

46363

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTUSU

ROBOT KOLLARINDA ENERJİ AKIS YÖNÜNÜN

MOTOR MOMENTLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

46363

Mak. Müh. Tamer Çelebi

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16 Ocak 1995

Tezin Savunulduğu Tarih : 7 Şubat 1995

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Salt Yücenur

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ahmet Kuzucu

Y. Doç. Dr. Özgür Turhan

SUBAT 1995

ÖNSÖZ

Bir ölçüde de olsa, bilgisayar kullanma becerisini ve programlama algoritması oluşturma yeteneğini bana kazandıran bu çalışmanın meydana gelmesinde büyük katkısı bulunan tez danışmanım sayın Doç. Dr. Sait Yücenur 'a, tüm imkanlarını seferber eden değerli arkadaşım Mak. Müh. Serdar Gezgın 'e ve her türlü desteğini benden esirgemyen aileme çok teşekkür ederim.

Subat 1995

Tamer Celebi



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. HARMONIC DRIVE MEKANİZMALARI.....	3
2.1. Çalışma Prensipleri.....	3
2.2. Temel Özellikler.....	4
BÖLÜM 3. TAHRİK SİSTEMİNİN MODELLENMESİ.....	9
3.1. Basit Modelin Kurulması.....	9
3.2. Redüksiyon Elemanı Veriminin İncelenmesi....	11
3.2.1. Sabit Verim Hali.....	12
3.2.2. Güç İletim Yöntünün Değişmesi.....	12
3.3. Verimin Değişmesi.....	15
3.3.1. Yüksüz Çalışma Momentleri.....	15
3.3.2. Verimlerin Belirlenmesi.....	19
3.3.3. Güç İletim Yöntünün Saptanması.....	21
BÖLÜM 4. BASİT DÖNME HAREKETİNİN İNCELENMESİ.....	26
4.1. Harekete Ait Büyüklüklerin Belirlenmesi....	26
4.2. Motor Momenti Değişiminin İncelenmesi.....	28
BÖLÜM 5. MANİPÜLATÖR DİNAMİĞİ.....	38
5.1. Newton-Euler Hareket Denklemleri.....	38
5.2. Ters Dinamik Bağlantılar.....	41
5.2.1. Geri Dönüslü (Recursive) Algoritma.....	41
5.2.2. Kinematik Büyüklüklerin Belirlenmesi....	43
BÖLÜM 6. DÜŞEY HAREKETİN İNCELENMESİ.....	49
6.1. Harekete Ait Özelliklerin Belirlenmesi.....	49
6.1.1. Uzun Konfigürasyonlarının Değişimi.....	49
6.1.2. Vektörel Büyüklüklerin Belirlenmesi....	52
6.2. Düşey Doğrusal Hareketin İncelenmesi.....	55
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	78
KAYNAKLAR.....	81
EKLER.....	82
ÖZGEÇMİŞ.....	95

NOTASYON LİSTESİ

$\vec{a}_c$	Robot uzvu kütle merkezi ivmesi (3x1 matris)
B	Viskoz sönüm katsayısı
C	Kütle merkezi
C-x _s y _s z _s	Robot uzvu kütle merkezine bağlı eksen takımı
C ₁	cos θ_1
C ₂	cos θ_2
C ₁₂	cos($\theta_1 + \theta_2$)
f	Verime göre belirlenen katsayı
$\vec{f}$	Uzuvlar arasındaki kuvvet vektörü (3x1 matris)
$\vec{g}$	Yerçekimi ivmesi vektörü (3x1 matris)
h	Çok küçük zaman aralığı
H ₁	Robot taban yüksekliği
I	Zamanla değişen eylemsizlik matrisi (3x3)
$\bar{I}$	Sabit eylemsizlik matrisi (3x3)
I _x , I _y , I _z	Uzvu kendi eksenlerine göre eylemsizlikleri
I _{top}	Toplam eylemsizlik momenti
I _{zo}	z _o eksenine göre eylemsizlik momenti
J	Eylemsizlik momenti
J ₁	Redüksiyonda yüksek hızlı elemanın eylemsizliği
J ₂	Redüksiyonda düşük hızlı elemanın eylemsizliği
lc	Robot uzvu kütle merkezinin uzaklığı
L	Robot uzvu boyu
m	Kütle
m --> y	Motordan yük kademesine doğru güç iletimi
m -><- y	Motor ve Yük kademelerinden enerji girişi
N	Güç iletim mekanizmasında çevrim oranı
$\vec{N}$	Uzuvlar arasındaki moment vektörü (3x1 matris)
N _m	Motor devir sayısı
n _g	Giriş devir sayısı
$\vec{n}, \vec{t}, \vec{b}$	x, y ve z eksenlerine ait birim vektörler
O-x _o y _o z _o	Yere bağlı sabit eksen takımı
O-xyz	Robot uzvuna bağlı eksen takımı
r	Robot uç noktasının radyal uzaklığı

$\vec{r}$	Yer vektörü
R	Konfigürasyon matrisi (3x3)
s	Doğrusal yörüngede alınan yol
S_1	$\sin \theta_1$
S_2	$\sin \theta_2$
S_{12}	$\sin(\theta_1 + \theta_2)$
t	Zaman
T	Moment
T, T_{top}	Toplam hareket süreleri
T_c	Redüksiyon elemanında çıkış tarafı momenti
T_g	Redüksiyon elemanında giriş tarafı momenti
T_N	Nominal çalışma momenti
x, y, z	Kartezyen koordinatlar
v, V	Lineer hız
$\vec{v}$	Hız vektörü (3x1 matris)
$y \rightarrow m$	Yük kademesinden motora doğru güç iletimi
z_e, z_r	Harmonic Drive mekanizmada diş sayıları
α, β, γ	Doğrultu kosinüslerine ait açılar
η	Redüksiyon elemanı genel verimi
η'	Redüksiyon elemanında hıza bağlı kısmi verim
ρ	Yoğunluk
θ	Açısal dönme miktarı
$\vec{\omega}$	Açısal hız vektörü (3x1 matris)

Alt İndisler

c	Robot uzvu kütle merkezine ait özellik
i	Robotun herhangi bir uzvuna ait özellik
m	Motor kademesine ait özellik
max	Maksimum değer
y	Robot uzvu (yük) kademesine ait özellik
1	Robotun 1 no'lu gövde uzvuna ait özellik
12	Motordan yük tarafına güç iletimi için özellik
2	Robotun 2 no'lu arka koluna ait özellik
21	Yük tarafından motora güç iletimi için özellik
3	Robotun 3 no'lu ön koluna ait özellik

