kazancına sahip olduğunu varsayalım $|L(s)H(s) \rightarrow \infty|$. Bu durumda hassasiyetler aşağıdaki gibi yakınsarlar:

$$\lim_{L.H \rightarrow \infty} S_L^Y = \lim_{L.H \rightarrow \infty} \frac{1}{1 + L(s)H(s)} \rightarrow 0 \quad (40)$$

$$\lim_{L.H \rightarrow \infty} S_H^Y = \lim_{L.H \rightarrow \infty} - \frac{L(s).H(s)}{1 + L(s)H(s)} \rightarrow -1 \quad (41)$$

Hassasiyet analizi, denetleyici ve sistem dinamiklerinde oluşan parametrik değişimlerin etkisinin, örneğin denetleyici ve sistemin anlık olarak uyumsuzluğu gibi durumlarda, büyük denetleyici kazançları kullanılarak bastırılabileceğini ileri sürmektedir. Fakat, çevreden algılanan algısal geri besleme sinyallerinin kalitesi

üzerindeki değişimlerin etkileri bu şekilde bastırılmaz. Algısal sinyallerin kalitesindeki herhangi bir değişim, direkt olarak geri beslemeli kontrol sisteminin çıkışına yansımaktadır. Yapılan bu çalışmadan çıkarılabilecek asıl sonuç da davranışsal çıktıların gürbüz olabilmesi için denetleyici ve sistemin arasındaki hassas uyumluluk ayarlarından ziyade, önemli ölçüde algısal geri beslemenin kalitesine bağlı olduğunu göstermektedir. Bu çalışmaların genel sonucu olarak da mühendislerin denetleyicilerde hassas ayarlamalar yapmaya harçayacakları eforlar yerine bu çabanın daha doğru ve zengin geri beslemelerin tasarımına vermeleri gerektiğidir.

4. YORUM

Tez kapsamında biyolojik sistemlerin modellenmesine ve daha sonra da yorumlanmasına dair birçok bilgiye yer verilmiştir. Mühendislik bilimi uzun zamandır biyolojik arayüzler üzerinde çalışmalar yaparak insan-makine sistemleri arasında anlamlı ilişkiler kurmaya çalışmaktadır. Şu ana kadar yapılan biyolojik çalışmalarda sistem modellemelerindeki yaklaşımlar daha sofistike olmakla beraber uygulama alanları da diğer sistemlere görece daha zordur. Bu çalışmada biyolojik sistemlerin ifade edilmesinde denetim kuramının nasıl yardımcı olabileceği tartışılmıştır.

Tez kapsamında incelenen deney düzenekleri ve veri işleme çalışmaları ilerleyen zamanlarda çok daha detaylandırılabilir. Özellikle deney düzeneklerinde farklı birçok parametre değiştirilerek algısal geri beslemenin davranışsal değişkenlik üzerindeki etkisi daha derinlemesine araştırılabilir. Örneğin deney düzeneğinde sığınak pencere boyutları değişken tasarlanabilir, ortam aydınlatmasının şiddeti değişken olabilir, sığınak uyarıcı frekansı saf ve tek bir frekans olmak yerine rastgele seçimler ile balığın kalıcı hafızasında mevcut yörünge tahmin edilebilirliği elimine edilebilir. Bunlara ek olarak su ve atmosfer basıncını değiştirilerek canlı bireylerinde ortaya çıkabilecek değişkenlikler kontrol edilebilir, aynı şekilde su sıcaklığı, suyun akıntısı, koku gibi diğer parametreler de etkinleştirilebilir.

Geri beslemenin incelendiği görsel ve elektro-algılama sistemleri haricinde yanal çizgi organının da geri beslemesinin incelenmesi ile aktif takip deneyinde çok daha detaylı bir çalışma yapmak mümkündür. Buna ek olarak farklı yaş ve daha farklı morfoloji ve fizyolojiye sahip balıklarda deneyler yapılarak bireyden bireye olan değişkenlikler ve bunların da davranışsal değişkenlikle ilişkisi incelenebilir.

