İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YUNUS YÜZME HAREKETİNİN MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Berrak KARACA
(503031603)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Mayıs 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 15 Haziran 2006

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet KUZUCU

Diğer Jüri Üyeleri: Prof.Dr. Erkan AYDER

Yard.Doç.Dr. Zeki Yağız Bayraktaroğlu

HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Bu çalışmamın her aşamasında fikirleriyle bana yol gösteren ve tez çalışmam ile ilgili danışmanlık yapmanın ötesinde bana mühendisliği öğreten, kafamın karıştığı her aşamada sabırla bana destek olan değerli hocam, Prof. Dr. Ahmet KUZUCU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatta desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman yanımda olan annem Neşe KARACA'ya teşekkür ederim.

Çalışmamın her aşamasında yanımda olup bana moral veren arkadaşlarıma ve destek olan herkese teşekkür ederim.

Haziran 2006 Berrak KARACA

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ **v**
ŞEKİL LİSTESİ **vi**
SEMBOL LİSTESİ **vii**
ÖZET **viii**
SUMMARY **x**

1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı 1
1.2 Tezin Sistematik Kurgusu 2

2. SU CANLILARININ HAREKETLERİ VE BU HAREKETLERİN TAKLİDİNE YÖNELİK ÇALIŞMALAR **3**
2.1 "Robotuna", "Robopike" ve "Proteus Penguen Bot" (MIT) 3
2.2 Yunuslar ile İlgili Çalışmalar 3
2.3 İ.T.Ü. Makine Fakültesi Bünyesinde Yapılan Çalışmalar 4
2.4 Bölüm Sonuçları 5

3. YUNUS YÜZME HAREKETLERİ **6**
3.1 Yunus Yüzme Hareketinin Avantajları 6
3.2 Hareket Türleri 6

4. YUNUS MODELİ **8**
4.1 4 Uzuvlu 3 Eklemli Mekanizma Dinamiği 9
4.2 Kuvvet Denklemleri 11
4.3 Moment Denklemleri 18
4.4 Sürüklenme Kuvvetlerinin İfadesi 24
4.4.1 Laminer akışta viskoz sürtünme 25
4.4.2 Türbülanslı akış sürtünme kuvvetleri 26

5. BENZETİM **29**
5.1 Benzetim Ortamı 29
5.2 Benzetim Programı 29
5.3 Yerleştirilmiş Fonksiyon Bloğu 31

6. YUNUS YÜZME DAVRANIŞLARININ OPTİMİZASYONU **32**
6.1 Senaryo 1 32
6.2 Senaryo 2 36
6.3 Optimizasyon Sonuçları 39

7. SONUÇ VE ÖNERİLER **40**

KAYNAKLAR **42**

EKLER **44**

ÖZGEÇMİŞ **48**

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 6.1 Senaryo 1 için Çeşitli Frekans Değerlerine Karşılık Gelen Ortalama Hız Değerleri 35
Tablo 6.2 Senaryo 1 için Çeşitli Frekans Değerlerine Karşılık Gelen Ortalama İtme Kuvveti Değerleri 35
Tablo 6.3 Senaryo 2 için Çeşitli Frekans Değerlerine Karşılık Gelen Ortalama Hız Değerleri 36
Tablo 6.4 Senaryo 2 için Çeşitli Frekans Değerlerine Karşılık Gelen Ortalama İtme Kuvveti Değerleri 37

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1 : Hareket tarzlarına göre eklem pozisyonları (siyah çizgiler eklemleri temsil etmektedir.) 7
Şekil 4.1 : Yüzme sırasında suyun yunusa uyguladığı kuvvetler ve hızlar 8
Şekil 4.2 : Yunus hareketinin bir eğri üzerine binmesi 9
Şekil 4.3 : Matematik modelin oluşturulduğu 4 uzuvlu, 3 eklemli robotik mekanizma 10
Şekil 4.4 : i. ve i+1. uzuv için açılar ve uzunluklar 13
Şekil 4.5 : i. uzuv için moment ve kuvvetler 18
Şekil 4.6 : Uzuv sürüklenme kuvvetinin uzuv hızına bağlı ifadesinin gösterimi 25
Şekil 6.1 : Senaryo 1 için en uygun faz farkları ile 0.5 Hz. frekansında giriş yörüngeleri 33
Şekil 6.2 : Senaryo 1 için en uygun faz farkları ile 0.5 Hz. frekansında uzuv açılarının zamanla değişimi 34
Şekil 6.3 : Senaryo 1 için en uygun faz farkları ile 0.5 Hz. frekansında yunusun ileri doğru hareketini sağlayan 1. uzuv doğrusal hızının x yönündeki bileşeninin zamanla değişimi 34
Şekil 6.4 : Senaryo 2 için en uygun faz farkları ile 2 Hz. frekansında giriş yörüngeleri 38
Şekil 6.5 : Senaryo 2 için en uygun faz farkları ile 2 Hz. frekansında uzuv açılarının zamanla değişimi 38
Şekil 6.6 : Senaryo 2 için en uygun faz farkları ile 2 Hz. frekansında yunusun ileri doğru hareketini sağlayan 1. uzuv doğrusal hızının x yönündeki bileşeninin zamanla değişimi 39
Şekil A.1 : Benzetim programının ara yüz görüntüsü 47

SEMBOL LİSTESİ

$\vec{f}_{i,i+1}$ **:** i eklemi ile i+1 eklemi arasındaki etkileşim kuvveti

$\vec{M}_{i,i+1}$ **:** i eklemi ile i+1 eklemi arasındaki etkileşim momenti

$\vec{M}_{i-1,i}$ **:** i-1 eklemi ile i eklemi arasındaki etkileşim momenti

$\vec{F}_i$ **:** i eklemine etkiyen sürüklenme kuvveti

I_i **:** i eklemi için atalet momenti

$\vec{\omega}_i$ **:** i ekleminin açısal hızı

$\dot{\vec{\omega}}_i$ **:** i ekleminin açısal ivmesi

m_i **:** i ekleminin kütlesi

$\vec{r}_{i,c_i}$ **:** O_i noktasından C_i ağırlık merkezine doğru olan pozisyon vektörü

$\vec{r}_{i,c_{i+1}}$ **:** O_i noktasından C_{i+1} ağırlık merkezine doğru olan pozisyon vektörü

$\vec{v}_{c_i}$ **:** i ekleminin ağırlık merkezindeki doğrusal hızı

$\dot{\vec{v}}_{c_i}$ **:** i ekleminin ağırlık merkezindeki doğrusal ivmesi

$\vec{M}_i$ **:** i eklemine etki eden sürüklenme kuvveti

$\Delta\vec{v}_{i,i+1}$ **:** i eklemi ile i+1 eklemi arasındaki doğrusal hız farkı

ϑ_i **:** i ekleminin açısal yer değiştirmesi

$\dot{\vartheta}_i$ **:** i ekleminin açısal hızı

$\ddot{\vartheta}_i$ **:** i ekleminin açısal ivmesi

l_i **:** i ekleminin uzunluğu

l_{c_i} **:** i ekleminin ağırlık merkeze kadar olan uzunluğu

$\vec{F}_n$ **:** eksenel sürtünme kuvveti

b_n **:** eksenel sürtünme katsayısı

$\vec{F}_t$ **:** yanal sürtünme kuvveti

b_t **:** yanal sürtünme katsayısı

YUNUS YÜZME HAREKETİNİN MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

ÖZET

İ.T.Ü. Makine Fakültesi bünyesinde daha önceki yıllarda **Doğangil ve Özçiçek (2005)** ve **Dalyan ve diğ. (2004)** tarafından yapılan iki yunus türü robot prototipinin de kanal deneylerinin yapılması sırasında yunus yüzme başarımı için eklemlerin hareket uyumunun çok önemli olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle yunus robot davranışının ayrıntılı benzetimine gerek duyulmuştur.

Bu tez çalışması kapsamında vücut yapısı ve hareket tipleri açısından çok verimli bir yapıya sahip olan yunuslar incelenmiş ve yunus yüzme hareketinin matematik modeli oluşturulmuştur.

Çalışma kapsamında yunus yüzme hareketinin matematik modelinin oluşturulmasında, önceki çalışmalardan farklı olarak hareketi sağlayan sürtünme kuvvetlerinin yalnızca kanatta değil hareket eden tüm uzuvlarda oluştuğu varsayılarak dört uzuvlu, üç eklemli bir robotik mekanizma ele alınmıştır.

Elde edilen matematiksel model kullanılarak oluşturulan yunus benzetim modeli, MATLAB® programı içinde bulunan Simulink programındaki modüller yardımıyla oluşturulmuştur.

Oluşturulan benzetim programında sınanmak üzere çeşitli senaryolar tasarlanmış ve bu senaryolardan elde edilen veriler sonucunda sistemin davranışları gözlemlenerek benzetim sonuçları iyileştirilmiş ve yunus yüzme davranışları optimize edilmiştir.

Yunus yüzme davranışlarının optimize edilmesi, yunusun yüzmesini sağlayacak olan itme kuvvetinin en büyük yapacak hareket koordinasyonunun belirlenmesi olarak algılanmalıdır.

Elde edilen en iyi sonuçlar irdelenerek bir yunus prototipinin tasarımı için önermeler üretilmiştir. Böylelikle bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ileride yapılabilecek çalışmalara ışık tutabilecektir.

MODELLING AND OPTIMIZATION OF DOLPHINS' SWIMMING MOVEMENTS

SUMMARY

It has been observed during the pool tests of the two robotic dolphin prototypes created in the previous years by **Doğangil and Özçiçek (2005)**, **Dalyan et al. (2004)** at the ITU Mechanical Faculty that the harmony in the movements of the dolphins' links in the act of swimming is very important. For this reason, detailed simulation of a dolphin's robotic movements is needed. Within the scope of this thesis, the dolphins, which have outstanding body structures and various types of movements, have been investigated and a mathematical model of the dolphins' swimming movements has been established.

Within the scope of this study, while establishing the mathematical model of the swimming movements of a dolphin, a new study, which is more different than the previous studies, has been conducted. In this study, considering that the friction forces that help the dolphins to move are applied not only on the fins but also on all the organs that move, a robotic mechanism with 4 organs and 3 links has been taken into consideration.

By using the mathematical model obtained, a simulation program has been established. Dolphin simulation model has been established through the help of the modules in the Simulink program present in the MATLAB® program.

Various scenarios to be tested in the established simulation program have been planned, and in accordance with the data obtained from these scenarios, the movements of the system have been observed and swimming movements of the dolphins have been optimized.

Optimization of the swimming movements of the dolphins should be regarded as the act to determine the movement coordination that can maximize the pushing force that helps a dolphin to swim.

The best results that have been obtained are investigated thoroughly and propositions for designing the prototype of a dolphin have been put forward.

The results that are obtained within the scope of this study will highlight the studies that can be carried out in the future.

1. GİRİŞ

Doğadaki canlı varlıklarda bulunan hareket sistem ve yöntemlerinin mühendislik sistemleri ve tasarımlarda kullanılması "biomimetik" olarak adlandırılmaktadır. Evrim süreci boyunca doğal sistemlerin giderek daha verimli hale gelmeleri ve en uygun değer çözümlerine ulaşmaları, doğal yaşam formları ve mühendislik çalışmaları arasındaki teknoloji transferini cazip hale getirmektedir. Doğaya, mühendislik çalışmalarının çözümleri için sonsuz bir veritabanı gibi bakmak mümkündür. Günümüzde inşaattan sağlık sektörüne kadar birçok alanda doğadaki bilgilerden yararlanılmaktadır.

Yunuslar incelendiğinde, pek çok mühendislik sistemi için yaratıcı fikirler elde edilebilir. Yunus yüzme hareketinden yeni su taşıtları tasarımı ya da var olan taşıtların verimliliğinin arttırılması için çözümler üretilebilir.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan pervaneli su altı taşıtları, pervanenin hareketinin oluşturduğu iz nedeniyle kolaylıkla izlenebilmektedir. Buna karşılık yüzme hareketinin pervaneler yardımıyla sağlanmadığı yunus türü bir su altı aracı suda iz bırakmadan rahatlıkla ilerleyebilmenin yanı sıra pervaneli su altı taşıtlarına göre daha sessiz ve verimli çalışabilecektir. Bu avantajlar yunus türü su altı araçlarını pervaneli su altı taşıtlarına kıyasla daha cazip kılmaktadır.

Yunus tipi robotların birçok kullanım alanları mevcuttur. Bu kullanım alanlarından başlıcaları; gözlem ve keşif, askeri uygulamalar ve arama kurtarmadır.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında, vücut yapısı ve hareket tipleri açısından çok verimli bir yapıya sahip olan yunuslar incelenmiş ve yunus yüzme hareketinin matematik modeli oluşturularak, elde edilen ifadeler yardımıyla benzetim çalışmaları yapılmıştır.

Benzetim sonuçları iyileştirilerek ve elde edilen en iyi sonuçlar irdelenerek bir yunus prototipinin tasarımı için önermeler üretilmiştir.

1.2 Tezin Sistematik Kurgusu

Yunus yüzme mekaniğinin modellenerek benzetim çalışmalarının yapılacağı bu çalışma temel olarak 7 bölümden oluşmaktadır. Bu bölümde, tezin amacı, kapsamı ve sistematik kurgusu açıklanmakta, ikinci bölümde, su canlılarının hareketleri ile ilgili çalışmalar sunulmaktadır. Üçüncü bölümde yunus hareketlerinin ayrıntılı analizi yapılmış, dördüncü bölümde yunus yüzme hareketinin matematik modeli kurulmuştur. Beşinci bölümde MATLAB® programı kullanılarak yapılan benzetim programı anlatılmıştır. Altıncı bölümde iyileştirilmiş benzetim sonuçları sunularak, en son bölümde genel sonuçlar ve değerlendirmeler ile tasarım önerileri sunulmuştur.

2. SU CANLILARININ HAREKETLERİ VE BU HAREKETLERİN TAKLİDİNE YÖNELİK ÇALIŞMALAR

Su canlılarının hareketleri ile ilgili yapılmış çalışmalar çeşitlilik göstermektedir. Bu çalışmaların bir kısmı su canlılarının hareketlerini incelemekte, diğer bir kısmı ise canlı hareketlerini taklit ederek mühendislik sistemlerine çözümler bulmayı amaçlamaktadır.

2.1 "Robotuna", "Robopike" ve "Proteus Penguen Bot" (MIT)

Literatürdeki en çarpıcı örneklerden ikisi MIT tarafından geliştirilmiş olan "Robotuna" ve bununla bağıntılı "RoboPike" projeleridir. "Robotuna" ufak bir ton balığının şeklini ve hareketlerini taklit etmek üzere tasarlanan bir robot prototipidir. Her biri 2 beygir gücünde 6 adet servomotor tarafında sürülen sistem, kontrol tendonları boyunca çeşitli noktalara yerleştirilmiş güç sensörlerine sahiptir. "RoboPike" projesinde ise turnabalığı taklit edilmeye çalışılmıştır. Bu balığın seçilmesinin sebebi çok iyi ivmelenme ve dönme özelliklerinin olmasıdır. Ortaya çıkan prototip gövdesinin hareketi 3 adet servomotor tarafından sağlanmaktadır. Her iki çalışma da yatay salınımlar yapacak bir tahrik mekanizması öngörmüştür.

Canlı hareketinin taklit edilmesi ile ilgili diğer bir örnek, MIT tarafından tasarlanan "Proteus Penguen Bot"tur. Penguen ayaklarının yaptığı hareketin, gemi tahrik sistemlerine uygulandığı bu projede salınan 2 adet plaka itme kuvvetini sağlamaktadır. Böylelikle verimliliği yüksek olan doğal balık tahrik yöntemleri alışılagelmiş gemilere uygulanabilmektedir.