SEKİL LİSTESİ

Sekil no	Sayfa no
2.1	Harmonic Drive mekanizması ve çalışma ilkesi.....3
2.2	Kavrama sırasında dişlerin yörüngeleri.....5
2.3	Esnek dişlinin farklı montaj durumları.....6
2.4	Robot eklem bağlantısında bir Harmonic Drive mekanizması.....6
2.5	Verimlerin sıcaklığa bağlı değişimleri.....7
2.6	Robot taban ekseninde bir Harmonic Drive mekanizması.....8
3.1	Robot koluna ait tahrik sistemi modeli.....9
3.2	Robot gövdesinin yatay düzlemde dönmesi.....13
3.3	Gövdeye ait açısal hız değişimi.....13
3.4	Robotun düşey hareketi.....14
3.5	Yüksüz çalışma durumları.....16
3.6	Çeşitli Harmonic Drive mekanizmaları için sabit yüksüz çalışma momenti değerleri.....17
3.7	Farklı güç iletimi yönlerinde T_{12} ve T_{21} yüksüz çalışma momentleri.....18
3.8	Giriş hızına bağlı η_{12} verimi değişimi.....20
3.9	Güç iletim yönünün farklı durumları.....22
3.10	Harmonic Drive mekanizmasının her iki yönden de tahrik edilmesi ($T_c < T_{21}$ hali).....24
4.1	Robot gövdesinin sabit konfigürasyonda dönmesi..26
4.2	Robota ait geometrik büyüklükler.....27
4.3	Uç noktası açısal hız değişimi.....29
4.4	Giriş hızına bağlı verim değişimleri.....30
4.5	Farklı ω_{max} değerleri için moment ve motor hızı değişimleri.....32
4.6	$\omega_{max} = 0.5$ rd/s için moment hız ve verim değişimleri.....33

Sekil no	Sayfa no
4.7 $\omega_{max} = 1.0$ rd/s için moment hız ve verim değişimleri.....	34
4.8 $\omega_{max} = 1.5$ rd/s için moment hız ve verim değişimleri.....	35
5.1 i uzvuna ait vektörel büyüklükler.....	38
5.2 Uzuyla beraber hareketli eksen takımı.....	40
5.3 Geri dönüşlü (Recursive) algoritma yapısı.....	41
5.4 i uzvuna uygulanan moment ve dönme eksenini.....	43
5.5 Robot uzuvlarına ait eksen takımları.....	44
5.6 Kütle merkezi hız vektörünün tayini.....	46
5.7 i uzvuna bağlı eksen takımları.....	47
5.8 Luh-Walker-Paul 'e dayanan geri dönüşlü (recursive) algoritma yapısı.....	48
6.1 Robot uç noktasının doğrusal hareketi.....	49
6.2 Doğrusal yörüngede s yolu.....	50
6.3 Konfigürasyon açısının zamanla değişimi.....	51
6.4 Uzuvlara ait koordinatlar ve yer vektörleri.....	53
6.5 Hıza bağlı verim değişimleri.....	57
6.6 Doğrusal yörüngede hız değişimi.....	58
6.7 Uç noktasının düşey hareketinde, farklı V_{max} hızlarında omuz motoruna ait hız ve moment değişimleri.....	59
6.8 $V_{max} = 0.1$ m/s için arka kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri.....	60
6.9 $V_{max} = 0.5$ m/s için arka kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri.....	61
6.10 $V_{max} = 1.0$ m/s için arka kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri.....	62
6.11 Uç noktasının düşey hareketinde, farklı V_{max} hızlarında dirsek motoruna ait hız ve moment değişimleri.....	63
6.12 $V_{max} = 0.1$ m/s için ön kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri.....	64
6.13 $V_{max} = 0.5$ m/s için ön kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri.....	65

Sekil no	Sayfa no
6.14	$V_{max} = 1.0$ m/s için ön kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri.....66
6.15	Uç noktasının düşey hareketinde, farklı V_{max} hızlarında omuz motoruna ait hız ve moment değişimleri.....69
6.16	$V_{max} = 0.1$ m/s için arka kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri.....70
6.17	$V_{max} = 0.5$ m/s için arka kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri.....71
6.18	$V_{max} = 1.0$ m/s için arka kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri.....72
6.19	Uç noktasının düşey hareketinde, farklı V_{max} hızlarında dirsek motoruna ait hız ve moment değişimleri.....73
6.20	$V_{max} = 0.1$ m/s için ön kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri.....74
6.21	$V_{max} = 0.5$ m/s için ön kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri.....75
6.22	$V_{max} = 1.0$ m/s için ön kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri.....76

TABLO LİSTESİ

<u>Tablo No</u>	<u>Sayfa No</u>
2.1 Farklı çalışma tarzları ve çevrim oranları..5	
3.1 Güç iletim yönü ve verimin belirlenmesi....23	
3.2 Güç iletim yönüne göre motor momentinin ! tayini.....25	
6.1 Robota ait uzuv ölçüleri.....56	
6.2 Tahrik sistemlerine ait büyüklükler 56	

ÖZET

Endrüstriyel robotlarda, motor ile hareketli robot uzvu arasındaki tahrik sisteminde bazı durumlarda güç iletimini sağlayan mekanizmalar mevcuttur. Bu mekanizmalar genellikle hız düşürme (redüksiyon) amacıyla kullanılır ve tercihen yüksek çevrim oranlarına sahiptir.

Bu çalışmada, Tübitak Marmara Araştırma Merkezi Robotik Bölümü'nde geliştirilen "Antropomorfik" tipte bir robotun ilk üç uzvuna ait (Gövde ile arka ve ön kol) tahrik sistemleri incelenmektedir. Kütlesel özelliklerin yaklaşık olarak alındığı bu uzuvlara ait tahrik sistemlerinde, elektrik motorları ve bunlara bağlı Harmonic Drive mekanizmaları mevcuttur. Robot hareketi sırasında, tahrik sistemlerinde meydana gelen enerji kayıpları ve bunların her üç motora ait moment değişimleri üzerine etkilerinin belirlenmesi için, örnek olarak robot uç noktasının yatay ve düşey düzlemlerde basit hareketleri seçilmiştir. Hesaplama özellikle Harmonic Drive mekanizmalarındaki enerji kayıpları da dikkate alınmış ve bu mekanizmalara ait kayıpların sonuçları ne ölçüde etkilediği belirlenmiştir.

MODELLING OF A MANIPULATOR DRIVE MECHANISM

SUMMARY

There are three major types of drive in use today : hydraulic, pneumatic and electric motors. For any application of robots, we must decide which of the available drive methods is most suitable. Positional accuracy, reliability, speed of operation, cost and other factors must be considered.

Pneumatic drives are the simplest of all drives. These are much like hydraulic systems in principle, but vary considerably in detail. The working fluid is compressed air, but the valve is simpler and pressures are much smaller. High precision is difficult to achieve using pneumatic servo drives, but where the precision is adequate, pneumatic drives are the lightest in weight and lowest in cost of all available robots.

Hydraulic drives can generate greater power in a compact volume than can electric motor drives. Rotary hydraulic motors can be made smaller for a given power output than electric motors. However, electrohydraulic servo valves used to control oil flow are quite expensive and require the use of filtered, high-purity oil to prevent jamming of the servo valve. Because of the high pressure, there is always a potential for oil leaks.

Electric motors are inherently clean and capable of high precision if operated properly. They are more reliable and require less maintenance. The newer designs of electric motors are beginning to be competitive in size and weight because the use of new magnetic materials. As their capabilities improve electric motors are becoming more and more the actuator of choice in the design of robots.