Çıkarılacak daha detaylı modellemeler ile mühendislerin uzunca yıllardır denetleyicinin sisteme uyumu hakkındaki çalışmaları yerine, geri beslemenin çeşitlilik ve kalitesinin artırılmasına yönelik çalışmaları teşvik edilebilir. Ayrıca biyolojik sistemlerde biyo-makine arayüzlerinde yapılan istatistiksel yaklaşımlar yerine alternatif daha basit ancak yadsınamaz derecede tutarlı modeller ile bu alanda ilerlemeler hızlanabilir.

Yapılan analizler, canlı doğasında ritmik hareketlerdeki gürbüz davranış fenomenini açıklayarak, bilimsel çalışmalarda mühendislere ışık tutmaktadır. Birçok biyolojik arayüzde, protez yapımında ya da yapay insan organı çalışmalarında sistem ile

sinirsel denetleyicinin uyumluluğu açısından yapılan çalışmalara ek olarak sistem denetleyici arasındaki geri besleme açısından buradaki bilgiler yn gösterici olabilir. Mühendisler, birleştirmeyi düşündüğü yapay ve biyolojik sistemlerde sistem-denetleyici uyumu açısından harcayacakları eforu daha ekonomik kullanabilmekle beraber odak noktalarını sistemler arası ve sistem-denetleyici arası geri beslemede çeşitlilik ve kalite konusuna daha çok kaydırabilirler.

5. KAYNAKLAR

- [1] Bullimore, S. R., & Burn, J. F. Dynamically similar locomotion in horses. *Journal of experimental biology*, 209(3), 455-465, (2006).
- [2] Sponberg, S., Dyhr, J. P., Hall, R. W., & Daniel, T. L. Luminance-dependent visual processing enables moth flight in low light. *Science*, 348(6240), 1245-1248, (2015).
- [3] Hou, L., Verdirame, M., & Welch Jr, K. C. Automated tracking of wild hummingbird mass and energetics over multiple time scales using radio frequency identification (RFID) technology. *Journal of Avian Biology*, 46(1), 1-8, (2015).
- [4] Van Handel, E. The obese mosquito. *The Journal of physiology*, 181(3), 478-486, (1965).
- [5] Schwind, W. J. Spring loaded inverted pendulum running: A plant model. University of Michigan. (1998).
- [6] Uyanık, İ., Morgül, Ö., & Saranlı, U. Experimental validation of a feed-forward predictor for the spring-loaded inverted pendulum template. *IEEE Transactions on robotics*, 31(1), 208-216. (2015).
- [7] Ankarali, M. M., Tutkun Şen, H., De, A., Okamura, A. M., & Cowan, N. J. Haptic feedback enhances rhythmic motor control by reducing variability, not improving convergence rate. *Journal of neurophysiology*, 111(6), 1286-1299, (2014).
- [8] Du, X., Vasudevan, R., & Johnson-Roberson, M. Bio-Istm: A biomechanically inspired recurrent neural network for 3-d pedestrian pose and gait prediction. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2), 1501-1508, (2019).
- [9] Uyanık, I., Sefati, S., Stamper, S. A., Cho, K. A., Ankarali, M. M., Fortune, E. S., & Cowan, N. J. Variability in locomotor dynamics reveals the critical role of feedback in task control. *Elife*, 9, e51219, (2020).
- [10] Mackenzie, S. J., Getchell, N., Deutsch, K., Wilms-Floet, A., Clark, J. E., & Whitall, J. Multi-limb coordination and rhythmic variability under varying sensory availability conditions in children with DCD. *Human Movement Science*, 27(2), 256-269, (2008).
- [11] Pearson, K. G. Generating the walking gait: role of sensory feedback. *Progress in brain research*, 143, 123-129, (2004).
- [12] Cullins, M. J., Gill, J. P., McManus, J. M., Lu, H., Shaw, K. M., & Chiel, H. J. Sensory feedback reduces individuality by increasing variability within subjects. *Current Biology*, 25(20), 2672-2676, (2015).