2.2 Yunuslar ile İlgili Çalışmalar

Yunusların yüzme hareketleri ile ilgili en eski çalışmalar Aristo'ya aittir **(Aristo, 1910**). Memeli deniz hayvanlarının aşağı ve yukarı kuyruk hareketlerini inceleyen

Borelli ise “De Motu Animalium” isimli çalışmasında yunus yüzme hareketinin işleyişinin bir açıklamasını yapmıştır **(Fish ve Rohr, 1999).**

Memeli hayvanların yüzme hareketleri ile ilgili daha sonraki çalışmalar 1800’lere kadar genellikle efsanelerle sınırlı olarak kalmıştır. Charles Darwin'in 1859 yılında "Türlerin Kökeni" kitabının yayınlanmasından sonraki yıllarda, biyologlar evrimsel dönüşüm mekanizmalarına dikkat çekmek amacıyla balina morfolojisi ve yüzme hareketleri ile ilgilenmeye başlamışlardır **(Fish ve Rohr, 1999).**

Yunus yüzme mekaniği ile ilgili literatürde yer alan çalışmalardan birisi de “Gray’in Paradoks’u” adıyla anılan Sir James Gray’e ait olan çalışmadır. Gray, yunusun gövdesini 2 m.lik tek yüzlü bir düz plaka olarak modellemiştir **(Carpenter ve diğ., 2000).** Rijit bir gövdeden oluşan bu basit hidrodinamik modeli sürüklenme (İngilizce “drag” terimi yerine bu çalışmada “sürüklenme” terimi kullanılacaktır.) kuvvetini hesaplamak amacıyla kullanmış ve aktif olarak yüzen yunus ile yunusun yüzdüğü hızda çektiği rijit modelden elde ettiği sonuçları karşılaştırmıştır. Elde ettiği sonuçlar, hesaplanan sürüklenme kuvvetinin, yunusun kasları tarafından sağlanan güç ile karşılanamayacağını göstermiştir **(Fish ve Rohr, 1999).** Yunus üzerindeki sürüklenme kuvvetinin daha az olması gerektiği sonucuna varan Gray, bunun ancak tamamen laminer sınır tabakasının mevcut olması halinde gerçekleşebileceğini düşünmüştür. Başlangıçta çalışmalarında yunusların kütlesi ve hızını göz önünde bulundurarak türbülanslı sınır tabaka akış halinin mevcut olduğunu varsayan Gray, çalışmaları sonrasında yunusların etraflarındaki türbülanslı akışı laminer hale getirdiklerini öne sürmüştür**(Carpenter ve diğ., 2000).**

Gray’in çalışmaları ileride yunusla ilgili birçok çalışmaya temel teşkil etmiştir.

2.3 İ.T.Ü. Makine Fakültesi Bünyesinde Yapılan Çalışmalar

Dalyan ve diğ. (2004) yatay kuyruklu yunus türü bir su altı gözlem ve keşif robotunun ilk tasarım çalışmalarını yaparak, bir prototip üretmişlerdir. Konstrüktif tasarım çalışmaları sırasında robotun sahip olması hedeflenen en büyük özellikleri; gerçek yunusla birebir benzerlik içinde olması, mümkün olan en düşük sabit ağırlığa ve mümkün olan en geniş kullanılabilir iç hacme sahip olmasıdır.

Aracın gövdesi, kuyruğu, sırt ve yan yüzgeçleri türleri arasında en çok bilinen şişe burunlu yunus (Tursiops Truncatus) türünün anatomik yapısı esas alınarak tasarlanmıştır. Prototipin doğadaki yunus boyutları 0.3 ölçekle küçültülerek elde edilen toplam boyu 1300 mm.dir.

Dalyan ve diğ. (2004) tarafından üretilen bu prototipin hareketi pnömatik körüklerle tahrik edilen üç eklemli gövde ve kuyrukla sağlanmaktadır. Yüzme hareketi sinüs dalgası üzerine oturtulacağı için prototipin tasarım ve imalatı üç eklemli olarak yapılmıştır. Üç eklemli tasarım, gerek düşük, gerekse yüksek hızlarda suya gövde boyunca itme kuvveti uygulayan "hareketli dalga" yaklaşımının gerçekleştirilmesini sağlamaktadır.

Doğangil ve Özçiçek (2005) ise üretimi **Dalyan ve diğ. (2004)** tarafından tamamlanmış, 4 serbestlik dereceli su altı robotunun mikro denetleyici ile kontrolü üzerinde çalışmışlardır. Daha önce tasarlanan prototip bir dalgıç tüpü eklenmek üzere 2 metre uzunluğuna çıkarılmış, tüm enerji kaynaklarını ve elektronik sistemini içinde barındıran otonom bir su altı robotu haline getirilmiştir. RF teknolojisi ile kablosuz haberleşme sistemi kurulmuş ve uzaktan kumandalı kontrolü yapılmıştır.

Her iki prototipin de kanal deneyleri yapılmıştır.

2.4 Bölüm Sonuçları

İ.T.Ü. Makine Fakültesi bünyesinde yapılan her iki prototipin de kanal deneylerinin yapılması sırasında yunus yüzme başarımı için eklemlerin hareket uyumunun çok önemli olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle yunus robot davranışının ayrıntılı benzetimine gerek duyulmuştur.

3. YUNUS YÜZME HAREKETLERİ

3.1 Yunus Yüzme Hareketinin Avantajları

Yatay kuyruklu bir canlı olan yunus sığ sularda ve yüzeyin hemen altında seyir halinde dikey kuyruklu rakiplerine göre avantajlıdır. Yunus en sığ sularda bile hareket edebilir. Dikey kuyruklu deniz canlılarının dezavantajı, kuyruğun sığ sularda su içinde kalmayan bölümünün ve kuyruğun sığ sularda dibe sürtünmesinin neden olduğu güç kaybıdır.

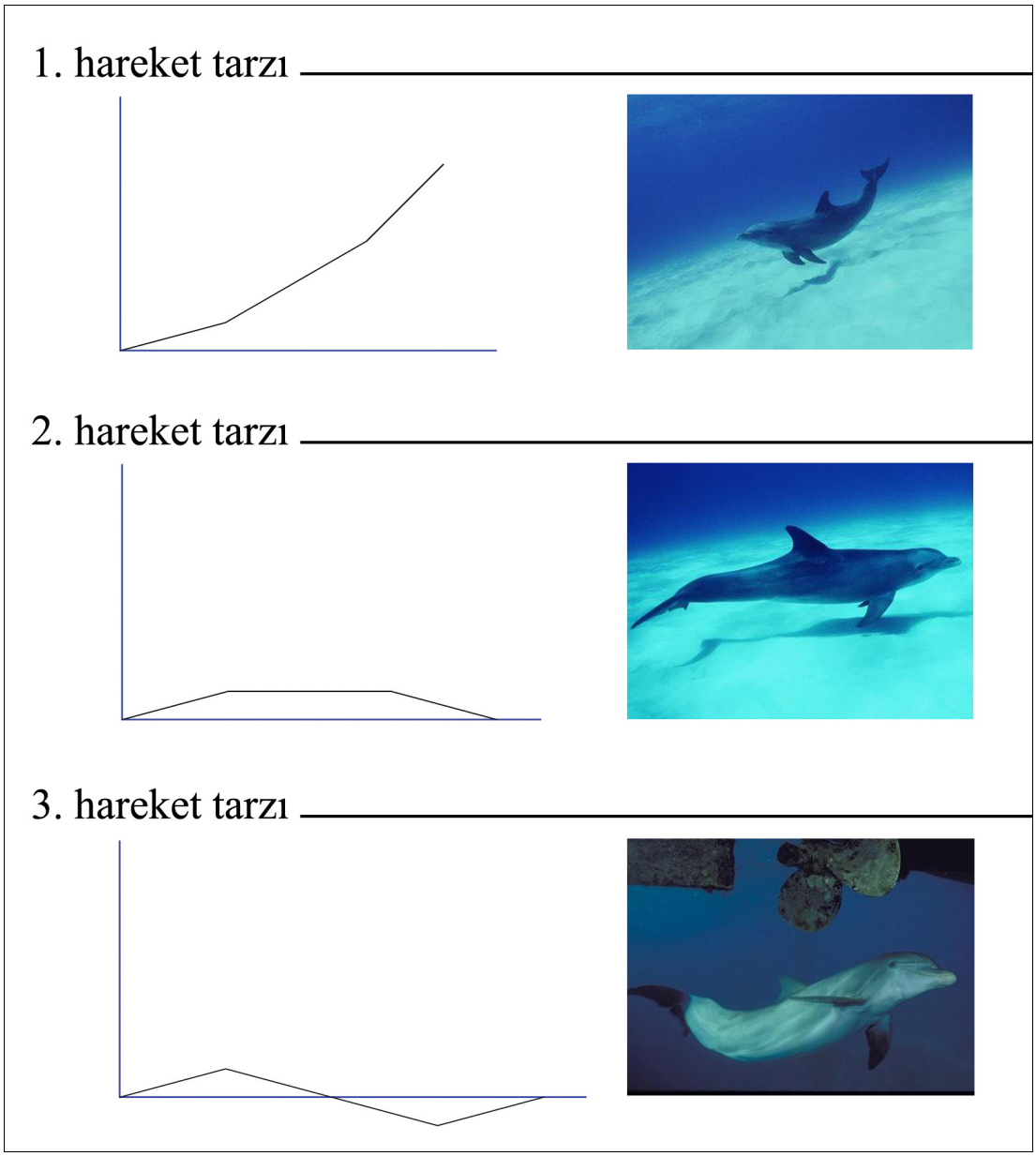
Mevcut pervaneli su altı taşıtları, pervane izi nedeniyle kolaylıkla izlenebilmekte ve sığ sularda etkin olamamaktadırlar. Yunuslar yüzerken kuyruk izi bırakmamaları ile mevcut pervaneli su altı taşıtlarına avantaj sağlamaktadırlar. Bu özellik yunus robotu pratik olarak izlenemez yapmakta ve gerek savunma gerekse güvenlik ve gözlem-keşif alanlarında çok avantajlı kılmaktadır Ayrıca yunus yüzme hareketi pervane ile elde edilen yüzme hareketine nazaran daha sessiz ve verimli olmaktadır.

3.2 Hareket Türleri

Çevresel gözlemler ışığında yunuslar için belli hareket türleri olduğu belirlenmiştir.

Yunuslar için yüksek hızlar kaçma ve aktif kovalama sırasında gözlemlenir fakat yüksek enerji harcanmasına sebep olur **(Fish ve Rohr, 1999).** Düşük hızlar ise yiyecek arama veya göç etme sırasında gözlemlenir **(Fish ve Rohr, 1999).**

Temel olarak benimsenen 3 farklı çalışma tarzı Şekil 3.1'de gösterilmekte olup, bunlardan 2. hareket tarzının düşük hızlarda ve geri hareketin sağlanmasında, 3. hareket tarzının orta hızlarda, 1. hareket tarzının ise yüksek hızlarda etkin olacağı öngörülmektedir.

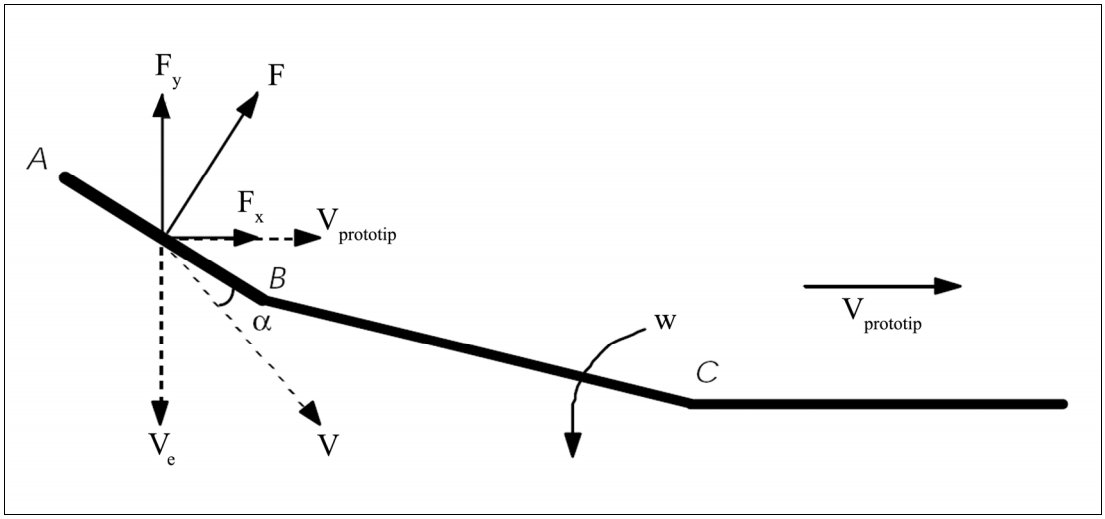


Şekil 3.1 : Hareket tarzlarına göre eklem pozisyonları (siyah çizgiler eklemleri temsil etmektedir.)

Bu üç hareketin aynı frekansta ancak aralarında faz farkı bulunan harmonik fonksiyonlarla ifade edilebileceği düşünülmüştür.

4. YUNUS MODELİ

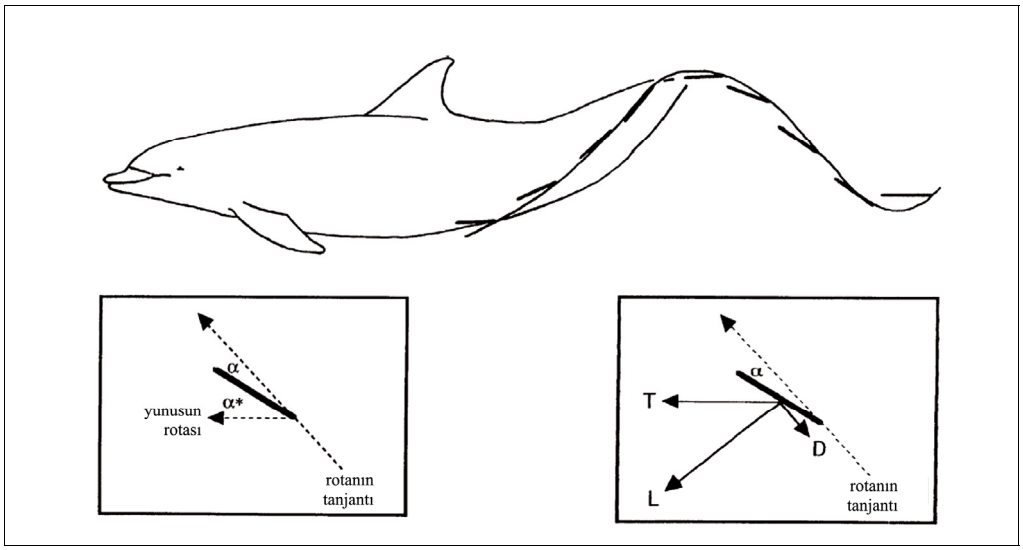
İlkesel olarak temel alınan çalışmada kinematik bilgilerin ışığında dinamik bilgilere ulaşabilmek için yunusun yüzüşünü açıklamak üzere seçilen model, 2 serbestlik dereceli bir mekanizma ile basitçe Şekil 4.1'deki gibidir **(Fish ve Rohr, 1999).**



Şekil 4.1 : Yüzme sırasında suyun yunusa uyguladığı kuvvetler ve hızlar

Buna göre, sistem $V_{prototip}$ hızıyla ilerlerken eklemler aşağıya doğru V_e hızıyla hareket etmektedir. Bu durumda eklemlerin global koordinat sistemine göre gerçek hızı V ile belirtilmiştir. Suyun her bir ekleme uyguladığı, ekleme dik doğrultudaki kuvvet F, bu kuvvetin hareket yönüne dik bileşeni F_y ve hareket yönündeki bileşeni F_x ile gösterilmiştir.

Her bir periyotta, birbirine eşit ve zıt yönlerde oluşan F_y kuvvetlerinin toplamı sıfıra eşit olmakta ve geriye itkiyi sağlayan $2*F_x$ kuvveti kalmaktadır. Böylece yunus, hareket yönü doğrultusunda ilerler.