To analyze the dynamic behaviour of a robot, the appropriate joint torques necessary for producing desired outputs must be obtained. This inverse problem is important to robot control and programming. For a given desired end point velocity and acceleration, the joint angular velocities and angular accelerations can be found by the inverse kinematics. In the inverse dynamics, the inputs are these kinematic variables described as time functions and the outputs are the joint torques to be applied at each instant by the actuators in order to

follow the specified trajectories.

Two methods can be used in order to obtain the dynamic equations of motion : The Newton-Euler formulation and the Lagrangian formulation. The Newton-Euler formulation is derived by the direct interpretation of Newton's second law of motion, which describes dynamic system in terms of force and momentum. The equations incorporate all the forces and moments acting on the individual arm links, including the coupling forces and moments between the links. Since the linear endpoint force and moment specified along with trajectories to follow are known, the recursive algorithm based on Newton-Euler formulation can be applied to find joint torques.

In many cases it is not possible to find an actuator with the speed-force or speed-torque characteristics to perform the desired tasks. In other cases it is necessary to locate the actuator away from the intended joint of the manipulator. For these reasons, it becomes necessary to use some type of power transmission. Power transmissions perform two functions : transmit power at a distance and act as a power transformer. There are number of ways to perform mechanical power transmission. The use of gears is very common. They transmit rotary motion from one shaft to another. The desired speed of a manipulator link is usually much less than the motor which drives it. So, a power transmission with high reduction ratio (e.g. Harmonic drives, Cyclo gear boxes) is necessary.

Although harmonic drives have been around for a long time, they have not been used extensively until recently. With only three basic elements, the single-stage reduction ratios range 50:1 to 320:1 within the same envelope. Harmonic drive gears are available with positioning accuracy of better than one minute of arc and repeatability within a few seconds of arc. They may operate with essentially zero backlash between mating teeth because of natural gear pre-load. They also have improved torsional stiffness, compact size, light weight, simple construction and co-axial input-output. Finally, harmonic drive transmissions are successfully used in industrial robots.

When the reduction is used in a robot drive mechanism, it should be noted that the joint torque obtained by the inverse dynamics is not equal to the torque generated by the motor. So, a drive mechanism model must be formed to find the motor torque. The drive mechanism can be separately examined as two levels : the high speed motor level and the low speed load level. The basic dynamic equation of "Torque = Inertia x Angular acceleration"

can be applied to both levels. For the motor level :

$$(J_m + J_1) \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + T_{c_m} \text{sign } \dot{\theta}_m = T_m - T_{in} \quad (1)$$

where

- J_m : Rotor inertia of the motor, fixed
- J_1 : Inertia of high speed parts in the reduction, fixed
- θ_m : Angular displacement of the motor shaft
- B_m : Viskoz friction coefficient for the motor level, fixed
- T_{c_m} : Coulomb friction torque (absolute) for the motor level, fixed
- T_m : Torque developed by the motor, time varying
- T_{in} : Input torque to the reduction, time varying

and for load level,

$$(J_2 + J_l) \ddot{\theta}_l + B_l \dot{\theta}_l + T_{c_l} \text{sign } \dot{\theta}_l = T_{out} - T_l \quad (2)$$

where

- J_2 : Inertia of low speed parts in the reduction, fixed
- J_l : Inertia of the robot link being driven, time varying
- θ_l : Angular displacement of the robot link obtained by the inverse kinematics
- B_l : Viskoz friction coefficient for the load level, fixed
- T_{c_l} : Coulomb friction torque (absolute) for the load level, fixed
- T_l : The joint torque, obtained by the inverse dynamics, time varying
- T_{out} : Output torque from the reduction, time varying

If the reduction ratio is N , it can be written that

$$\theta_m = N \theta_l \quad (3)$$

But the problem is to find the relationship between T_{in} and T_{out} . Generally,

$$T_{out} = f N T_{in} \quad (4)$$

by using this relationship, motor and load level equations can be reduced into one. For load level

$$[N^2 f (J_m + J_1) + (J_2 + J_l)] \ddot{\theta}_l + [N^2 f B_m + B_l] \dot{\theta}_l + [N T_{c_m} + T_{c_l}] \text{sign } \dot{\theta}_l = N f T_m - T_l \quad (5)$$

In most applications it is assumed that the coefficient f equals to one ($f=1$). This means that there are no power losses in the reduction. In other words, the reduction efficiency $\eta = \% 100$. However, there are always power losses in this power transmission system. Then f becomes efficiency : $f = \eta$.

One important aspect of the drive is " the direction of power transmission " concept. While the robot end effector follow the specified trajectories, in some cases of the motion, one or more actuators (motors) may act as a brake. For example, when the end effector moves downward but the desired acceleration is upward for a PUMA robot, the gravitational effects of the second and third arms (especially when these arms are fully extended) cause themselves to accelerate. In that case, the motors in the drive mechanisms must decelerate the angular velocities of the links. The direction of the power transmission in that instant is inverse : From load to the motor level. The torque relationship is than given by

$$T_{in} = \eta (T_{out} / N) \quad (6)$$

or

$$T_{out} = (1 / \eta) N T_{in} \quad (7)$$

By comparing this equation with equation (4) one can easily find $f = 1/\eta$.

The second aspect of the power transmission is the change of efficiency during the motion. The efficiency of the Harmonic Drive mechanism depends on temperature, working speed, torque and the direction of power transmission. The temperature effect is negligible, because the working temperature does not change too much (about 30-40 °C). But the efficiency slightly changes with the input speed. For the same speed and torque conditions, the efficiencies in the different directions of power transmission have different values. In the low torque working regions, the difference is too much. So, the efficiency changes must be taken into account.

Finally, three approaches are possible for the power transmission losses :

1. There is no lose in the reduction. Always $\eta = \%$

100 . There is no need to determine the direction of power transmission. Always $f = 1$.

2. There is a power lose. But always η is a constant value. To calculate motor torque by using equation (5), the direction of power transmission must be determined to obtain f value ($f = \eta$ or $f = 1/\eta$).

3. The efficiency is variable. It changes with not only the speed and torque but also the direction of the power transmission.

In this study, the drive mechanisms of the first three links of a PUMA robot have been examined. All these mechanisms is assumed to have a power transmission system (Harmonic Drive). Although the robot has 6 degrees of freedom, 3 wrist rotations have been neglected since their loads are relatively small. So, it was assumed that mass of the wrist and an object held by the robot belong to the third link. In the first example, a simple horizontal rotation of the endpoint has been examined to find the motor torque of the base link. As a second example, the vertical motion of the second and third link under the gravity has been studied to find the appropriate motor torques by using the inverse dynamics and the equation (4). To determine the motor torques, three approaches (which have been mentioned above) were separately used and finally, three motor torque variations have been found for the same link. Thus, it has been obtained how much differ the motor torques (found by three different efficiency approaches) from each other. The results have been calculated by using computer programming language.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüz endüstriyel robotlarında 3 ana tipte tahrik söz konusudur : hidrolik, pnömatik ve elektrik motorlar. Farklı uygulamalar için ; harekette doğruluk, emniyet, operasyon hızı ve maliyet gibi faktörler seçimde bir kriter oluşturmaktadır.