- [13] Van Der Kooij, H., & Peterka, R. J. (2011). Non-linear stimulus-response behavior of the human stance control system is predicted by optimization of a system with sensory and motor noise. *Journal of computational neuroscience*, 30(3), 759-778.
- [14] Dickinson, M. H., Farley, C. T., Full, R. J., Koehl, M. A. R., Kram, R., & Lehman, S. How animals move: an integrative view. *Science*, 288(5463), 100-106, (2000).
- [15] Madhav, M. S., & Cowan, N. J. The synergy between neuroscience and control theory: the nervous system as inspiration for hard control challenges. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 3, 243-267. (2020).
- [16] Cowan, N. J., Ankarali, M. M., Dyhr, Jonathan P., Madhav, Manu S., Roth, Eatai, Sefati, Shahin, Sponberg, Simon, Stamper, Sarah A., Fortune, Eric S., Daniel & Thomas L. Feedback control as a framework for understanding tradeoffs in biology. *American Zoologist*, 54(2), 223-237. (2014).
- [17] Kunapareddy, A., & Cowan, N. J. Recovering observability via active sensing. In 2018 Annual American Control Conference (ACC) (pp. 2821-2826). IEEE. (2018, June).
- [18] Jayakumar, R. P., Madhav, M. S., Savelli, F., Blair, H. T., Cowan, N. J., & Knierim, J. J. Recalibration of path integration in hippocampal place cells. *Nature*, 566(7745), 533-537. (2019).
- [19] Uyanik, I., Stamper, S. A., Cowan, N. J., & Fortune, E. S. Sensory cues modulate smooth pursuit and active sensing movements. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 13, 59, (2019).
- [20] Biswas, D., Arend, L. A., Stamper, S. A., Vágvölgyi, B. P., Fortune, E. S., & Cowan, N. J. Data and Software Associated with Publication "Closed-loop control of active sensing movements regulates sensory slip". *Current Biology*, 28(24), 4029-4036, (2018).
- [21] Cowan, N. J., & Fortune, E. S. The critical role of locomotion mechanics in decoding sensory systems. *Journal of Neuroscience*, 27(5), 1123-1128, (2007).
- [22] Lennart, L. System identification: theory for the user. PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 28. (1999).
- [23] Pintelon, R., & Schoukens, J. System identification: a frequency domain approach. John Wiley & Sons. (2012).
- [24] Ammari, H., Boulier, T., Garnier, J., & Wang, H. Mathematical modelling of the electric sense of fish: the role of multi-frequency measurements and movement. *Bioinspiration & biomimetics*, 12(2), 025002, (2017).

- [25] Sutton, E. E., Fuerst, B., Ghotbi, R., Cowan, N. J., & Navab, N. Biologically inspired catheter for endovascular Sensing and navigation. *Scientific reports*, 10(1), 1-10. (2020).
- [26] Stamper, S. A., Roth, E., Cowan, N. J., & Fortune, E. S. Active sensing via movement shapes spatiotemporal patterns of sensory feedback. *Journal of Experimental Biology*, 215(9), 1567-1574, (2012).
- [27] Uyanik, I., Stamper, S. A., Cowan, N. J., & Fortune, E. S. Data and Software Associated with Publication "Sensory cues modulate smooth pursuit and active sensing movement, 13, 59, (2019).
- [28] Bullock, T. H., Hopkins, C. D., & Fay, R. R. (Eds.). *Electroreception* (Vol. 21). Springer Science & Business Media., (2006).
- [29] Hedrick, T. L. Software techniques for two-and three-dimensional kinematic measurements of biological and biomimetic systems. *Bioinspiration & biomimetics*, 3(3), 034001, (2008).
- [30] Sefati, Shahin, Neveln, Izaak D., Roth, Eatai, Mitchell, Terence RT, Snyder, James B., MacIver, Malcolm A, Fortune, Eric S and Cowan, Noah J. Mutually opposing forces during locomotion can eliminate the tradeoff between maneuverability and stability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(47), 18798-18803, (2013).
- [31] Murray, J. One-way analysis of variance (ANOVA). University of Wisconsin-La Crosse Updated: November, 1, 2017, (2017).
- [32] Beck, J. M., Ma, W. J., Pitkow, X., Latham, P. E., & Pouget, A. Not noisy, just wrong: the role of suboptimal inference in behavioral variability. *Neuron*, 74(1), 30-39, (2012).
- [33] Biswas, D., Arend, L. A., Stamper, S. A., Vágvölgyi, B. P., Fortune, E. S., & Cowan, N. J. Closed-loop control of active sensing movements regulates sensory slip. *Current Biology*, 28(24), 4029-4036, (2018).
- [34] Bays, P. M., & Wolpert, D. M. Computational principles of sensorimotor control that minimize uncertainty and variability. *The Journal of physiology*, 578(2), 387-396, (2007).
- [35] Morfoloji ve Fizyoloji Arasındaki Fark Fark, Diğerleri, <https://tr.weblogographic.com/difference-between-morphology-and-physiology-552700>, (15/08/2021).
- [36] Proprioseptörler ve Proprioepsiyon Nedir?, Purves D. *Nörobilim*. New York: Oxford Üniversitesi Yayınevi, [tps://tr.julinse.com/proprioseptorler-ve-proprioepsiyon-nedir/](https://tr.julinse.com/proprioseptorler-ve-proprioepsiyon-nedir/),(15/08/2021).