Şekil 4.2 : Yunus hareketinin bir eğri üzerine binmesi

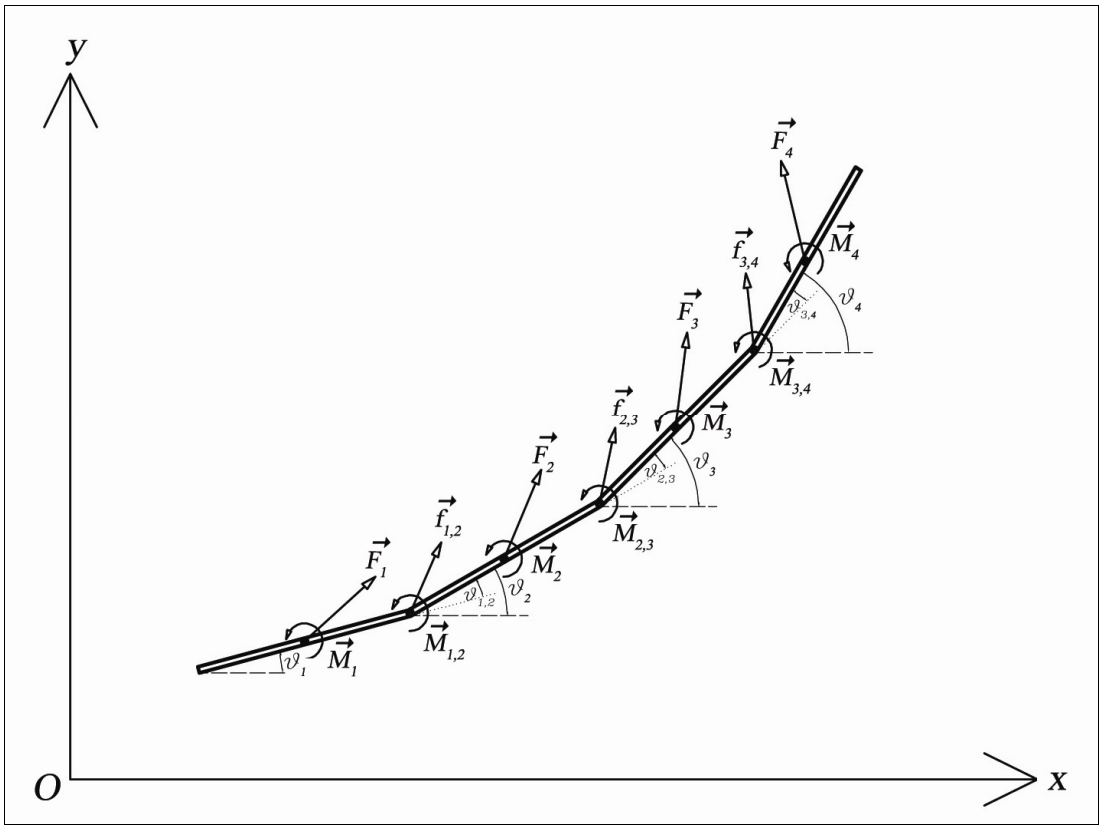
Şekil 4.2'de de görüldüğü gibi yunusun hareketi, çok sayıda elemanter uzvun takip ettiği eğrisel bir yörünge üzerine oturtulabilir **(Fish ve Rohr, 1999).** Bu yörüngenin periyodik olarak tekrarlandığı dikkate alınırsa, hareketin harmonik bir fonksiyonla modellenmesi mümkün olacaktır. D ile gösterilen sürüklenme kuvveti ise, elemanter uzvun hareket yörüngesinin teğetine paralel ve zıt yöndedir.

Sürüklenme kuvvetinin sadece sürtünmelerden kaynaklandığı ve basıncın etkisinin çok düşük olduğu dikkate alındığında yunusun düşük hızlardaki hareketi için sürüklenme kuvvetinin laminer akış için viskoz sürtünme kuvvetlerinden oluştuğu varsayılabilir.

Bu çalışmada, önceki çalışmalardan farklı olarak hareketi sağlayan sürtünme kuvvetlerinin yalnızca kanatta değil hareket eden tüm uzuvlarda oluştuğu varsayılarak Şekil 4.3'teki 4 uzuvlu, üç eklemli robotik mekanizma ele alınmıştır.

4.1 4 Uzuvlu 3 Eklemli Mekanizma Dinamiği

Matematik model oluşturulurken yunus 4 uzuvlu 3 eklemli bir mekanizma olarak ele alınmıştır.



Şekil 4.3 : Matematik modelin oluşturulduğu 4 uzuvlu, 3 eklemli robotik mekanizma

Hareket ifadeleri için serbest cisim Newton-Euler formülasyonu yunusun hareketine uygun şekilde düzenlenirse yunusun 1. uzvu için sırasıyla kuvvet ve moment dengesi şu şekilde yazılabilir:

$$-\vec{f}_{1,2} + \vec{F}_1 - m_1\dot{\vec{v}}_{c1} = 0 \qquad \textbf{(4.1)}$$

$$-\vec{M}_{1,2} + (-\vec{r}_{1,c1}) \times (-\vec{f}_{1,2}) + \vec{M}_1 - I_1\dot{\vec{\omega}}_1 = 0 \qquad \textbf{(4.2)}$$

Benzer şekilde 2. uzuv için kuvvet ve moment dengesi yazılırsa;

$$-\vec{f}_{2,3} + \vec{f}_{1,2} + \vec{F}_2 - m_2\dot{\vec{v}}_{c2} = 0 \qquad \textbf{(4.3)}$$

$$-\vec{M}_{2,3} + \vec{M}_{1,2} + (-\vec{r}_{1,c2}) \times (\vec{f}_{1,2}) + (-\vec{r}_{2,c2}) \times (-\vec{f}_{2,3}) + \vec{M}_2 - I_2\dot{\vec{\omega}}_2 = 0 \qquad \textbf{(4.4)}$$

denklemleri elde edilir. 3. uzuv için kuvvet ve moment dengesi yazıldığında;

$$-\vec{f}_{3,4}+\vec{f}_{2,3}+\vec{F}_3-m_3\dot{\vec{v}}_{c3}=0 \tag{4.5}$$

$$-\vec{M}_{3,4}+\vec{M}_{2,3}+(-\vec{r}_{2,c3})\times(\vec{f}_{2,3})+(-\vec{r}_{3,c3})\times(-\vec{f}_{3,4})+\vec{M}_3-I_3\dot{\vec{\omega}}_3=0 \tag{4.6}$$

denklemleri elde edilir. 4.uzuv için kuvvet ve moment dengesi;

$$\vec{f}_{3,4}+\vec{F}_4-m_4\dot{\vec{v}}_{c4}=0 \tag{4.7}$$

$$\vec{M}_{3,4}+(-\vec{r}_{3,c4})\times(\vec{f}_{3,4})+\vec{M}_4-I_4\dot{\vec{\omega}}_4=0 \tag{4.8}$$

şeklinde yazılır.

Bu denklemlerde $\vec{f}_{i,i+1}$, i uzvu ile i+1 uzvu arasındaki etkileşim kuvvetini; $\vec{M}_{i,i+1}$, i uzvu ile i+1 uzvu arasındaki etkileşim momentini; $\vec{M}_{i-1,i}$, i-1 uzvu ile i uzvu arasındaki etkileşim momentini; $\vec{F}_i$, i uzvuna etkiyen sürüklenme kuvvetini; I_i, i uzvu için atalet momentini; $\vec{\omega}_i$, i uzvunun açısal hızını; $\dot{\vec{\omega}}_i$, i uzvunun açısal ivmesini; m_i, i uzvunun kütlesini; $\vec{r}_{i,c_i}$ O_i noktasından C_i ağırlık merkezine doğru olan pozisyon vektörünü; $\vec{r}_{i,c_{i+1}}$, O_i noktasından C_{i+1} ağırlık merkezine doğru olan pozisyon vektörünü; $\vec{v}_{c_i}$, i uzvunun ağırlık merkezindeki doğrusal hızını; $\dot{\vec{v}}_{c_i}$, i uzvunun ağırlık merkezindeki doğrusal ivmesini; $\vec{N}_i$,i uzvuna etki eden sürüklenme kuvvetini ifade etmektedir.

4.2 Kuvvet Denklemleri

Uzuvlar için yazılan denge denklemleri incelenerek kuvvet analizi yapılırsa, 3. uzuv ile 4. uzuv arasındaki etkileşim kuvveti için (4.7) denkleminden;

$$\vec{f}_{3,4}=m_4\dot{\vec{v}}_{c4}-\vec{F}_4 \tag{4.9}$$

yazılabilir. 2. uzuv ile 3.uzuv arasındaki etkileşim kuvveti denklemi de (4.5) denkleminden benzer şekilde yazılabilir:

$$\vec{f}_{2,3} = \vec{f}_{3,4} + m_3\dot{\vec{v}}_{c3} - \vec{F}_3 \tag{4.10}$$

(4.10) denkleminde $\vec{f}_{3,4}$ kuvveti (4.9) denkleminden yerine yazılırsa;

$$\vec{f}_{2,3} = (m_4\dot{\vec{v}}_{c4} + m_3\dot{\vec{v}}_{c3}) - (\vec{F}_4 + \vec{F}_3) \tag{4.11}$$

denklemi elde edilir. 1. uzuv ile 2. uzuv arasındaki etkileşim kuvveti de (4.3) denkleminden yazılabilir:

$$\vec{f}_{1,2} = \vec{f}_{2,3} + m_2\dot{\vec{v}}_{c2} - \vec{F}_2 \tag{4.12}$$

(4.12) denkleminde $\vec{f}_{2,3}$ kuvveti (4.11) denkleminden yerine yazılırsa;

$$\vec{f}_{1,2} = (m_4\dot{\vec{v}}_{c4} + m_3\dot{\vec{v}}_{c3} + m_2\dot{\vec{v}}_{c2}) - (\vec{F}_4 + \vec{F}_3 + \vec{F}_2) \tag{4.13}$$

denklemi elde edilir. (4.1) denklemi düzenlenerek $\vec{f}_{1,2}$ kuvveti eşitliğin bir tarafında yalnız kalacak şekilde yazılırsa;

$$\vec{f}_{1,2} = -m_1\dot{\vec{v}}_{c1} + \vec{F}_1 \tag{4.14}$$

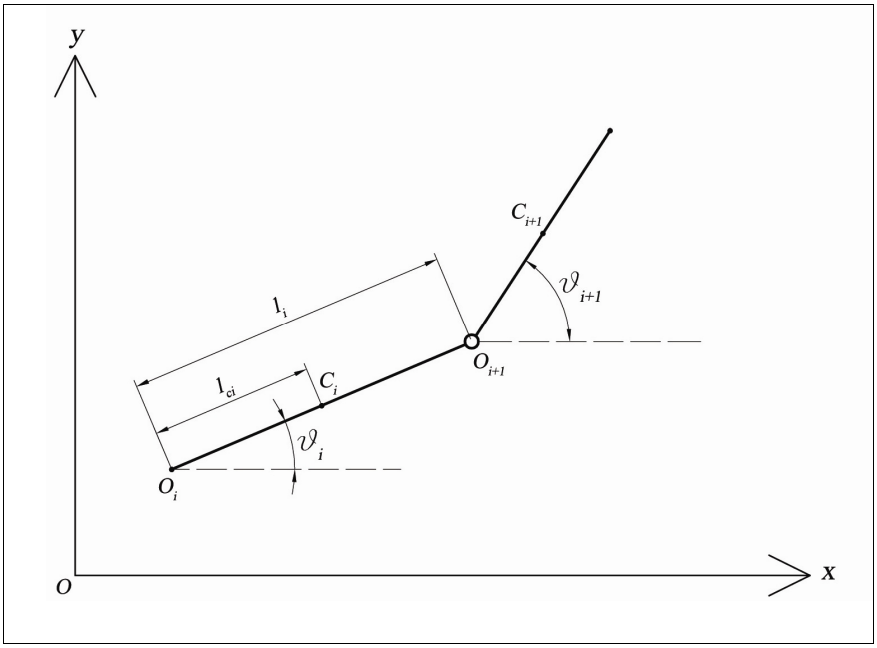
denklemi elde edilir. (4.14) numaralı ifade düzenlenerek tekrar yazılırsa;

$$m_1\dot{\vec{v}}_{c1} = \vec{F}_1 - \vec{f}_{1,2} \tag{4.15}$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadede $\vec{f}_{1,2}$ yerine (4.13) ifadesi yerleştirilirse;

$$m_1\dot{\vec{v}}_{c1} = -(m_4\dot{\vec{v}}_{c4} + m_3\dot{\vec{v}}_{c3} + m_2\dot{\vec{v}}_{c2}) + (\vec{F}_4 + \vec{F}_3 + \vec{F}_2 + \vec{F}_1) \tag{4.16}$$

elde edilir. Burada $(\vec{F}_4 + \vec{F}_3 + \vec{F}_2 + \vec{F}_1)$ ilk uzuv (gövde) için sürücü kuvvet, $-(m_4\dot{\vec{v}}_{c4} + m_3\dot{\vec{v}}_{c3} + m_2\dot{\vec{v}}_{c2})$ ise diğer uzuvlar için atalet kuvvetleridir.



Şekil 4.4 : i. ve i+1. uzuv için açılar ve uzunluklar

$\vec{v}_{c2}, \vec{v}_{c3}, \vec{v}_{c3}$ hızları $\vec{v}_{c1}$'den ardışık olarak elde edilebilir. Direkt kinematik çözümde konum ifadesi;

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{c_{i+1}} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{c_i} + \begin{bmatrix} l_{c_i}\cos\theta_i + (l_{i+1} - l_{c_{i+1}})\cos\theta_{i+1} \\ l_{c_i}\sin\theta_i + (l_{i+1} - l_{c_{i+1}})\sin\theta_{i+1} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(4.17)}$$

şeklinde yazılır. Burada l_i, i uzvunun uzunluğu; l_{c_i}, i uzvunun ağırlık merkezine kadar olan uzunluğudur. ϑ_i i uzvunun açısal yer değiştirmesi; ϑ_{i+1}, i+1 uzvunun açısal yer değiştirmesidir.

Bu ifadenin türevi alınarak her bir uzvun doğrusal hızı kendinden bir önceki uzvun doğrusal hızı ve iki uzuv arasındaki Δv doğrusal hız farkının toplamı şeklinde yazılabilir:

$$\vec{v}_{c_{i+1}} = \vec{v}_{c_i} + \Delta\vec{v}_{i,i+1} \qquad \textbf{(4.18)}$$

Burada $l_i - l_{ci} = l_{ci} = \frac{l_i}{2}$ olarak alındığında; $\Delta\vec{v}_{i,i+1}$ doğrusal hız farkları genel ifadesi şu şekilde açısal hızlar cinsinden yazılabilir:

$$\Delta\vec{v}_{i,i+1} = J_{i,i+1}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_i \\ \dot{\theta}_{i+1}\end{bmatrix} \tag{4.19}$$

Bu denklemler sonucunda her bir uzvun C_i ağırlık merkezindeki doğrusal hızı;

$$\vec{v}_{c_2} = \vec{v}_{c_1} + \Delta\vec{v}_{1,2} \tag{4.20}$$

$$\vec{v}_{c_3} = \vec{v}_{c_2} + \Delta\vec{v}_{2,3} = \vec{v}_{c_1} + (\Delta\vec{v}_{1,2} + \Delta\vec{v}_{2,3}) = \vec{v}_{c_1} + \Delta\vec{v}_{1,3} \tag{4.21}$$

$$\vec{v}_{c_4} = \vec{v}_{c_3} + \Delta\vec{v}_{3,4} = \vec{v}_{c_1} + (\Delta\vec{v}_{1,2} + \Delta\vec{v}_{2,3} + \Delta\vec{v}_{3,4}) = \vec{v}_{c_1} + \Delta\vec{v}_{1,4} \tag{4.22}$$

olarak ifade edilir. Bu ifadelerde doğrusal hız farkları sırasıyla;

$$\Delta\vec{v}_{1,2} = J_{1,2}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2\end{bmatrix} \tag{4.23}$$

$$\Delta\vec{v}_{2,3} = J_{2,3}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3\end{bmatrix} \tag{4.24}$$

$$\Delta\vec{v}_{3,4} = J_{3,4}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4\end{bmatrix} \tag{4.25}$$

ve bunlara ek olarak,

$$\Delta\vec{v}_{1,3} = \Delta\vec{v}_{1,2} + \Delta\vec{v}_{2,3} \tag{4.26}$$

$$\Delta\vec{v}_{1,4} = \Delta\vec{v}_{1,2} + \Delta\vec{v}_{2,3} + \Delta\vec{v}_{3,4} \tag{4.27}$$

şeklinde yazılır. Burada $\dot{\vartheta}_i$ i uzvunun açısal hızını ifade etmektedir.