Pnömatik tahrikler en basit, ucuz ve hafif olma özelliklerine sahiptir. Kullanılan akışkan sıkıştırılmış havadır ve valfler basit basınçlar ise çok daha düşüktür. Havanın sıkıştırılabilirliği sebebiyle yüksek hassasiyet elde etmek güçtür.

Hidrolik tahrikler yüksek basınç ve güç iletebilirler. Dönme hareketi sağlayan hidrolik motorlar aynı güç için elektrik motorlara göre boyut ve ağırlık avantajına sahiptir. Zararlı atmosfer ortamında elektrik motorlara göre daha emniyetlidir. Ancak yağ akışını kontrol eden yüksek hassasiyetli elektrohidrolik servo valfler pahalıdır ve filtre edilmiş yüksek saflıkta yağa ihtiyaç vardır. Ayrıca yüksek basınçta çalışma sızdırmazlık problemi de yol açmaktadır.

Elektrik motorlar normal çalışma ortamında daha emniyetli, temiz ve bakımı kolay durumdadır. Hassasiyetleri de yüksektir. Yeni magnetik malzemeler sayesinde boyut ve ağırlık bakımından hidrolik tahrikler ile rekabet halindedirler. Olanaklar sürekli geliştiğinden elektrik motorları seçim için caziptir. Bu yüzden birçok imalatçı robot uzuvlarında dönme hareketlerini tercih etmektedir.

Elektrik motoru ile tahrikte robot uzvuna doğrudan bağlantı düşünülebilir. Ancak, robotun istenen hareketi yapabilmesi için gerekli moment-hız karakteristiklerini

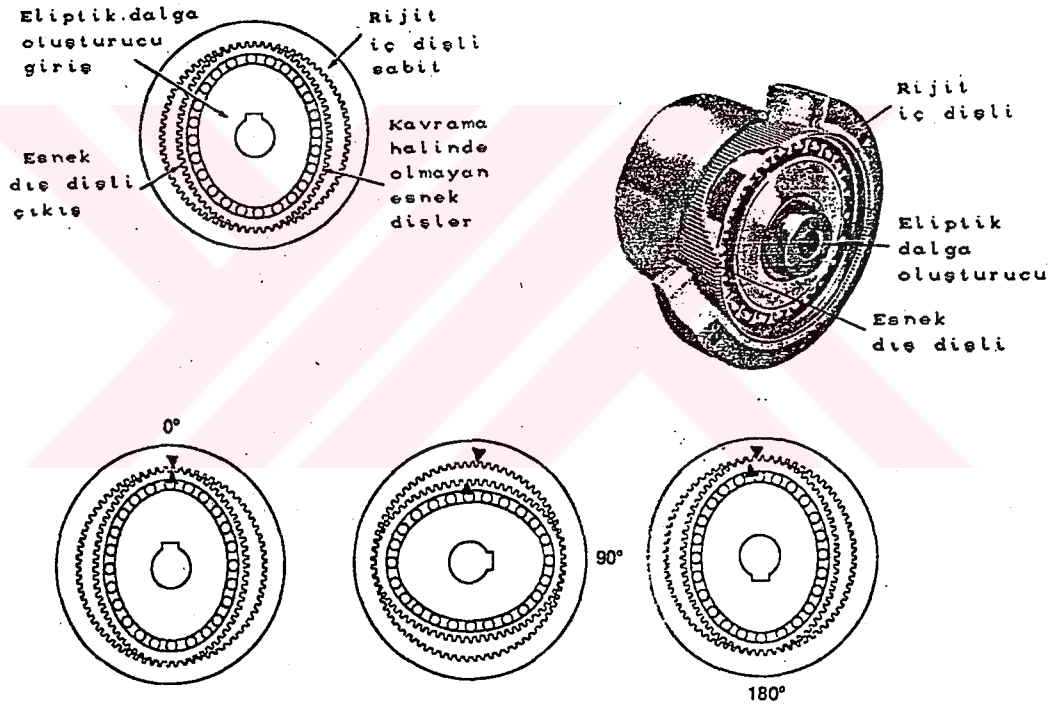
sağlayan motor kullanımı çoğu durumda mümkün değildir. Bugün için nispeten büyük boyutlara ve kütleye sahip böyle bir motor kullanımı, özellikle hareketli bir uzuv üzerine yerleştirildiğinde hareket dinamiği için büyük bir yük oluşturacaktır. Ayrıca, güç iletiminde tahrik motorunun hareket halindeki uzuvdan mümkün olduğunca uzak bir mesafeye yerleştirilmesi de daha uygun olmaktadır. Bu da bir güç iletim mekanizmasını zorunlu kılacaktır. Motor hızının uzvun istenen dönme hızından genellikle çok daha büyük seçilmesi sebebiyle güç iletim mekanizması olarak yüksek çevrim oranlı bir redüksiyon elemanı kullanımı zorunlu hale gelmektedir.



BÖLÜM 2.HARMONIC DRIVE MEKANİZMALARI

2.1. Çalışma Prensibi

Harmonic Drive mekanizmaları Şekil 2.1 'de görüldüğü gibi 3 ana elemandan oluşur : rijit dişli.(circular spline), yüksek hızlı mile bağlı eliptik dalga oluşturucu (wave generator), yüksek hızlı mile bağlı eliptik dalga oluşturucu



Şekil 2.1. Harmonic Drive mekanizma ve çalışma ilkesi [3]

(wave generator) ve esnek dişli (flexspline). Hareket sırasında kavrama eliptik elemanın büyük eksenine karşılık gelen esnek ve rijit dişliler arasında oluşur. Esnek (elastik) dişlinin iki tür hareketi söz konusudur:

1. Eliptik elemanın çevresinde silindirik yataklar mevcuttur. Böylece eliptik elemanın dönmesi sonucu esnek dişli dönmez. Ancak, bu yatakların desteği ile periyodik bir dalga şeklinde elastik olarak şekil değiştirir.