EKLER

EK 1 – Spektrumlar, diğer grafikler

EK 1.1 ANOVA Sonuç Raporu

Between-Subjects Factors

		N
WINDOW	,00	24
	1,00	24
LIGHT	,00	24
	1,00	24
LENGTH	1,00	12
	2,00	12
	3,00	12
	4,00	12

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: METRIC

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	42,636 ^a	15	2,842	442,607	1,04466E-32
Intercept	95,903	1	95,903	14933,437	2,67534E-44
WINDOW	1,098	1	1,098	170,955	2,21244E-14
LIGHT	32,132	1	32,132	5003,371	9,93508E-37
LENGTH	6,953	3	2,318	360,894	9,69447E-25
WINDOW * LIGHT	,021	1	,021	3,336	0,077132592
WINDOW * LENGTH	,497	3	,166	25,792	1,13308E-08
LIGHT * LENGTH	1,653	3	,551	85,785	2,18839E-15
WINDOW * LIGHT * LENGTH	,283	3	,094	14,679	3,47372E-06
Error	,206	32	,006		
Total	138,744	48			
Corrected Total	42,842	47			

EK 1.2 Tezde Kullanılan Teknik Terimlerin Açıklaması

Tezde Geçen Bazı Teknik Terimler

Morfoloji: Canlılarda iç ya da dış organların özelliklerini inceleyen biyolojinin bir bilim dalıdır. Bir organın şekli, rengi gibi dış özelliklerin yanı sıra nasıl çalıştığı gibi konuları da işler [35].

Fizyoloji: Birçok organ ya da yaşam biriminin birbiri ile olan ilişkisini inceler. Farklı morfolojik yapıları beraber inceleyen ve bu yapıların altında biyofiziksel ve biyokimyasal altyapıyı da inceleyen biyolojinin bir bilim dalıdır [35].

Proprioseptör :Vücudun durumu, hareketleri kas gerilimi hakkında beyne bilgi veren iç algı hücreleridir, kaslarda,tendonlarda ve eklemlerde bulunurlar. [36]

Lokomotor: İnsan ve hayvanlarda kas-iskelet sistemleri sayesinde hareket etme kabiliyetidir.

Duyumotor: Duyusal bilgilerin Merkezi Sinir Sisteminde (Central Nervous System, CNS) hareket yanıtlarına dönüştürülmesi olup davranışif ve gönüllü eylemdir.

EK 4 - Tezden Türetilmiş Yayınlar

Comertler, M. S. and Uyanik, I. The Saliience and Versatility of Sensory Feedback Regulate Behavioral Variability. Bioinspiration & Biomimetics, (2021) (ön onay alındı,inceleme aşamasında)