Benzer şekilde ifadeler doğrusal ivmeler için de yazılabilir;

$$\dot{\vec{v}}_{c_2} = \dot{\vec{v}}_{c_1} + \Delta\dot{\vec{v}}_{1,2} \tag{4.28}$$

$$\dot{\vec{v}}_{c_3} = \dot{\vec{v}}_{c_1} + \Delta\dot{\vec{v}}_{1,3} \tag{4.29}$$

$$\dot{\vec{v}}_{c_4} = \dot{\vec{v}}_{c_1} + \Delta\dot{\vec{v}}_{1,4} \tag{4.30}$$

Benzer şekilde;

$$\Delta\dot{\vec{v}}_{1,3} = \Delta\dot{\vec{v}}_{1,2} + \Delta\dot{\vec{v}}_{2,3} \tag{4.31}$$

$$\Delta\dot{\vec{v}}_{1,4} = \Delta\dot{\vec{v}}_{1,2} + \Delta\dot{\vec{v}}_{2,3} + \Delta\dot{\vec{v}}_{3,4} \tag{4.32}$$

olarak ifade edilir. İvmeler için yazılan ifadeler (4.16) denkleminde yerlerine yerleştirilirse;

$$m_1\dot{\vec{v}}_{c1} = (\vec{F}_4 + \vec{F}_3 + \vec{F}_2 + \vec{F}_1) - (m_4(\dot{\vec{v}}_{c_1} + \Delta\dot{\vec{v}}_{1,4}) + m_3(\dot{\vec{v}}_{c_1} + \Delta\dot{\vec{v}}_{1,3}) + m_2(\dot{\vec{v}}_{c_1} + \Delta\dot{\vec{v}}_{1,2})) \tag{4.33}$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade düzenlendiğinde;

$$(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)\dot{\vec{v}}_{c1} = (\vec{F}_4 + \vec{F}_3 + \vec{F}_2 + \vec{F}_1) - (m_4\Delta\dot{\vec{v}}_{1,4} + m_3\Delta\dot{\vec{v}}_{1,3} + m_2\Delta\dot{\vec{v}}_{1,2}) \tag{4.34}$$

şeklini alır. 1. uzuv ile 2. uzuv arasındaki doğrusal hız farkı ifadesi açık olarak yazılırsa;

$$\Delta\vec{v}_{1,2} = J_{1,2}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_1\\ \dot{\theta}_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-l_{c_1}\dot{\theta}_1\sin\theta_1 - l_{c_2}\dot{\theta}_2\sin\theta_2\\ l_{c_1}\dot{\theta}_1\cos\theta_1 + l_{c_2}\dot{\theta}_2\cos\theta_2\end{bmatrix} \tag{4.35}$$

şeklini alır. Bu ifadenin zaman göre türevini alırsak;

$$\Delta\dot{\vec{v}}_{1,2}=\begin{bmatrix}-l_{c_1}\ddot{\theta}_1\sin\theta_1-l_{c_1}\dot{\theta}_1^{\,2}\cos\theta_1-l_{c_2}\ddot{\theta}_2\sin\theta_2-l_{c_2}\dot{\theta}_2^{\,2}\cos\theta_2\\ l_{c_1}\ddot{\theta}_1\cos\theta_1-l_{c_1}\dot{\theta}_1^{\,2}\sin\theta_1+l_{c_2}\ddot{\theta}_2\cos\theta_2-l_{c_2}\dot{\theta}_2^{\,2}\sin\theta_2\end{bmatrix} \tag{4.36}$$

elde edilir. Bu ifade 1. uzuv ile 2. uzuv arasındaki doğrusal ivme farkı ifadesidir. Bu ifade düzenlenir ve tekrar yazılırsa;

$$\Delta\dot{\vec{v}}_{1,2}=J_{1,2}\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_1\\ \ddot{\theta}_2\end{bmatrix}+C_{1,2}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_1^{\,2}\\ \dot{\theta}_2^{\,2}\end{bmatrix} \tag{4.37}$$

$\ddot{\vartheta}_i$ i uzvunun açısal ivmesini ifade etmektedir.

Bu ifadedeki $J_{1,2}$ ve $C_{1,2}$ katsayılarının ifadesi;

$$J_{1,2}=\begin{bmatrix}-l_{c_1}\sin\theta_1 & -l_{c_2}\sin\theta_2\\ l_{c_1}\cos\theta_1 & l_{c_2}\cos\theta_2\end{bmatrix} \tag{4.38}$$

$$C_{1,2}=\begin{bmatrix}-l_{c_1}\cos\theta_1 & -l_{c_2}\cos\theta_2\\ -l_{c_1}\sin\theta_1 & -l_{c_2}\sin\theta_2\end{bmatrix} \tag{4.39}$$

şeklindedir. (4.37), (4.38) ve (4.39) ifadeleri şu şekilde genelleştirilebilir;

$$\Delta\dot{\vec{v}}_{i,i+1}=J_{i,i+1}\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_i\\ \ddot{\theta}_{i+1}\end{bmatrix}+C_{i,i+1}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_i^{\,2}\\ \dot{\theta}_{i+1}^{\,2}\end{bmatrix} \tag{4.40}$$

$$J_{i,i+1}=\begin{bmatrix}-l_{c_i}\sin\theta_i & -l_{c_{i+1}}\sin\theta_{i+1}\\ l_{c_i}\cos\theta_i & l_{c_{i+1}}\cos\theta_{i+1}\end{bmatrix} \tag{4.41}$$

$$C_{i,i+1}=\begin{bmatrix}-l_{c_i}\cos\theta_i & -l_{c_{i+1}}\cos\theta_{i+1}\\ -l_{c_i}\sin\theta_i & -l_{c_{i+1}}\sin\theta_{i+1}\end{bmatrix} \tag{4.42}$$

(4.34) numaralı denklem yeniden yazılarak;

$$
\begin{aligned}
(m_1+m_2+m_3+m_4)\dot{\vec{v}}_{c1} = \\
&=(\vec{F}_4+\vec{F}_3+\vec{F}_2+\vec{F}_1)- \\
&-m_4(J_{1,2}\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_1\\ \ddot{\theta}_2\end{bmatrix}+C_{1,2}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_1^2\\ \dot{\theta}_2^2\end{bmatrix}+J_{2,3}\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_2\\ \ddot{\theta}_3\end{bmatrix}+C_{2,3}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_2^2\\ \dot{\theta}_3^2\end{bmatrix}+J_{3,4}\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_3\\ \ddot{\theta}_4\end{bmatrix}+C_{3,4}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_3^2\\ \dot{\theta}_4^2\end{bmatrix})- \\
&-m_3(J_{1,2}\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_1\\ \ddot{\theta}_2\end{bmatrix}+C_{1,2}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_1^2\\ \dot{\theta}_2^2\end{bmatrix}+J_{2,3}\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_2\\ \ddot{\theta}_3\end{bmatrix}+C_{2,3}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_2^2\\ \dot{\theta}_3^2\end{bmatrix})- \\
&-m_2(J_{1,2}\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_1\\ \ddot{\theta}_2\end{bmatrix}+C_{1,2}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_1^2\\ \dot{\theta}_2^2\end{bmatrix})
\end{aligned}
\qquad \textbf{(4.43)}
$$

elde edilir. Burada;

$$\mu_{2,4} = \frac{m_2 + m_3 + m_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} \qquad \textbf{(4.44)}$$

$$\mu_{3,4} = \frac{m_3 + m_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} \qquad \textbf{(4.45)}$$

$$\mu_4 = \frac{m_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} \qquad \textbf{(4.46)}$$

katsayıları tanımlanarak (4.43) denklemine yerleştirilirse $\dot{\vec{v}}_{c1}$ denklemi elde edilir:

$$\dot{\vec{v}}_{c_1} =$$

$$= \left(\frac{1}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}\right)(\vec{F}_4 + \vec{F}_3 + \vec{F}_2 + \vec{F}_1) -$$

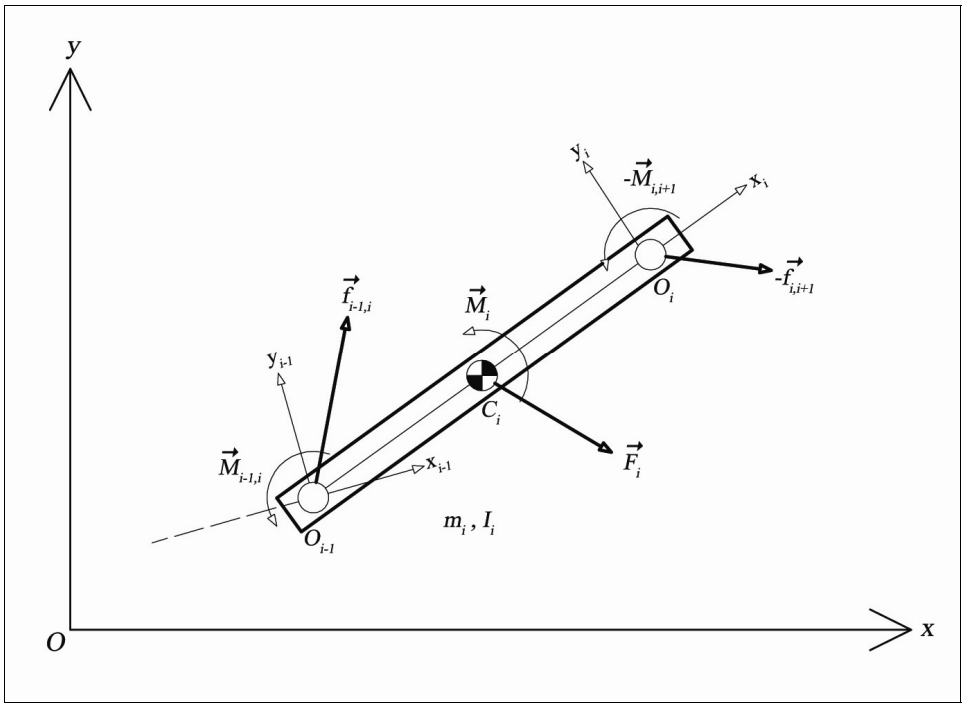
$$- \mu_4 \left(J_{3,4}\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4\end{bmatrix} + C_{3,4}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_3^{\,2} \\ \dot{\theta}_4^{\,2}\end{bmatrix}\right) -$$

$$- \mu_{3,4} \left(J_{2,3}\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3\end{bmatrix} + C_{2,3}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_2^{\,2} \\ \dot{\theta}_3^{\,2}\end{bmatrix}\right) -$$

$$- \mu_{2,4} \left(J_{1,2}\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2\end{bmatrix} + C_{1,2}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_1^{\,2} \\ \dot{\theta}_2^{\,2}\end{bmatrix}\right) \qquad \textbf{(4.47)}$$

4.3 Moment Denklemleri

Serbest cisim Newton-Euler formülasyonunda i. uzuv için moment ifadesi şu şekilde yazılır:



Şekil 4.5 : i. uzuv için moment ve kuvvetler

$$\vec{M}_{i-1,i} - \vec{M}_{i,i+1} + \vec{M}_i + (\overrightarrow{C_i O_{i-1}}) \times \vec{f}_{i-1,i} + (\overrightarrow{C_i O_i}) \times (-\vec{f}_{i,i+1}) - I_i \dot{\vec{\omega}}_i = 0 \qquad \textbf{(4.48)}$$

Bu denklemdeki $\overline{C_iO_{i-1}}$ ve $\overline{C_iO_i}$ vektörleri şu şekilde ifade edilebilir;

$$\overrightarrow{C_iO_{i-1}} = -(l_i - l_{c_i})\vec{n}_i \tag{4.49}$$

$$\overrightarrow{C_iO_i} = l_{c_i}\vec{n}_i \tag{4.50}$$

Bu tez kapsamındaki çalışmada $l_i - l_{ci} = l_{ci} = \frac{l_i}{2}$ şekilde ifade edilebilmektedir.

$$\underline{\underline{R}}_i^0 = \begin{bmatrix}\vec{n}_i & \vec{t}_i\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\cos\theta_i & -\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\end{bmatrix} \tag{4.51}$$

şeklinde tanımlanırsa, $\overline{C_iO_{i-1}}$ ve $\overline{C_iO_i}$ vektörleri ifadesinde (4.51) ifadesi yerine yerleştirilirse;

$$\overrightarrow{C_iO_{i-1}} = \underline{\underline{R}}_i^0 \begin{bmatrix}-l_{c_i} \\ 0\end{bmatrix} \tag{4.52}$$

$$\overrightarrow{C_iO_i} = \underline{\underline{R}}_i^0 \begin{bmatrix}l_{c_i} \\ 0\end{bmatrix} \tag{4.53}$$

elde edilir. (4.52) ve (4.53) ifadeleri açılarak tekrar yazılırsa;

$$\overrightarrow{C_iO_{i-1}} = \begin{bmatrix}-l_{c_i}\cos\theta_i \\ -l_{c_i}\sin\theta_i\end{bmatrix} \tag{4.54}$$

$$\overrightarrow{C_iO_i} = \begin{bmatrix}l_{c_i}\cos\theta_i \\ l_{c_i}\sin\theta_i\end{bmatrix} \tag{4.55}$$

ifadeleri elde edilir. Moment denklemleri için gerekli olan vektörel çarpım hesaplanırsa;

$$\overrightarrow{C_iO_{i-1}} \times \vec{f}_{i-1,i} = -l_{c_i} \begin{bmatrix} \cos\theta_i \\ \sin\theta_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix}_{i-1,i} \tag{4.56}$$

$$\overrightarrow{C_iO_i} \times (-\vec{f}_{i,i+1}) = l_{c_i} \begin{bmatrix} \cos\theta_i \\ \sin\theta_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -f_x \\ -f_y \end{bmatrix}_{i,i+1} \tag{4.57}$$

ifadeleri elde edilir. Moment ifadelerinde bu iki vektörel çarpımın toplandığı bir ifade söz konusudur. Bu toplam ifade hesaplandığında;

$$\begin{aligned} (\overrightarrow{C_iO_{i-1}}) \times (\vec{f}_{i-1,i}) + (\overrightarrow{C_iO_i}) \times (-\vec{f}_{i,i+1}) &= -l_{c_i} \begin{bmatrix} \cos\theta_i \\ \sin\theta_i \end{bmatrix} \times \left[\vec{f}_{i-1,i} + \vec{f}_{i,i+1} \right] \\ &= (-l_{c_i}) \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \cos\theta_i & \sin\theta_i & 0 \\ f_x & f_y & 0 \end{vmatrix} \\ &= -(l_{c_i})(f_y \cos\theta_i - f_x \sin\theta_i)\vec{k} \\ &= (-l_{c_i})\vec{f}^T\vec{t}_i = (-l_{c_i}) \begin{bmatrix} f_x & f_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin\theta_i \\ \cos\theta_i \end{bmatrix} \vec{k} \\ &= (-l_{c_i})(\vec{f}_{i-1,i} + \vec{f}_{i,i+1})^T \vec{t}_i \vec{k} \end{aligned} \tag{4.58}$$

Bu ifadeler de kullanılarak moment dengesi şu şekilde tekrar yazılabilir;

$$(M_{i-1,i} - M_{i,i+1} + M_i - l_{c_i}(\vec{f}_{i-1,i} + \vec{f}_{i,i+1})^T \vec{t}_i - I_i\dot{\omega}_i)\vec{k} = 0 \tag{4.59}$$

Bütün moment ifadesi bileşenleri $\vec{k}$ vektörü($\vec{n}_i, \vec{t}_i$'ye dik olan birim vektör) boyunca yer aldığından 4 skaler denklem mekanizmanın rotasyonel dinamiğini tanımlar.