2. Bu elastik şekil değiştirme sonucu esnek ve rijit elemanların dişleri birebir eşlenir. Esnek dişlerin sayısı rijit iç dişliden genellikle 2 diş daha az olduğu için, yüksek hızlı milin bir tam devri sonucu esnek dişli ters yönde sabit rijit dişliye göre 2 diş karşılık gelen bir açıda döner. Bu relatif hareket redüksiyonda düşük hızlı çıkış devrini oluşturur.

z_e : Esnek dişlinin diş sayısı

z_r : Rijit dişlinin diş sayısı

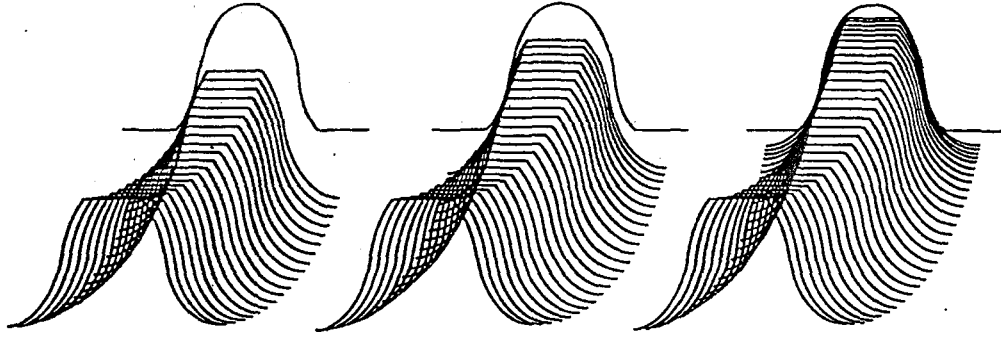
olmak üzere redüksiyon oranı (N) şöyle yazılabilir:

$$N = \frac{z_r}{z_r - z_e} \quad (2.1)$$

Harmonic Drive mekanizmalarda çoğunlukla esnek dişli çıkış ve dalga oluşturucu giriş olarak kullanılırsa da, 3 elemandan herhangi birini giriş, çıkış veya sabit eleman olarak kullanmak mümkündür. Tablo 2.1 'de çeşitli çalışma tarzları ve bunlara ait çevrim oranları görülmektedir.

2.2. Temel Özellikler

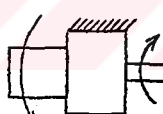
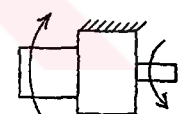
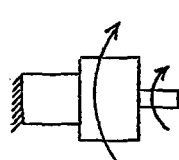
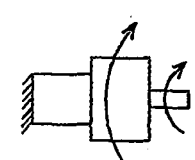
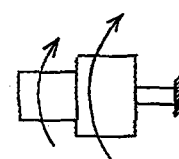
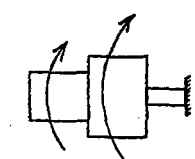
Harmonic Drive mekanizmalarda tek kademedeki yapılan bir redüksiyon ile 300:1 gibi yüksek çevrim oranlarına ulaşmak mümkündür. Daha fazla kademe ile çok daha yüksek oranlar elde edilebilir. Mekanizmalarda kullanılan diş profili yapısı ve kavrama anında dişlerin yörüngeleri Şekil 2.2 'de görülmektedir. Teorik olarak bir tek dişin moment ilettiği düşünülürse de, esnek dişlinin montajda eliptik bir deformasyona uğraması sebebiyle pratikte daha fazla dişli temas halindedir. Ayrıca, şekildeki farklı diş profili sayesinde toplam diş sayısının yaklaşık % 30 kadarının temas ettiği belirlenmiştir. Bu sayede mekanizma rijitliği önemli derecede artmaktadır. Mekanizmada



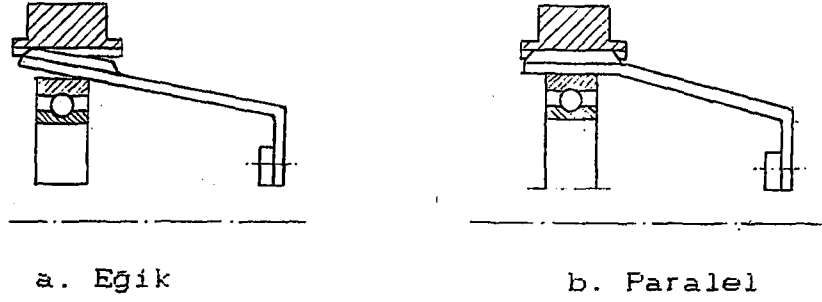
Şekil 2.2. Kavrama sırasında dişlerin yörüngeleri [3].

yer alan esnek dişlinin şekil değişimi gerçekte Şekil 2.1 de görülen boyutlarda değildir ve bu da malzemenin yorulma limitlerini aşmamaktadır. Bu yüzden, oluşan deformasyon mekanizmasının ömrünü belirleyen bir faktör değildir.

Tablo 2.1. Farklı çalışma tarzları ve çevrim oranları [3]

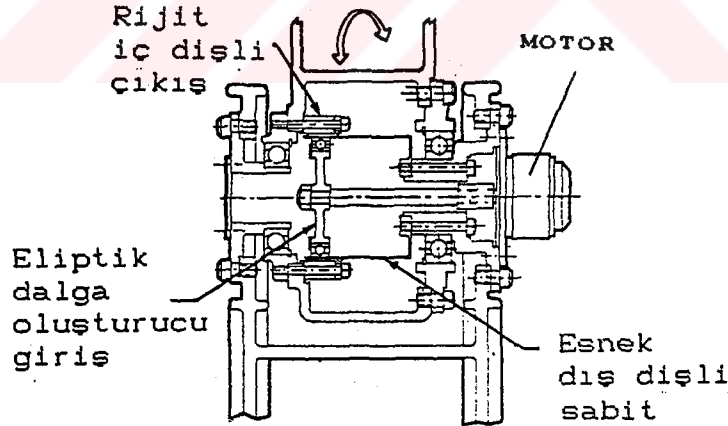
HIZ DÜŞÜRÜCÜ OLARAK ÇALIŞMA	HIZ YÜKSELTİCİ OLARAK ÇALIŞMA
Rijit dişli sabit Dalga oluşturu- rucu giriş Esnek dişli çıkış $N = z_r / (z_r - z_o)$ 	Rijit dişli sabit Dalga oluşturu- rucu çıkış Esnek dişli giriş $N = z_r / (z_r - z_o)$ 
Rijit dişli çıkış Dalga oluşturu- rucu giriş Esnek dişli sabit $N = 1 + z_r / (z_r - z_o)$ 	Rijit dişli giriş Dalga oluşturu- rucu çıkış Esnek dişli sabit $N = 1 + z_r / (z_r - z_o)$ 
Rijit dişli çıkış Dalga oluşturu- rucu sabit Esnek dişli giriş $N = 1 + (z_r - z_o) / z_r$ 	Rijit dişli giriş Dalga oluşturu- rucu sabit Esnek dişli çıkış $N = 1 + (z_r - z_o) / z_r$ 

Başlangıçta silindirik olarak imal edilen esnek dişlinin montaj sonucu eliptik deformasyondan dolayı diş genişliği boyunca paralel bir konumda olmayacağı düşünülebilir (Şekil 2.3.a). Ancak gerçek montajda dişler paralel olacak şekilde hafifçe saptırılır (Şekil 2.3.b) ve



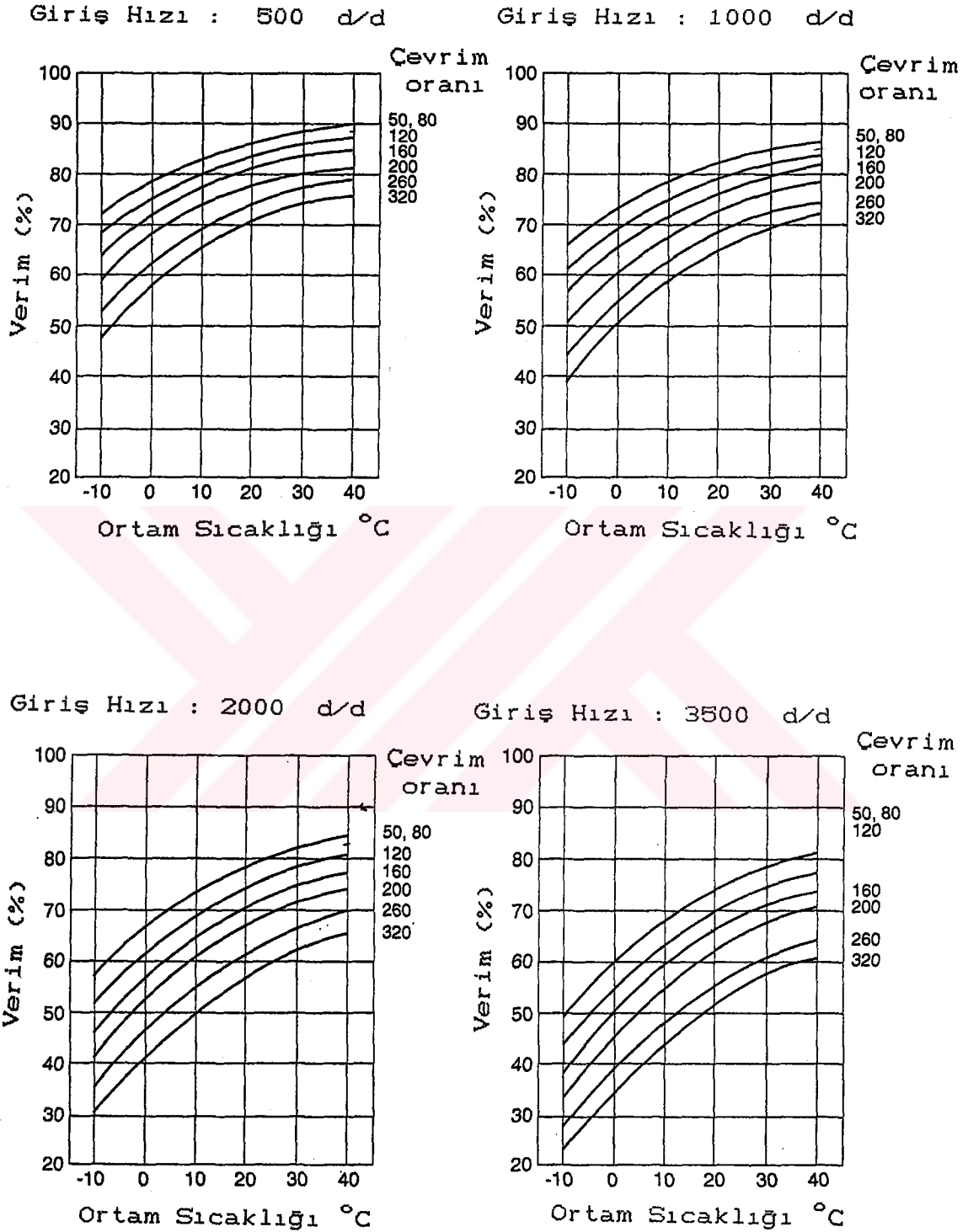
Şekil 2.3. Esnek dişlinin farklı montaj durumları [3].

böylece oluşan doğal ön yükleme durumu dişler arası boşluğun sıfırlanmasını sağlar (zero backlash). Sonuç olarak, mekanizmanın doğruluğu açı dakikası, hassasiyeti ise açı saniyesi mertebelerindedir.



Şekil 2.4. Robot eklem bağlantısında bir Harmonic Drive mekanizması [3].

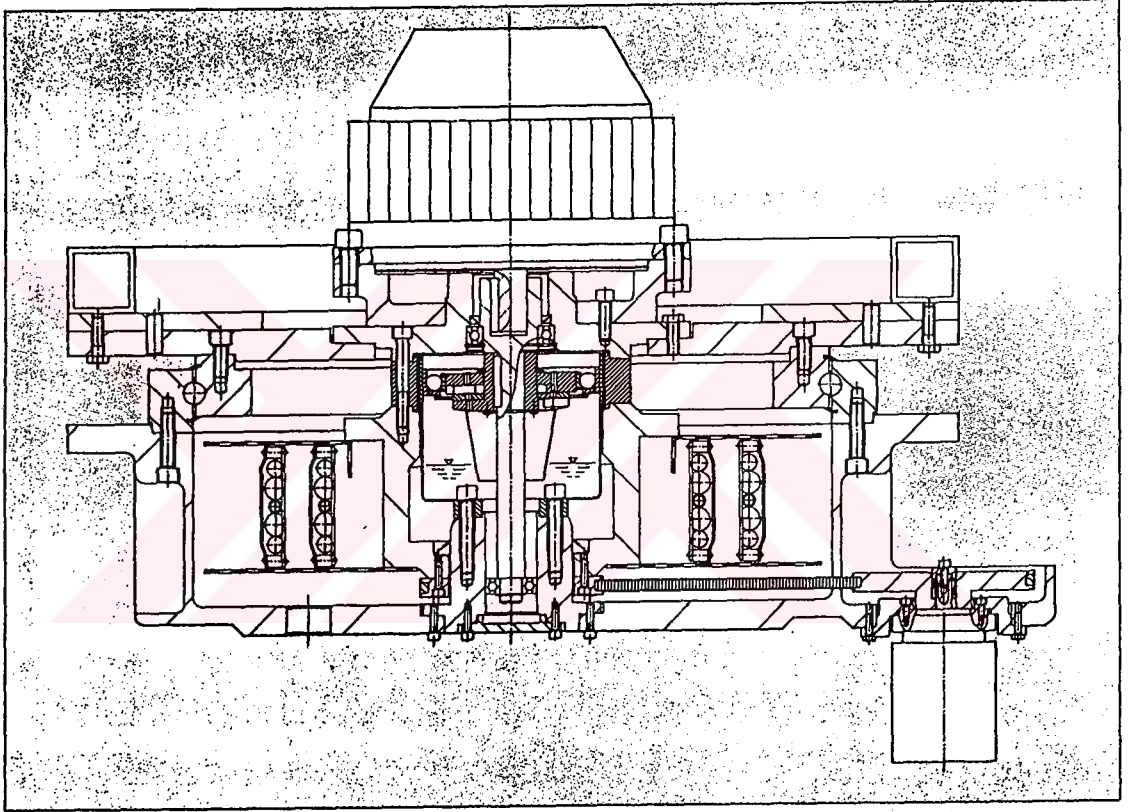
Uygulamada mekanizma verimleri % 80 ' in üzerine çıkabilmektedir. Şekil 2.5 'te, belirli bir T_N çıkış momentinde ve 4 farklı giriş hızı değeri için, çeşitli çevrim oranlarına sahip Harmonic Drive mekanizmalarda verimlerin sıcaklığa bağlı değişimleri yer almaktadır.