1. uzuv için $M_{0.1} = 0$ ve $\vec{f}_{0,1} = 0$'dır. Bu uzuv için moment denklemi yazıldığında;

$$-M_{1,2} + M_1 - l_{c_1}\vec{f}_{1,2}^{\,T}\vec{t}_1 - I_1\dot{\omega}_1 = 0 \tag{4.60}$$

elde edilir. Benzer şekilde (4.59) denklemi kullanılarak 2. ve 3. uzuv için moment denklemi yazıldığında;

$$M_{1,2} - M_{2,3} + M_2 - l_{c_2}(\vec{f}_{1,2} + \vec{f}_{2,3})^T \vec{t}_2 - I_2\dot{\omega}_2 = 0 \quad \textbf{(4.61)}$$

$$M_{2,3} - M_{3,4} + M_3 - l_{c_3}(\vec{f}_{2,3} + \vec{f}_{3,4})^T \vec{t}_3 - I_3\dot{\omega}_3 = 0 \quad \textbf{(4.62)}$$

4. uzuv için $M_{4,5} = 0$ ve $\vec{f}_{4,5} = 0$ 'dır. Bu uzuv için moment denklemi yazıldığında;

$$M_{3,4} + M_4 - l_{c_4}\vec{f}_{3,4}{}^T\vec{t}_4 - I_4\dot{\omega}_4 = 0 \quad \textbf{(4.63)}$$

Tüm uzuvlar için yazılan moment ifadeleri düzenlenirse;

$$M_{3,4} = I_4\ddot{\theta}_4 + l_{c_4}\vec{f}_{3,4}{}^T\vec{t}_4 - M_4 \quad \textbf{(4.64)}$$

$$M_{2,3} = I_4\ddot{\theta}_4 + I_3\ddot{\theta}_3 + l_{c_4}\vec{f}_{3,4}{}^T\vec{t}_4 + l_{c_3}(\vec{f}_{2,3} + \vec{f}_{3,4})^T\vec{t}_3 - (M_4 + M_3) \quad \textbf{(4.65)}$$

$$\begin{aligned} M_{1,2} = {} & I_4\ddot{\theta}_4 + I_3\ddot{\theta}_3 + I_2\ddot{\theta}_2 + \\ & + l_{c_4}\vec{f}_{3,4}{}^T\vec{t}_4 + l_{c_3}(\vec{f}_{2,3} + \vec{f}_{3,4})^T\vec{t}_3 + l_{c_2}(\vec{f}_{1,2} + \vec{f}_{2,3})^T\vec{t}_2 - \\ & - (M_4 + M_3 + M_2) \end{aligned} \quad \textbf{(4.66)}$$

denklem takımı elde edilir. (4.60) denklemindeki $M_{1,2}$ terimi (4.66) denklemindeki şekliyle yazıldığında;

$$\begin{aligned} I_1\ddot{\theta}_1 = {} & -(I_4\ddot{\theta}_4 + I_3\ddot{\theta}_3 + I_2\ddot{\theta}_2) - \\ & - l_{c_4}\vec{f}_{3,4}{}^T\vec{t}_4 - l_{c_3}(\vec{f}_{2,3} + \vec{f}_{3,4})^T\vec{t}_3 - l_{c_2}(\vec{f}_{1,2} + \vec{f}_{2,3})^T\vec{t}_2 - l_{c_1}\vec{f}_{1,2}{}^T\vec{t}_1 + \\ & + (M_4 + M_3 + M_2 + M_1) \end{aligned} \quad \textbf{(4.67)}$$

denklemi elde edilir. Bu ifadedeki tüm vektörler ve rotasyonlar başlangıç eksen takımına göre tanımlanmıştır.

Rölatif hareketleri şu şekilde ifadelere dahil edebiliriz;

2. uzuv için;

$$\theta_2 = \theta_1 + \theta_{1,2} \longrightarrow \dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_{1,2} \longrightarrow \ddot{\theta}_2 = \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_{1,2} \tag{4.68}$$

3. uzuv için;

$$\theta_3 = \theta_2 + \theta_{2,3} \longrightarrow \dot{\theta}_3 = \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_{2,3} \longrightarrow \ddot{\theta}_3 = \ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_{2,3} \tag{4.69}$$

veya,

$$\theta_3 = \theta_1 + \theta_{1,2} + \theta_{2,3} \longrightarrow \dot{\theta}_3 = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_{1,2} + \dot{\theta}_{2,3} \longrightarrow \ddot{\theta}_3 = \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_{1,2} + \ddot{\theta}_{2,3} \tag{4.70}$$

4. uzuv için;

$$\theta_4 = \theta_3 + \theta_{3,4} \longrightarrow \dot{\theta}_4 = \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_{3,4} \longrightarrow \ddot{\theta}_4 = \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_{3,4} \tag{4.71}$$

veya,

$$\theta_4 = \theta_1 + \theta_{1,2} + \theta_{2,3} + \theta_{3,4} \longrightarrow \dot{\theta}_4 = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_{1,2} + \dot{\theta}_{2,3} + \dot{\theta}_{3,4} \longrightarrow \ddot{\theta}_4 = \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_{1,2} + \ddot{\theta}_{2,3} + \ddot{\theta}_{3,4} \tag{4.72}$$

Gövde olan 1. uzvun hareketini dikkate aldığımızda, mekanizma için bilinen girişler $\ddot{\theta}_{3,4}(t); \dot{\theta}_{3,4}(t); \theta_{3,4}(t)$; $\ddot{\theta}_{2,3}(t); \dot{\theta}_{2,3}(t); \theta_{2,3}(t)$ ve $\ddot{\theta}_{1,2}(t); \dot{\theta}_{1,2}(t); \theta_{1,2}(t)$ yörüngeleri olacaktır. Bu girişlere karşılık $\theta_1, \dot{\theta}_1$ ve $\vec{v}_{c1}$ mekanizma için çıkışlar olacaktır.

(4.68), (4.70) ve (4.72) ifadelerini (4.67) ifadesinde yerine yerleştirirsek;

$$I_1\ddot{\theta}_1 = -(I_4(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_{1,2} + \ddot{\theta}_{2,3} + \ddot{\theta}_{3,4}) + I_3(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_{1,2} + \ddot{\theta}_{2,3}) + I_2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_{1,2})) +$$
$$+ (M_4 + M_3 + M_2 + M_1) -$$
$$- (l_{c_4}\vec{f}_{3,4}{}^T\vec{t}_4 + l_{c_3}(\vec{f}_{2,3} + \vec{f}_{3,4})^T\vec{t}_3 + l_{c_2}(\vec{f}_{1,2} + \vec{f}_{2,3})^T\vec{t}_2 + l_{c_1}\vec{f}_{1,2}{}^T\vec{t}_1) \quad \textbf{(4.73)}$$

$$M_i = -b_{r_i}\dot{\theta}_i \quad \textbf{(4.74)}$$

olarak alınır ve $\sum M_i$ ifadesi yazılırsa;

$$M_1 + M_2 + M_3 + M_4 = -b_{r_1}\dot{\theta}_1 -$$
$$- b_{r_2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_{1,2}) -$$
$$- b_{r_3}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_{1,2} + \dot{\theta}_{2,3}) -$$
$$- b_{r_4}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_{1,2} + \dot{\theta}_{2,3} + \dot{\theta}_{3,4}) \quad \textbf{(4.75)}$$

(4.73) ifadesinin düzenlenmesi amacıyla β ve γ katsayıları tanımlanırsa;

$$\beta = \frac{\sum b_r}{\sum I_i} \quad \textbf{(4.76)}$$

$$\beta_{2,4} = \frac{b_{r_2} + b_{r_3} + b_{r_4}}{\sum I_i} \quad \textbf{(4.77)}$$

$$\beta_{3,4} = \frac{b_{r_3} + b_{r_4}}{\sum I_i} \quad \textbf{(4.78)}$$

$$\beta_4 = \frac{b_{r_4}}{\sum I_i} \quad \textbf{(4.79)}$$

$$\gamma_{2,4} = \frac{I_2 + I_3 + I_4}{\sum I_i} \quad \textbf{(4.80)}$$

$$\gamma_{3,4} = \frac{I_3 + I_4}{\sum I_i} \tag{4.81}$$

$$\gamma_4 = \frac{I_4}{\sum I_i} \tag{4.82}$$

(4.73) denklemi bu katsayılar eşliğinde yeniden yazılırsa;

$$\begin{aligned}\ddot{\theta}_1 = &-\beta\dot{\theta}_1 - \\ &-\left(\frac{(l_{c_4}\vec{f}_{3,4}{}^T\vec{t}_4 + l_{c_3}(\vec{f}_{2,3}+\vec{f}_{3,4})^T\vec{t}_3 + l_{c_2}(\vec{f}_{1,2}+\vec{f}_{2,3})^T\vec{t}_2 + l_{c_1}\vec{f}_{1,2}{}^T\vec{t}_1)}{\sum I_i}\right) - \\ &-(\gamma_{2,4}\ddot{\theta}_{1,2} + \gamma_{3,4}\ddot{\theta}_{2,3} + \gamma_4\ddot{\theta}_{3,4}) - (\beta_{2,4}\dot{\theta}_{1,2} + \beta_{3,4}\dot{\theta}_{2,3} + \beta_4\dot{\theta}_{3,4})\end{aligned} \tag{4.83}$$

Hız dinamiğindeki ana interaksiyon terimi;

$$-\left(\frac{1}{\sum I_i}\right)(l_{c_4}\vec{f}_{3,4}{}^T\vec{t}_4 + l_{c_3}(\vec{f}_{2,3}+\vec{f}_{3,4})^T\vec{t}_3 + l_{c_2}(\vec{f}_{1,2}+\vec{f}_{2,3})^T\vec{t}_2 + l_{c_1}\vec{f}_{1,2}{}^T\vec{t}_1) \tag{4.84}$$

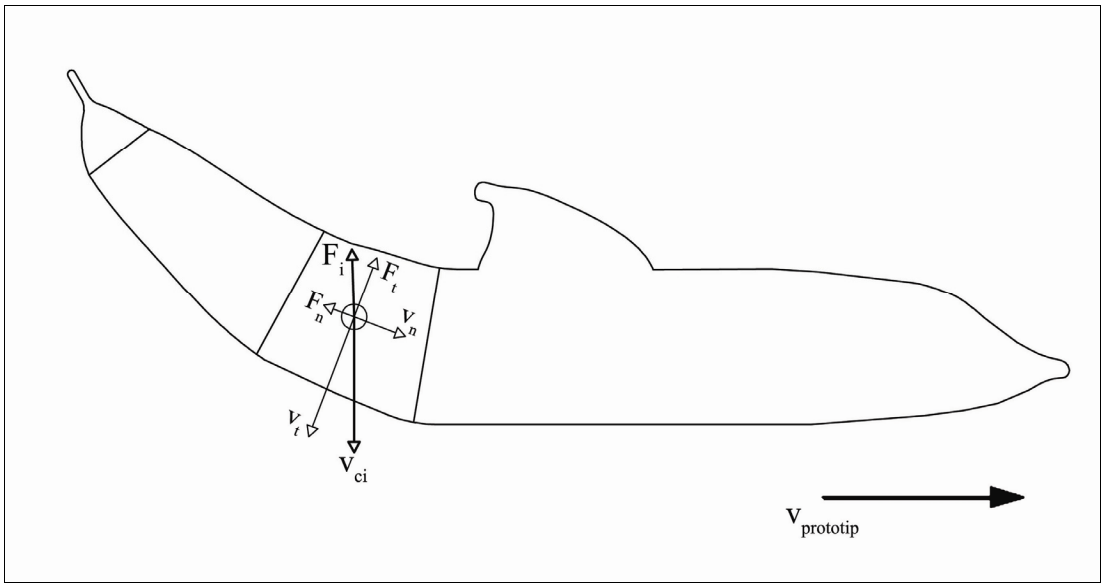
olacaktır.

4.4 Sürüklenme Kuvvetlerinin İfadesi

Sürüklenme kuvvetinin sadece sürtünmelerden kaynaklandığı ve basıncın sürüklenme üzerindeki etkisinin çok düşük olduğu dikkate alındığında yunusun düşük hızlardaki hareketi için sürüklenme kuvvetinin laminer akış için viskoz sürtünme kuvvetlerinden oluştuğu varsayılabilir. Yunusun yüksek hızlardaki hareketi için ise sürüklenme kuvvetinin türbülanslı akış için sürtünme kuvvetlerinden oluştuğu varsayılabilir.

Eksenel sürtünme kuvveti $\vec{F}_n$ ve yanal sürtünme kuvveti $\vec{F}_t$ olmak üzere toplam sürtünme kuvveti $\vec{F}_i$ bu iki kuvvetin toplamı olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$\vec{F}_i = \vec{F}_n + \vec{F}_t \tag{4.85}$$



Şekil 4.6 : Uzuv sürüklenme kuvvetinin uzuv hızına bağlı ifadesinin gösterimi

4.4.1 Laminer akışta viskoz sürtünme

Akışkan içinde düşük hızda hareket halinde eksenel sürtünme kuvveti $\vec{F}_n$'in, sadece $\vec{v}_n$'in fonksiyonu olduğu ve yanal sürtünme kuvveti $\vec{F}_t$'in, sadece $\vec{v}_t$'nin fonksiyonu olduğu varsayılırsa;

$$\vec{F}_n = -b_n \vec{v}_n \tag{4.86}$$

$$\vec{F}_t = -b_t \vec{v}_t \tag{4.87}$$

ifadeleri elde edilir. Burada b_n laminer akış için uzvun eksenel, b_t ise yanal sürtünme katsayısıdır.

Yanal ve eksenel kuvvetlerin ifadeleri $\vec{F}_i$ ifadesinde yerlerine yazılırsa;

$$\vec{F}_i = -b_n \|\vec{v}_n\| \vec{n} - b_t \|\vec{v}_t\| \vec{t} \tag{4.88}$$

denklemi elde edilir. Bu ifade düzenlenerek yazıldığında;

$$\vec{F}_i = -\underline{\underline{R}}_i^0 \begin{bmatrix} b_n & 0 \\ 0 & b_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_n \\ v_t \end{bmatrix} \tag{4.89}$$

ifadesi elde edilir. Burada $\underline{\underline{R}}_i^0$, (4.51) denklemi ile ifade edilen rotasyon matrisidir.

$$\begin{bmatrix} v_n \\ v_t \end{bmatrix} = \left(\underline{\underline{R}}_i^0\right)^T \vec{v}_i \tag{4.90}$$

şeklinde yazılabilir.Bu ifade (4.89) denkleminde yerine yerleştirildiğinde $\vec{F}_i$ laminer akış için viskoz sürtünme kuvveti ifadesi elde edilmiş olur:

$$\vec{F}_i = -\underline{\underline{R}}_i^0 \, \underline{\underline{B}} \left(\underline{\underline{R}}_i^0\right)^T \vec{v}_i \tag{4.91}$$

Burada $b_n << b_t$ olacak şekilde $\underline{\underline{B}}$ ifadesi;

$$\underline{\underline{B}} = \begin{bmatrix} b_n & 0 \\ 0 & b_t \end{bmatrix} \tag{4.92}$$

şeklindedir.

4.4.2 Türbülanslı akış sürtünme kuvvetleri

Akışkan içinde yüksek hızda harekette toplam sürtünme kuvveti $\vec{F}_i$ şu şekilde ifade edilebilir:

$$\vec{F}_i = \left\|\vec{F}_n\right\|\vec{n} + \left\|\vec{F}_t\right\|\vec{t} = \begin{bmatrix} \vec{n} & \vec{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left\|\vec{F}_n\right\| \\ \left\|\vec{F}_t\right\| \end{bmatrix} \tag{4.93}$$

$\begin{bmatrix} \vec{n} & \vec{t} \end{bmatrix}$ ifadesi $\underline{\underline{R}}_i^0$ rotasyon matrisine eşdeğerdir.

$$\vec{F}_i = \underline{\underline{R}}_i^0 \begin{bmatrix} \|\vec{F}_n\| \\ \|\vec{F}_t\| \end{bmatrix} \tag{4.94}$$

Burada türbülanslı akış için eksenel sürtünme kuvveti $\vec{F}_n$'in , sadece $v_n^{\,2}$'in fonksiyonu olduğu ve yanal sürtünme kuvveti $\vec{F}_t$'in , sadece $v_t^{\,2}$'nin fonksiyonu olduğu varsayılırsa;

$$\|\vec{F}_n\| = -d_n \|v_n\|^2 \tag{4.95}$$

$$\|\vec{F}_t\| = -d_t \|v_t\|^2 \tag{4.96}$$

ifadeleri elde edilir. Burada d_n türbülanslı akış için uzvun eksenel, d_t ise yanal sürtünme katsayısıdır.

Toplam sürtünme kuvveti ifadesi bu ifadeler ışığında ve (4.94) denklemine göre tekrar yazılırsa;

$$\vec{F}_i = -\underline{\underline{R}}_i^0 \begin{bmatrix} d_n v_n^{\,2} \\ d_t v_t^{\,2} \end{bmatrix} = -\underline{\underline{R}}_i^0 \begin{bmatrix} d_n & 0 \\ 0 & d_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_n & 0 \\ 0 & v_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_n \\ v_t \end{bmatrix} \tag{4.97}$$

elde edilir. Bu ifadede $\begin{bmatrix} v_n \\ v_t \end{bmatrix}$ ifadesi şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} v_n \\ v_t \end{bmatrix} = \left(\underline{\underline{R}}_i^0\right)^T \vec{v}_i = \begin{bmatrix} \vec{n}^T \\ \vec{t}^T \end{bmatrix} \vec{v}_I = \begin{bmatrix} \vec{n}^T \vec{v}_i \\ \vec{t}^T \vec{v}_i \end{bmatrix} \tag{4.98}$$

(4.98) ifadesi toplam sürtünme kuvveti ifadesinde yerine koyulduğunda;

$$\vec{F}_i = -\underline{\underline{R}}_i^0 \underline{\underline{D}} \begin{bmatrix} \vec{n}^T \vec{v}_i & 0 \\ 0 & \vec{t}^T \vec{v}_i \end{bmatrix} \left(\underline{\underline{R}}_i^0\right)^T \vec{v}_i \tag{4.99}$$

elde edilir. Burada $d_n << d_t$ olacak şekilde $\underline{\underline{D}}$ ifadesi;

$$\underline{\underline{D}} = \begin{bmatrix} d_n & 0 \\ 0 & d_t \end{bmatrix} \qquad \textbf{(4.100)}$$

şeklindedir.

5. BENZETİM

Oluşturulan matematik modelin de yardımıyla yunus yüzme hareketlerini ayrıntılı bir şekilde inceleyebilmek için benzetim programı tasarlanmıştır. Bu şekilde yunusun hareketinde etkili olan parametreleri etkin bir şekilde gözlemlemek mümkün olacaktır.

Benzetim programının yapısı ileride yapılacak çalışmalarda kolaylıkla kullanılabilecek şekilde mümkün olduğunca anlaşılabilir, yalın ve esnek olarak tasarlanmıştır.

5.1 Benzetim Ortamı

Benzetim çalışmaları MATLAB® programı 7.0 versiyonu kullanılarak yapılmıştır. Yunus benzetim modeli, MATLAB® programı içinde bulunan Simulink programındaki parçalar yardımıyla oluşturulmuştur. Bu programın seçilmesinin sebebi programın yapısının sistemin bileşenlerine uygun olmasıdır.

5.2 Benzetim Programı

Benzetim programının ara yüz görüntüsü Ek_B'de verilmiştir.

Benzetim programında girişler matematik modelin sunulduğu bölümde ifade edildiği şekilde $\ddot{\theta}_{i,i+1}(t); \dot{\theta}_{i,i+1}(t); \theta_{i,i+1}(t)$ yörüngeleridir. Bu giriş yörüngelerine karşılık gelen sistem çıkışları $v_{c1}; \theta_1; \dot{\theta}_1$ ile ileri yöndeki hareketi sağlayan itme kuvveti olacaktır.

Programda giriş yörüngeleri $\theta_{i,i+1\max}\cos(2\pi ft + \varphi_i)$ şeklinde kosinüs harmonik fonksiyonu olarak verilmiştir. Burada φ_i uzuvlar arasındaki faz farkları; t zaman; f ise hareketin frekansıdır.

Benzetim programının yapısı temelde yunusun matematiksel modelindeki tüm ifadeleri içeren bir model içine yerleştirilmiş bir fonksiyon bloğuna dayanmaktadır.

Bu fonksiyon bloğunun girişlerini 1. uzvun x ve y doğrultusundaki doğrusal hız ve ivmesi; uzuvların birbirlerine göre açıları, açısal hızları ve açısal ivmeleri; uzuvların açıları kullanılarak elde edilen sinüs ve kosinüs değerleri ile 1. uzvun açısal hız ve ivme değerleri oluşturmaktadır. Bu girişlere karşılık çıkış değerleri temel olarak 1. uzuv için x ve y doğrultusundaki doğrusal ivme ve açısal ivme değerleri olacaktır. 1. uzuv için x ve y doğrultusundaki doğrusal ivme değeri integrasyon bloğu yardımıyla entegre edilmekte ve doğrusal hız değerleri elde edilmektedir. Elde edilen doğrusal hız değerleri, doğrusal ivme değerleri ile birlikte bir sonraki adımdaki hesaplamalar için fonksiyon bloğuna giriş olarak geri dönmektedir. Benzer şekilde 1. uzuv için açısal ivme değeri integrasyon bloğu yardımıyla integre edilmekte ve 1. uzuv için açısal hız değerleri elde edilmektedir. Bu değer tekrar integre edilerek 1. uzuv için açı değeri elde edilmektedir. Bu 1. uzuv için açısal ivme, açısal hız ve açı değerleri bir sonraki adımdaki hesaplamalar için fonksiyon bloğuna giriş olarak geri dönmektedir.

Birinci uzvun ağırlık merkezinin hızı v_{c1}, aynı zamanda yunusun hızını vermektedir. Yunusun birinci uzvu ile ikinci uzvu arasındaki etkileşim kuvveti ile aynı büyüklükte fakat ters yönde oluşan kuvvetin x yönündeki bileşeni ise yunusun ileri doğru itme kuvvetidir.

Böylelikle sistemden elde edilen çıkışlar bir sonraki hesap adımındaki hesaplamalarda kullanılacak değerleri ve yunusun yüzmesi ile ilgili önemli iki parametre olan yunusun hızı ile itme kuvveti değerlerini vermektedir.

İTÜ Makine Fakültesi bünyesinde önceki çalışmalar sonucunda tasarlanan yunus prototipinin konstrüktif tasarımı sonucunda elde edilen veriler ışığında birinci uzuv ile x ekseni arasındaki açının en büyük değeri $\frac{\pi}{7.2}$ radyan, en küçük değeri $-\frac{\pi}{7.2}$ radyan olabilir. Benzer şekilde her bir uzvun kendisinden bir önceki uzuv ile arasındaki açı değeri en büyük değeri $\frac{\pi}{7.2}$ radyan, en küçük değeri $-\frac{\pi}{7.2}$ radyan olabilir.

Bu sebeple her bir açı değeri bu en büyük ve en küçük açı değerleriyle sınırlandırılmıştır. Herhangi bir uzvun açı değerinin bu değerleri aşması halinde açı değeri sınır değerinde kalacaktır.

Sistemde yer alan katsayılar arasında boyut farkı olmadığından benzetim programında ölçeklendirme yapılmasına gerek duyulmamıştır.

Benzetim programında hesap adımının seçimi sonuçların doğruluğu açısından önem taşımaktadır. Hesap adımı, hareketlerin frekanslarına bağlı olarak programın hassasiyetini bozmayacak en büyük değerde alınmıştır. Çözücü olarak Runge-Kutta IV yöntemi seçilmiştir.

Benzetim programının koşturulması sırasında hesaplanan $\ddot{\theta}_1, \dot{\theta}_1, \theta_1, v_{c1}$ ile itme kuvveti gibi değişkenler daha sonra gerekli grafikleri çizdirebilmek amacıyla MATLAB® programının çalışma alanı içinde hafızaya atılmaktadır.

Benzetim programında kullanılan uzuvlara ait parametreler İTÜ Makine Fakültesi bünyesinde Dalyan ve diğ. (2004) ve Doğangil ve Özçiçek (2005) tarafından yapılan yunus prototipi göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Uzuvların sürtünme katsayıları ise benzer şekilde yunus prototipinin yapısı göz önünde bulundurularak tahmini olarak belirlenmiştir.

5.3 Yerleştirilmiş Fonksiyon Bloğu

Benzetim programı içine yerleştirilmiş olan temel fonksiyon bloğunun iç yapısı Ek_A'da ayrıntılı olarak verilmiştir.

Bu blok içinde öncelikli olarak giriş ve çıkış parametreleri tanımlanmakta, daha sonra hesaplamalar için gerekli olan uzuvlara ait çeşitli büyüklükler ve katsayılar verilmektedir. Daha sonra matematiksel model temel alınarak çıkış değerlerini hesaplamak üzere çeşitli ifadeler ve denklemler alt alta sıralanmıştır.

6. YUNUS YÜZME DAVRANIŞLARININ OPTİMİZASYONU

Optimizasyon "en iyi duruma getirme" anlamını taşımaktadır. Optimizasyon sonucunda elde edilen veriler ileride yapılacak yunus robot tasarımlarında kullanılarak, istenen sonuçlara daha kolay ulaşılmasını sağlayacaktır.

Yunus yüzme modelinde 1. uzuv gövdeyi temsil etmektedir ve kararlı platform oluşturmak üzere bu uzvun x ekseni ile arasındaki açının değişimlerinin minimumda tutulması gerekmektedir. 2. uzuv gövdeye iletilecek momenti en küçük yapan karşı moment uzvudur. 3. uzuv ise kuyruğu temsil eden 4. uzvun hareketini veren temel uzuvdur.

Yunus yüzme davranışlarının optimize edilmesi, yunusun yüzmesini sağlayacak olan itme kuvvetini en büyük ve 1. uzvun açı değerindeki değişimleri en küçük yapacak hareket koordinasyonunun belirlenmesi olarak algılanmalıdır.

6.1 Senaryo 1

İlk senaryoda yunusun içinde bulunduğu akışkanın hızının sıfır olduğu ve akışın laminer olduğu durum için çalışmalar yapılmıştır.

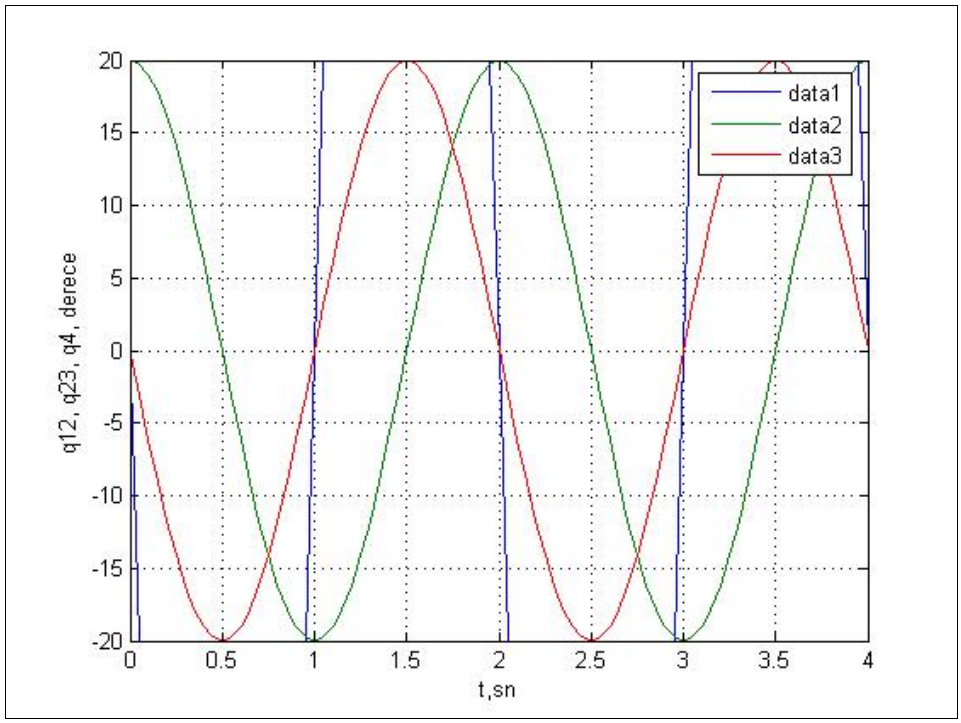
İTÜ Makine Fakültesi bünyesinde Dalyan ve diğ. (2004) ve Doğangil ve Özçiçek (2005) tarafından yapılan çalışmaların ışığında bu durum için giriş yörüngelerindeki uzuv en büyük açı değerlerinin $\frac{\pi}{9}$ radyan alınması uygundur.

Yunus yüzme hareketleri de göz önünde bulundurularak giriş yörüngeleri için çeşitli faz farkı kombinasyonları denenmiş; optimizasyon amaçları doğrultusunda en iyi sonuçları veren kombinasyon seçilmiştir.

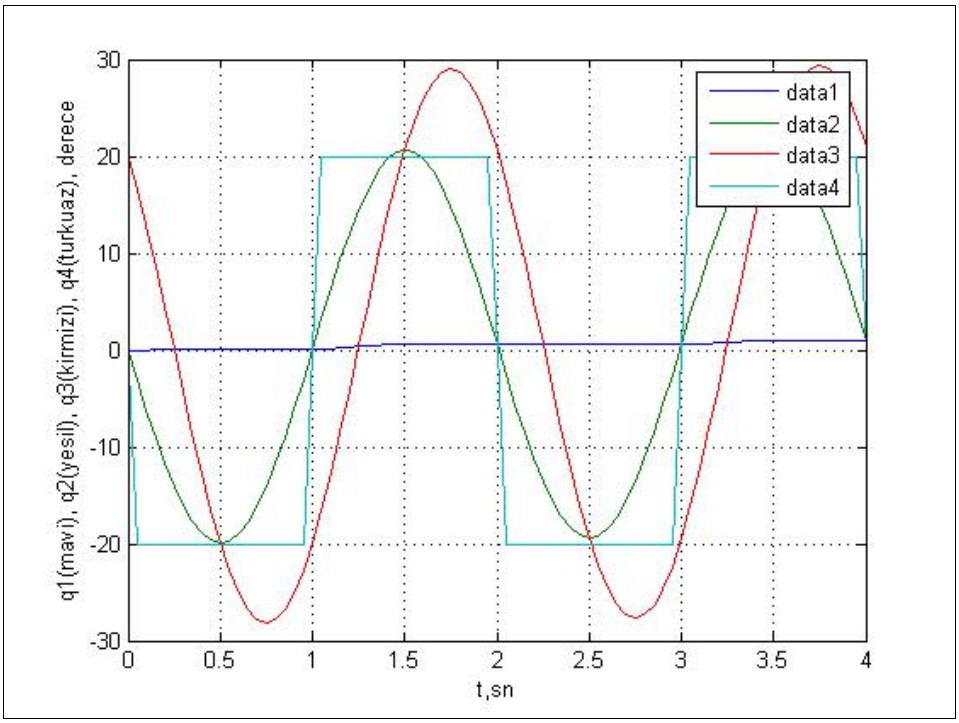
Bu senaryo için $\theta_{3,4}(t)$ yerine kuyruk uzvunun x ekseni ile arasındaki açı değeri olan $\theta_4(t)$'nin doğrudan giriş yörüngesi olarak sisteme verilmesinin daha uygun

olacağı görülmüştür. Çalışmalar sonucunda bu açı değerinin çeyrek periyot boyunca en büyük değerinde kalarak, çeyrek periyodun sonunda mümkün olduğunca hızlı şekilde en küçük radyan değerini alıp çeyrek periyot boyunca da bu değerde kaldığı, böylelikle bir pompa elemanı gibi çalıştığı durumda yunusun pozitif ortalama itme kuvvetleri elde ettiği ve pozitif hız ile yüzdüğü görülmüştür.