Şekil 2.5. Verimlerin sıcaklığa bağlı değişimleri [3].

Harmonic Drive mekanizmalar son 30 yıl içinde geliştirilmiş ve ilk olarak performans, güvenilirlik, küçük

hacim ve ağırlığın önemli olduğu havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılmıştır. Mekanizma sadece 3 basit parçadan ibaret olduğu ve nispeten az hacim kapladığı için tasarımda son derece geniş bir serbestlik sağlamaktadır. Yüksek moment kapasitesi, dişler arası boşluğun telafi edilmiş olması (zero backlash) ve tek kademede büyük çevrim oranları elde edilebilmesi kontrolde doğruluk bakımından bu mekanizmaları popüler hale getirmiştir.



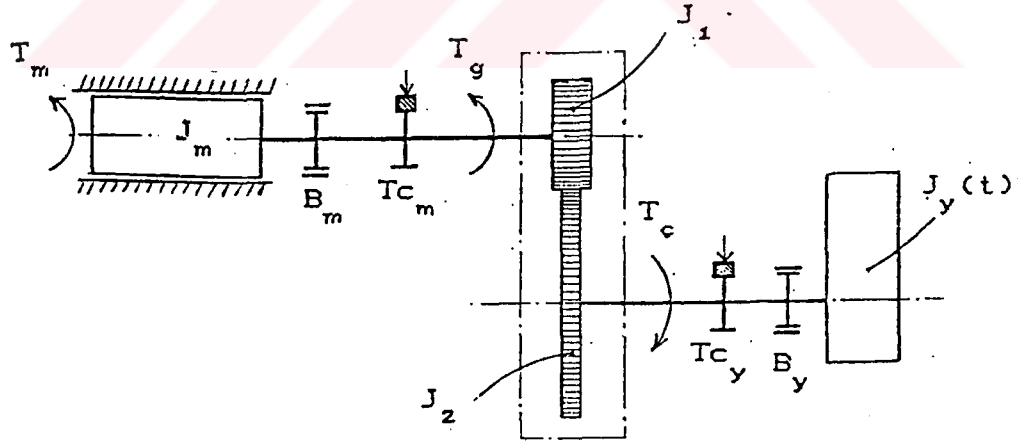
Sekil 2.6. Robot taban ekseninde bir Harmonic Drive mekanizması [3].

BÖLÜM 3. TAHRİK SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

Bir manipülatörde, uç noktasının (end effector) istenen yörüngede hareket edebilmesi için her bir uzva uygulanması gereken moment manipülatör dinamiği denklemleri ile hesaplanabilir (Bölüm 5). Ancak kontrol için her bir motora verilmesi gereken momentin bilinmesi gerekir. Bu yüzden motor ile uzuv arasındaki sistem için bir model oluşturulmalıdır.

3.1. Basit Modelin Kurulması

Tahrik işleminde bir redüksiyon söz konusu olduğunda, herhangi bir uzuv için Şekil 3.1 'de görüldüğü gibi basit bir model kurulabilir. Tüm elemanların rijit olarak kabul edildiği bu modelde,



Şekil 3.1. Robot koluna ait tahrik sistemi modeli.

- J_m : Motora ait dönen elemanın eylemsizliği [kg.m^2]
- J_1 : Redüksiyonda yüksek hızlı giriş elemanı (ya da dişlisi) eylemsizliği [kg.m^2]
- J_2 : Redüksiyonda düşük hızlı çıkış elemanı (ya da dişlisi) eylemsizliği [kg.m^2]

J_y : Uzuve ve varsa onun taşıdığı diğer uzuvların dönme eksenine indirgenmiş ve hareket boyunca zamanla değişen yük eylemsizlikleri toplam değeri [kg.m²]

B_m, B_y : Motor ve yük (uzuv) taraflarında viskoz sürtüm katsayıları [N.m.s]

T_{c_m}, T_{c_y} : Motor ve yük taraflarındaki kuru (Coulomb) sürtünme momentleri mutlak değeri [N.m]

olarak tanımlanabilir. Sürtünme kayıplarının sebebi olarak, redüksiyon elemanı giriş ve çıkış taraflarındaki sızdırmazlık elemanları, motor ve yük kademelerinde yer alan yataklamalardaki kayıplar, motora ait dönen elemanın çevresinde yarattığı hava akımı, yataklarda yer alan yağlayıcı maddeler gibi çeşitli etkenler gösterilebilir. Ancak, modelde görüldüğü gibi bu kayıpları genelde viskoz ve kuru (Coulomb) sürtünmeleri olarak ayırmak mümkündür. Buna göre her iki kademe için hareket denklemleri şöyle yazılabilir :

$$(J_m + J_1) \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + T_{c_m} \text{sign} \dot{\theta}_m = T_m - T_g \quad (3.1)$$

$$(J_2 + J_y) \ddot{\theta} + B_y \dot{\theta} + T_{c_y} \text{sign} \dot{\theta} = T_c \quad (3.2)$$

θ_m : Motor mili açısal dönme miktarı [rd]

θ : Yük tarafı için açısal dönme miktarı [rd]

T_c : Redüksiyon elemanı çıkışında yük kademesine iletilen moment [N.m]

T_g : Redüksiyon elemanı giriş tarafı momenti

Harmonic Drive mekanizmaları için ; (3.2) bağıntısında yer alan J_2 esnek dişli (flexspline) eylemsizliği J_y 'ye nazaran çok küçük olduğu için ihmal edilebilir (Şekil 2:4). Ayrıca, ifadede yer alan $J_y \ddot{\theta}$ terimi gerçekte manipülatör dinamiği bağıntıları ile bulunabilen ve uzva istenen hareketi sağlayan T_y yük momentine eşittir :

$$J_y \ddot{\theta} = T_y \quad (3.3)$$

Buna göre (3.2) bağıntısı yeniden düzenlenerek,

$$B_y \dot{\theta} + T_{c_y} \text{sign } \dot{\theta} = T_c - T_y \quad (3.4)$$

yazılabilir. Redüksiyonda çevrim oranı N ise,

$$\theta_m = N \theta \quad (3.5)$$

$$T_c = N T_g \quad (3.6)$$

(3.5) ve (3.6) dönüşümlerini (3.1) ve (3.4) eşitliklerinde kullanarak, basit model için yük tarafına indirgenmiş aşağıdaki bağıntı elde edilebilir :

$$N^2 (J_m + J_1) \ddot{\theta} + [N^2 B_m + B_y] \dot{\theta} + [N T_{c_m} + T_{c_y}] \text{sign } \dot{\theta} = N T_m - T_y \quad (3.7)$$

Uç noktasının istenen bir hız ve ivme ile hareket edebilmesi için her bir uzva verilmesi gereken hareket miktarı değişimi $\theta(t)$ ters kinematik bağıntılarla hesaplanabilir. Bu durumda manipülatör dinamiği ile,

$$T_y = T_y(\dot{\theta}, \ddot{\theta}) \quad (3.8)$$

yük momenti değişimi bulunabilecektir. Böylece (3.7) bağıntısı yardımıyla istenen $T_m(t)$ değişimi elde edilir.