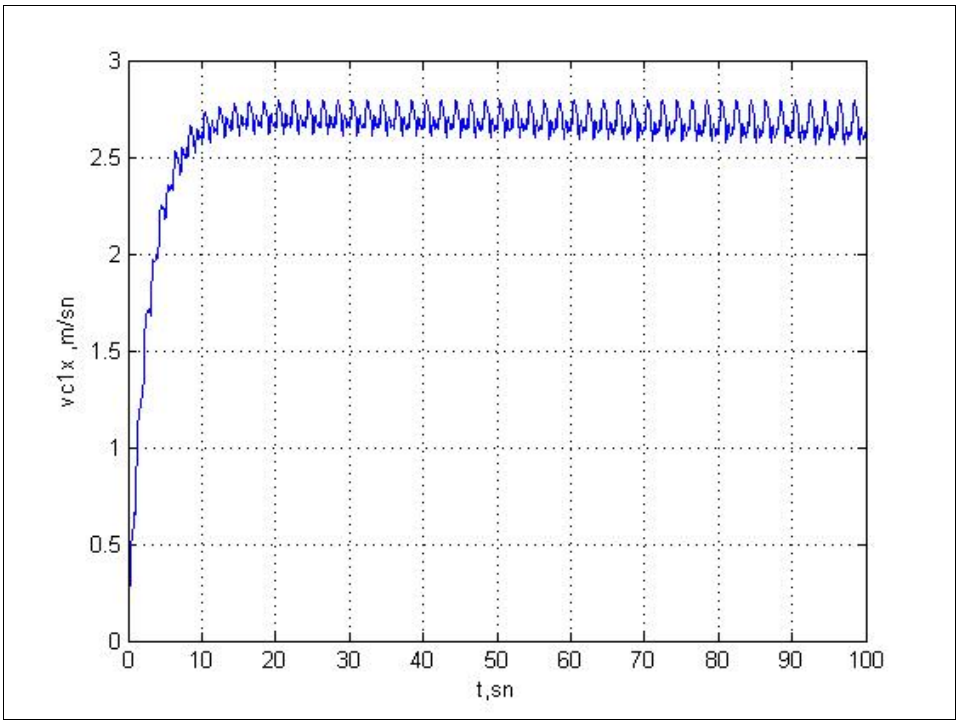
İlk senaryo için en uygun faz farkları $\theta_{1,2}(t)$ ve $\theta_4(t)$ için $\frac{\pi}{2}$; $\theta_{2,3}(t)$ için ise 0 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.1 : Senaryo 1 için en uygun faz farkları ile 0.5 Hz. frekansında giriş yörüngeleri



Şekil 6.2 : Senaryo 1 için en uygun faz farkları ile 0.5 Hz. frekansında uzuv açılarının zamanla değişimi



Şekil 6.3 : Senaryo 1 için en uygun faz farkları ile 0.5 Hz. frekansında yunusun ileri doğru hareketini sağlayan 1. uzuv doğrusal hızının x yönündeki bileşeninin zamanla değişimi

En uygun faz farkı değerleri elde edildikten sonra bu faz farkı değerlerinde yunus prototipi için en uygun frekansın belirlenmesi için gerçek yunus yüzme frekansları da

göz önünde bulundurularak 0.1 Hz. ile 1 Hz. arasındaki frekanslar benzetim programında denenmiştir. Elde edilen hız ve itme kuvveti değerleri ile bir tablo oluşturulmuştur.

Tablo 6.1 Senaryo 1 için Çeşitli Frekans Değerlerine Karşılık Gelen Ortalama Hız Değerleri

Frekans (Hz)	V∞ (m/sn)
0.1	0,5
0.2	1
0.3	1,5
0.4	2,2
0.5	2,7
1	4,5
1,25	4,75
1,5	4
2	3,2
2,5	0,8

Tablo 6.2 Senaryo 1 için Çeşitli Frekans Değerlerine Karşılık Gelen Ortalama İtme Kuvveti Değerleri

Frekans (Hz)	Fx (N)
0.1	15
0.2	25
0.3	50
0.4	75
0.5	80
1	200
1,25	270

Tablodaki değerler incelendiğinde frekansın optimum değerine ulaşana kadar giriş yörüngelerindeki frekans arttırıldığında sistemin kararlı rejim ortalama hızı v_∞ ve x yönündeki ortalama itme kuvveti F_∞ değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Sistemin kararlı rejim hız değeri 1.25 Hz. frekansında en büyük değerine ulaşmakta 1.25 Hz.'den büyük frekans değerlerinde ise kararlı rejim hız değerleri azalmaktadır.

Yunus yüzme hareketi için bu senaryoda optimum frekans değeri 1.25 Hz.'dir.

6.2 Senaryo 2

İkinci senaryoda yunusun içinde bulunduğu akışkanın hızının sıfırdan farklı olduğu ve akışın laminer olduğu durum için çalışmalar yapılmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarında 1. senaryodan da yararlanılarak yunusun içinde bulunduğu akışkanın hızı 4 m/sn olarak alınmıştır.

Bu durum için yapılan çalışmalar ışığında giriş yörüngelerindeki uzuv en büyük açı değerlerinin $\frac{\pi}{12}$ radyan alınmasının uygun olduğu görülmüştür.

Yunus yüzme hareketleri de göz önünde bulundurularak giriş yörüngeleri için çeşitli faz farkı kombinasyonları denenmiş; optimizasyon amaçları doğrultusunda en iyi sonuçları veren kombinasyon belirlenmiştir.

İkinci senaryo için en uygun faz farkları $\theta_{1,2}(t)$ ve $\theta_{3,4}(t)$ için 0; $\theta_{2,3}(t)$ için ise π radyan olarak seçilmiştir.

Bu koşullar altında yapılan çalışmalarda hızı sıfırdan farklı akışkan içinde bulunması halinde yunus prototipi birinci senaryoya göre daha yüksek frekanslarda yüzebilmektedir. Farklı frekanslar sonucunda elde edilen kararlı rejim ortalama hız ve itme kuvveti değerleri Tablo 6.3 ve Tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.3 Senaryo 2 için Çeşitli Frekans Değerlerine Karşılık Gelen Ortalama Hız Değerleri

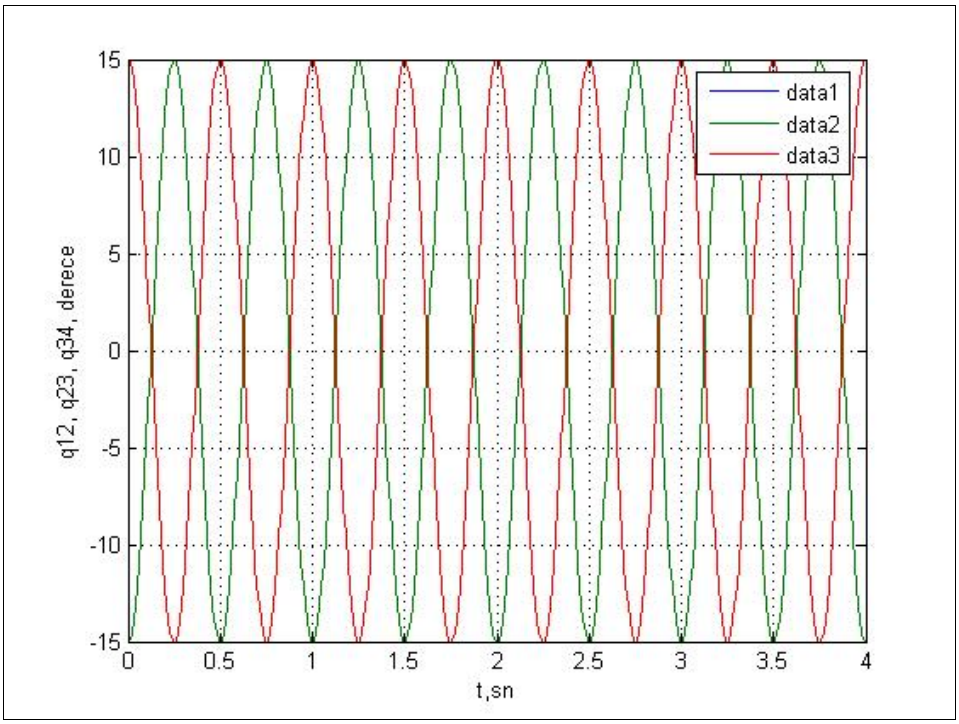
Frekans (Hz)	V∞ (m/sn)
0,5	1,75
0,75	6,5
1	11
1,25	14
1,5	16
2	19
3	18
4	14
6	10

Tablo 6.4 Senaryo 2 için Çeşitli Frekans Değerlerine Karşılık Gelen Ortalama İtme Kuvveti Değerleri

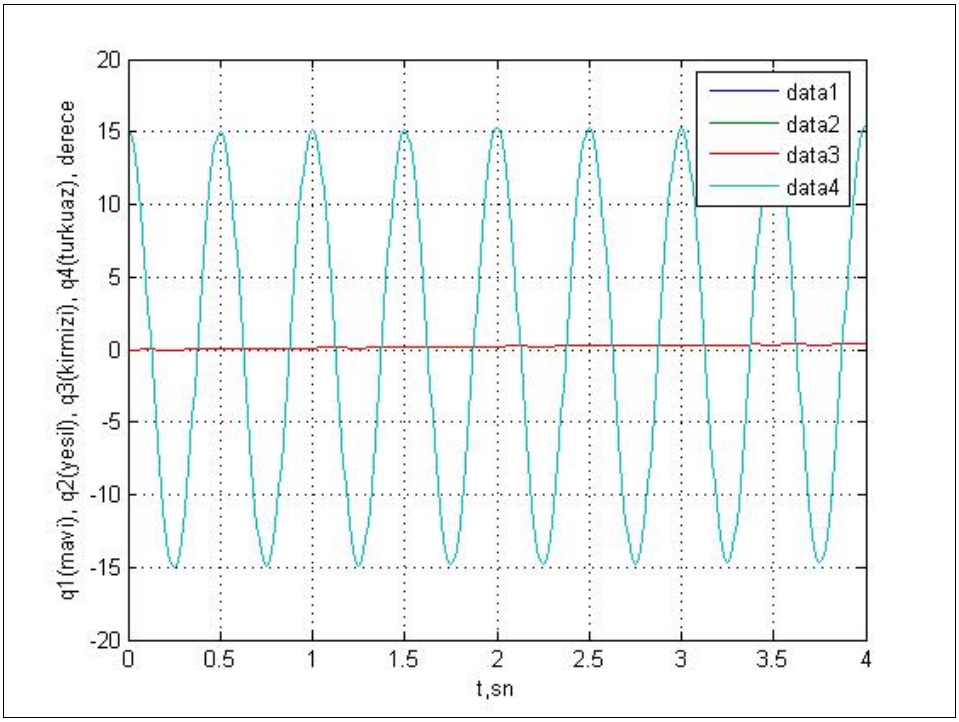
Frekans (Hz)	Fx (N)
0,5	5
0,75	11
1	20
1,25	30
1,5	35
2	64

Tablodaki değerler incelendiğinde giriş yörüngelerindeki frekans arttırıldığında frekansın optimum değerine kadar sistemin kararlı rejim ortalama hızı ve x yönündeki ortalama itme kuvvetinin arttığı gözlenmiştir. Sistemin kararlı rejim hız değeri 2 Hz. frekansında en büyük değerine ulaşmakta 2 Hz.'den büyük frekans değerlerinde ise kararlı rejim hız değerleri azalmaktadır.

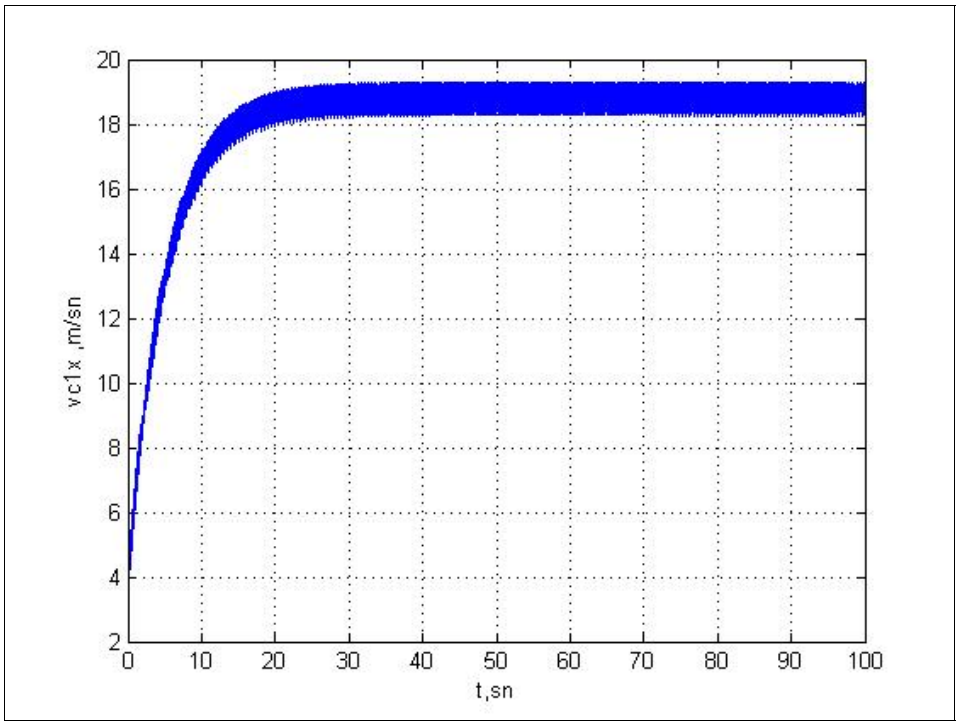
Yunus yüzme hareketi için bu senaryoda optimum frekans değeri 2 Hz.'dir. Bu senaryo için optimum frekans değeri 1. senaryodaki optimum frekans değerine oranla yüksektir. Bunun sebebi bu senaryoda yunusun sıfırdan farklı hızda bir akışkan içinde yüzmesidir.



Şekil 6.4 : Senaryo 2 için en uygun faz farkları ile 2 Hz. frekansında giriş yörüngeleri



Şekil 6.5 : Senaryo 2 için en uygun faz farkları ile 2 Hz. frekansında uzuv açılarının zamanla değişimi



Şekil 6.6 : Senaryo 2 için en uygun faz farkları ile 2 Hz. frekansında yunusun ileri doğru hareketini sağlayan 1. uzuv doğrusal hızının x yönündeki bileşeninin zamanla değişimi

6.3 Optimizasyon Sonuçları

Oluşturulan iki senaryo benzetim programında sınanarak optimizasyon amaçları doğrultusunda en iyi sonuçların elde edilmesi için sistemin giriş yörüngelerindeki frekans ve faz açısı parametrelerinin en uygun değerleri bulunmuştur.

Akışın laminer ve yunusun içinde bulunduğu akışkanın hızının sıfır olduğu durumda (1. Senaryo) yunus, akışkanın hızının sıfıra eşit olmadığı duruma (2. Senaryo) göre daha düşük frekanslarda yüzebilmektedir. 2. senaryoda yunusun yüzmeye başladığı bir frekans alt değeri vardır. Bu frekans değerinin altında yunusun kararlı rejim ortalama hızı akışkanın hızından düşüktür.

Her iki senaryoda da yunusun kararlı rejim ortalama hızı ve itme kuvveti değerleri giriş yörüngelerine verilen frekans değerleri optimum yüzme frekansı değerine yaklaştıkça artmaktadır. Optimum frekans değerlerinden büyük frekanslar ise yunusun hızı azalmaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yunuslar vücut yapıları ve hareket tipleri açısından çok verimli bir yapıya sahiptir. Bu sebeple bu tez çalışmasında yunus türü bir su altı aracının tasarımına ışık tutacak şekilde yunus yüzme hareketi incelenmiş ve matematiksel modeli oluşturulmuştur. Matematiksel model oluşturulurken önceki çalışmalardan farklı olarak hareketi sağlayan sürtünme kuvvetlerinin yalnızca kanatta değil hareket eden tüm uzuvlarda oluştuğu varsayılarak 4 uzuvlu, üç eklemli robotik mekanizma ele alınmıştır.

Matematik model sonucunda elde edilen ifadeler yardımıyla MATLAB® programı içinde bulunan Simulink programındaki modüller kullanılarak oluşturulan benzetim programında çeşitli deneyler yapılmıştır.

Oluşturulan benzetim programı ileride yapılacak çalışmalarda çeşitli parametrelerin kolaylıkla değiştirilmesine uygun şekilde esnek tasarlanmıştır. Farklı senaryoların sınanması amacıyla benzetim programının yapısı kolaylıkla değiştirilebilir.

Benzetim programlarında sınanmak üzere 2 senaryo oluşturulmuştur. Her iki senaryoda da akışın laminer olduğu durum göz önünde bulundurulmuştur. Bu senaryoların ilkinde yunusun içinde bulunduğu akışkanın hızının sıfıra eşit olduğu, ikincisinde ise sıfıra eşit olmadığı varsayılmıştır.

Benzetim programında sistemin giriş yörüngelerindeki faz farkları ve frekanslar değiştirilerek yunusun yüzmesini sağlayacak olan itme kuvvetini en büyük ve 1. uzvun açı değerindeki değişimleri en küçük yapacak hareket koordinasyonunun belirlenmesi için çalışılmıştır.

Optimizasyon çalışmaları sonucunda her iki durum için de optimum faz açıları ve frekans değerleri elde edilmiştir. Laminer akışta yunus yüzme hareketinin sağlanması için uzuvlara giriş olarak verilmesi gereken yörüngeler böylelikle belirlenmiştir.

İlerideki aşamalarda uzuvların sürüklenme katsayılarının daha yüksek kesinlikte belirlenmesi üzerine detaylı olarak çalışılmalıdır. Sürüklenme katsayılarının

böylelikle belirlenerek benzetim programı içinde kullanılması sonuçların kesinliğini arttıracaktır.

Gövde uzvunun x ekseni ile arasındaki açının değişimlerini azaltmanın yolu gövde ekleminin sürüklenme momenti katsayılarını yeterince arttırmaktır. Bu ise yunus prototipinde gövde uzvuna kanatlar eklenmesi ile elde edilebilir.

Bu çalışma kapsamında oluşturulan benzetim programı kullanılarak türbülanslı akış için benzer deneyler yapılabilir.

KAYNAKLAR

Antonelli, G., 2003. Underwater Robots: Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg.

Aristotle, 1910. Historia Anımalium. Clarendon Press. Oxford.

Asada, H., Slotine, J.-J.E., 1986. Robot Analysis and Control. Wiley Interscience Publication. Amerika Birleşik Devletleri.

Barrett, D.S, Triantafyllou, M.S., Yue, D.K.P., Grosenbaugh, M.A., Wolfgang, M.J., 1999. Drag Reduction in Fish-Like Locomotion. *Journal of Fluid Mechanics,* **392,** 183-212.

Carpenter, P.W., Davies, C., Lucey, A.D., 2000. Hydrodynamics and Compliant Walls: Does the dolphin have a secret?, *Current Science,* **79-6**, 758-765

Chung, G.B., Eom, K.S., Yi, B.-J., Suh, I.H., Oh, S.-R., Chung, W.K., Kım, J.O., 2001. Disturbance Observer-Based Robust Control For Underwater Robotic Systems with Passive Joints, *Advanced Robotics,* **15-5,** 575 588.

Dalyan, E., Görüney, T., Tüfekçi, S., Uludağ, K., 2004. Yunus Türü Sualtı Keşif ve Gözlem Robotu Prototipi, *Bitirme Tasarım Projesi,* İ.T.Ü. Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

Doğangil, G., Özçiçek, E., 2005. Design, Construction and Control of a Robotic Dolphin Prototype, *Bitirme Tasarım Projesi,* İ.T.Ü. Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

Fish F.E., Rohr, J.J., 1999. Review of Dolphin Hydrodynamics and Swimming Performance, *Technical Report 1801,* SSC San Diego.

Kuzucu, A., Dalyan, E., Görüney, T., Tüfekçi, S., Uludağ, K., 2004. Yunus Türü Sualtı Gözlem ve Keşif Robotu, *SAVTEK 2004 Savunma Teknolojileri Kongresi,* ODTÜ, Ankara, 24-25 Haziran, 297-305.

Kuzucu, A., Doğangil, G., Özçiçek, E., 2005. Bir Robot Yunusun Tasarımı ve Geliştirilmesi, *TOK'05 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı,* İ.T.Ü., İstanbul, 2-3 Haziran, 273-278.

Lin, C.-C., Chen, R.-C., Li T.-L., 1999. Experimental Determination of the Hydrodynamic Coefficients of an Underwater Manipulator, *Journal of Robotic Systems,* **16(6),** 329-338.

Sfakiotakis, M., Lane, D.M., Davies, J.B.C., 1999. Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion, *IEEE Journal of Oceanic Engineering,* **24-2,** 237.

Triantafyllou, M.S., Triantafyllou, G.S., Yue, D.K.P., 2000. Hydrodynamics of Fishlike Swimming*, Annu. Rev. Fluid Mech.,* **32,** 33-53.

Triantafyllou, M.S., Triantafyllou, G.S., 1995. An Efficient Swimming Machine, *Scientific American,* **272-3,** 64-70.

Wu, Th.Y.-T., 1971. Hydromechanics of Swimming of Fishes and Cetaceans, in *Advances in Applied Mechanics Volume II*, pp. 1-61, Eds. Yih, C.S., Academic Press, Amerika Birleşik Devletleri.

Yuh, J., 2000. Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey, *Autonomous Robots,* **8,** 7-24.

EKLER

Ek_A

Benzetim programı içinde yer alan fonsiyon bloğunun içinde yer alan program:

```
function[ivme1x,ivme1y,acisalivme1,Fx,MM12,MM23,MM34] =
fcn(ddq4,ddq34,ddq3,ddq23,ddq2,ddq12,dq4,dq34,dq3,dq23,dq2,dq12,q34,q23,q12,
S4,C4,S3,C3,S2,C2,S1,C1,dvc1x,dvc1y,vc1x,vc1y,ddq1,dq1)

l1=1; l2=0.25; l3=0.5; l4=0.4;                  %Uzuvların uzunlukları (m.)
lc1=(l1/2); lc2=(l2/2); lc3=(l3/2); lc4=(l4/2); %Uzuvların ağırlık merkezlerine kadar
                                                olan uzunlukları (m.)
r1=0.125; r2=0.125; r3=0.1; r4=0.09;            %Uzuvların yarıçapları (m.)
m1=50; m2=12.5; m3=16; m4=2;                    %Uzuvların kütleleri (kg.)

%Uzuvların laminer akışta yanal(n ile belirtilmiştir) ve eksenel(t ile belirtilmiştir)
sürüklenme katsayıları
        bt1=100; bn1=0.001; bt2=200; bn2=0.002;
        bt3=200; bn3=0.002; bt4=500; bn4=0.001;
        Bf1=[bn1 0;0 bt1]; Bf2=[bn2 0;0 bt2];
        Bf3=[bn3 0;0 bt3]; Bf4=[bn4 0;0 bt4];

%Uzuvların türbülanslı akışta yanal(n ile belirtilmiştir) ve eksenel(t ile belirtilmiştir)
sürüklenme katsayıları
        dt1=0.01; dn1=0.001;  dt2=0.02; dn2=0.002;
        dt3=0.02; dn3=0.002; dt4=0.05; dn4=0.001;
        Df1=[dn1 0;0 dt1]; Df2=[dn2 0;0 dt2];
        Df3=[dn3 0;0 dt3];  Df4=[dn4 0;0 dt4];

%Uzuvların yanal(n ile belirtilmiştir) ve eksenel(t ile belirtilmiştir) sürüklenme
momenti katsayıları
        br1=7500; br2=1; br3=1; br4=1;

%Uzuvların kütle atalet momentleri
        I1=(1/4)*m1*(r1)^2+(1/12)*m1*(l1)^2;
        I2=(1/4)*m2*(r2)^2+(1/12)*m2*(l2)^2;
        I3=(1/4)*m3*(r3)^2+(1/12)*m3*(l3)^2;
        I4=(1/12)*m4*(l4)^2;
        I=(I1+I2+I3+I4);
```

```
%Uzuvların kütleye bağlı katsayıları
        M=m1+m2+m3+m4;
        M24=(m2+m3+m4)/M;  M34=(m3+m4)/M;  M4=m4/M;


%Uzuvların sürüklenme momenti katsayısı/atalet oran katsayıları
        B=(br1+br2+br3+br4)/I;  B24=(br2+br3+br4)/I;  B34=(br3+br4)/I;  B4=br4/I;

%Yunusun hızı
        vc1=[vc1x;vc1y];
%Yunusun ivmesi
        dvc1=[dvc1x;dvc1y];

%Uzuvların kütlesel atalet momenti katsayıları
        gama24=(I2+I3+I4)/I;  gama34=(I3+I4)/I;  gama4=I4/I;
%Uzuvların dogrusal hız ve ivmelerinin ifadeleri
        J12=[-lc1*S1 -lc2*S2;lc1*C1 lc2*C2];
        J23=[-lc2*S2 -lc3*S3;lc2*C2 lc3*C3];
        J34=[-lc3*S3 -lc4*S4;lc3*C3 lc4*C4];
        deltav12=J12*[dq1;dq2];  deltav23=J23*[dq2;dq3];
        deltav34=J34*[dq3;dq4];
        vc2=vc1+deltav12;  vc3=vc2+deltav23;  vc4=vc3+deltav34;

        C12=[-lc1*C1 -lc2*C2;-lc1*S1 -lc2*S2];
        C23=[-lc2*C2 -lc3*C3;-lc2*S2 -lc3*S3];
        C34=[-lc3*C3 -lc4*C4;-lc3*S3 -lc4*S4];
        ddeltav12=J12*[ddq1;ddq2]+C12*[(dq1^2);(dq2^2)];
        ddeltav23=J23*[ddq2;ddq3]+C23*[(dq2^2);(dq3^2)];
        ddeltav34=J34*[ddq3;ddq4]+C34*[(dq3^2);(dq4^2)];
        dvc2=dvc1+ddeltav12; dvc3=dvc2+ddeltav23; dvc4=dvc3+ddeltav34;

%Rotasyon matrisleri
        R10=[C1 -S1;S1 C1];    R20=[C2 -S2;S2 C2];
        R30=[C3 -S3;S3 C3];    R40=[C4 -S4;S4 C4];

        t1=[-S1; C1];     t2=[-S2; C2];     t3=[-S3; C3];     t4=[-S4; C4];
        n1=[C1; S1];     n2=[C2; S2];     n3=[C3; S3];      n4=[C4; S4];

%Laminer akışta sürüklenme kuvvetleri
        F1=-R10*Bf1*R10'*vc1;     F2=-R20*Bf2*R20'*vc2;
        F3=-R30*Bf3*R30'*vc3;     F4=-R40*Bf4*R40'*vc4;
%Türbülanslı akışta sürüklenme kuvvetleri
        %F1=-R10*Df1*[n1'*vc1 0;0 t1'*vc1]*R10'*vc1;
        %F2=-R20*Df2*[n2'*vc2 0;0 t2'*vc2]*R20'*vc2;
        %F3=-R30*Df3*[n3'*vc3 0;0 t3'*vc3]*R30'*vc3;
        %F4=-R40*Df4*[n4'*vc4 0;0 t3'*vc4]*R40'*vc4;

%Uzuvların etkileşim kuvvetleri
        f34=m4*dvc4-F4;
        f23=m3*dvc3-F3+f34;
```

```
        f12=m2*dvc2-F2+f23;
        F12=-m1*dvc1+F1;
        f13=f12+f23; f24=f23+f34;
%Yunusun x yönündeki itme kuvveti
        Fx=-F12(1);

%Çesitli çarpımlar
        gamaddq=gama24*ddq12+gama34*ddq23+gama4*ddq34;
        Bdq=B24*dq12+B34*dq23+B4*dq34;
        ft12=f12'*n1; ft13=f13'*n2; ft24=f24'*n3; ft4=f34'*n4;
        lfn=(lc1*ft12+lc2*ft13+lc3*ft24+lc4*ft4);

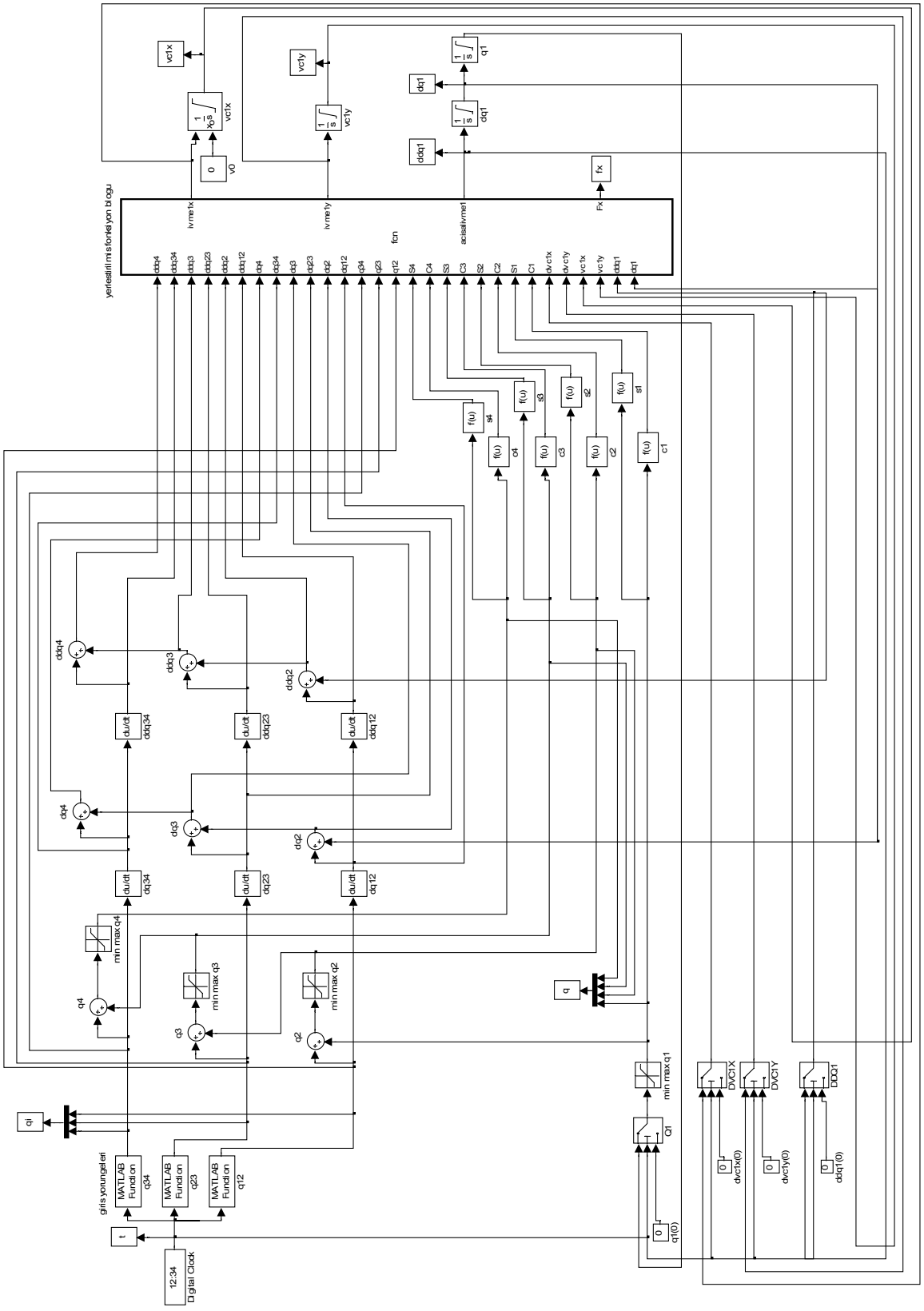
%Uzuvların etkileşim momentleri
        MM12=-br1*dq1-lc1*ft12-I1*ddq1;
        MM23=-br2*dq2-lc2*ft13-I2*ddq2;
        MM34=-br3*dq3-lc3*ft24-I3*ddq3;

%Gövdenin doğrusal ivmesi
        ivme1=-[-M24*lc1*S1 -(M24+M34)*lc2*S2 -(M34+M4)*lc3*S3 -
        M4*lc4*S4; M24*lc1*C1 (M24+M34)*lc2*C2 (M34+M4)*lc3*C3
        M4*lc4*C4]*[ddq1;ddq2;ddq3;ddq4]-[-M24*lc1*C1 -(M24+M34)*lc2*C2 -
        (M34+M4)*lc3*C3 -M4*lc4*C4; -M24*lc1*S1 -(M24+M34)*lc2*S2 -
        (M34+M4)*lc3*S3 -
        M4*lc4*S4]*[dq1^2;dq2^2;dq3^2;dq4^2]+(1/M)*[F1+F2+F3+F4];

        ivme1x=ivme1(1); ivme1y=ivme1(2);

%Gövdenin açısal ivmesi
        acisalivme1=-B*dq1-(lfn/I)-gamaddq-Bdq;
```

Ek_B



Şekil A.1 : Benzetim programının ara yüz görüntüsü

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Samsun'da doğdu. Orta ve lise eğitimini Samsun Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 1988 yılında Dünya Havacılık Federasyonu'nun düzenlediği resim yarışmasında 5-8 yaş grubunda Dünya 1.si oldu. 1998 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 1999 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'ne yatay geçiş yaptı. İ.T.Ü. Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden "Lisans" derecesini Haziran 2003'te alan Karaca, 2000 yılında Çift Anadal Programı (ÇAP) öğrencisi olarak kabul edildiği İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümü'nden "Lisans" derecesini Haziran 2005'te almıştır. Berrak Karaca 2003 yılında başladığı İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Sistem Dinamiği ve Kontrol Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir. Karaca, Kasım 2005'ten bu yana Makel Şirketler Grubu Mak-Tek Araştırma Geliştirme Ltd. Şti.'de Ar-Ge Mühendisi ve Ürün Tasarım Sorumlusu olarak çalışmaktadır.