3.2. Redüksiyon Elemanı Veriminin İncelenmesi

Bölüm 3.1 'de elde edilen (3.7) bağıntısını manipülatörün her bir uzvu için ayrı ayrı kullanarak, bu uzuvları tahrik eden motorlara ait $T_m(t)$ moment değişimlerini bulmak mümkündür. Ancak, bu bağıntıda aşağıdaki hususlar dikkate alınmamıştır :

1. Redüksiyon elemanında (Harmonic Drive) bir güç

iletimi kaybı söz konusudur. Bu kaybı basit bir verim değeri ile simgelemek mümkündür.

2. Bu kayıp ve dolayısıyla verim değeri güç iletimi süresi boyunca harekete bağlı olarak değişebilmektedir.

3.2.1. Sabit Verim Hali

Redüksiyon elemanındaki güç iletimi kaybı sabit bir η değeri ile gösterilirse (3.8) eşitliği,

$$T_c = N \eta T_g \quad (3.9)$$

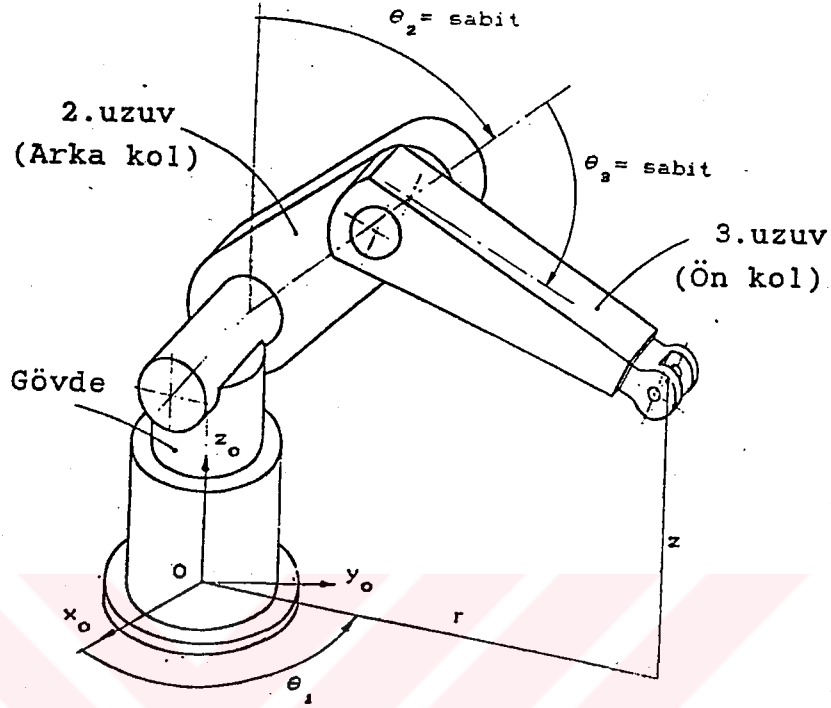
şeklinde olacaktır. O halde (3.7) bağıntısını, η verimini de dikkate alacak şekilde aşağıdaki gibi düzenlemek mümkündür :

$$N^2 \eta (J_m + J_1) \ddot{\theta} + [N^2 \eta B_m + B_y] \dot{\theta} + [N \eta T_{c_m} + T_{c_y}] \text{sign } \dot{\theta} = N \eta T_m - T_y \quad (3.10)$$

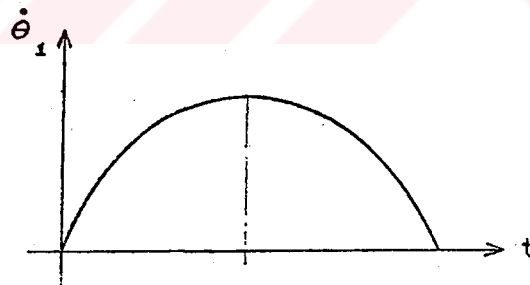
3.2.2. Güç İletim Yöntünün Değişmesi

Robot uzuvlarının hareketi sırasında tahrik sistemlerinde yer alan redüksiyon elemanlarında güç iletimi her an için motor tarafından yük (uzuv) tarafına doğru değildir. Hareketin bazı anlarında yük tarafından motor kademesine doğru bir enerji akışı oluşabilmektedir. Bu olay, robot uç noktasının hem yatay hem de düşey hareketlerinde söz konusu olabilir :

1. Robot uzuv yada uzuvlarnın belirli bir açısal ivme ile frenlenmeleri istenebilir. Örneğin, Şekil 3.2 'de PUMA tipi bir robot uç noktasının yatay düzlemde basit bir yay çizmesi ve 1 no 'lu gövdeye ait açısal hız değişiminin de Şekil 3.3 'teki gibi olması istensin.



Şekil 3.2. Robot gövdesinin yatay düzlemde dönmesi.

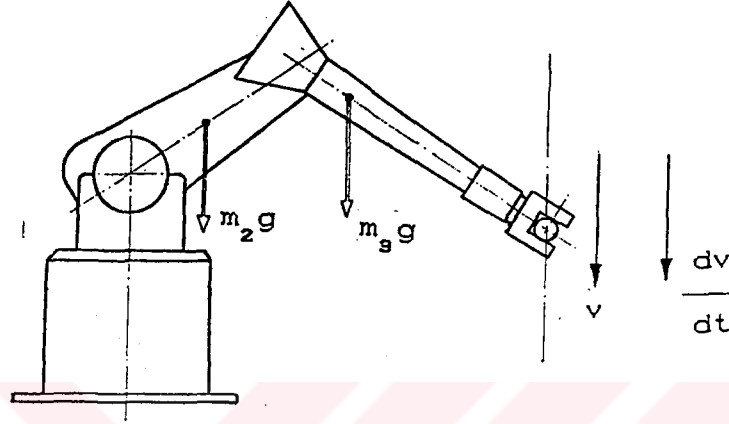


Şekil 3.3. Gövdeye ait açısal hız değişimi.

Hareketin hızlanma sürecinde redüksiyon elemanı (Harmo-
nic Drive mekanizması) motor tarafından tahrik edilecek,
ancak yavaşlama sürecini sağlamak için motorun harekete
ters yönde bir frenleme momenti uygulaması gerekecektir.
Bu durumda sistemde güç iletimi ters yönde olacaktır.

2. Uç noktasının düşey bir yörüngede aşağı doğru ha-
reketinde uzuvların kendi ağırlıkları etkisinde çalışması
söz konusudur. Şekil 3.4 'te görüldüğü gibi, uç noktası

ivmesinin aşağı doğru olması isteniyorsa 2 ve 3 uzuvları-
nın (Ön ve arka kol) ağırlıkları buna yardımcı olacaktır.
Ancak bu ağırlıklardan oluşan ivme istenen uç noktası iv-
mesinden daha büyük ise, bu iki uzvu tahrik eden motorla-



Şekil 3.4. Robotun düşey hareketi

rın bir frenleme momenti uygulayarak ivmeyi istenen de-
ğere düşürmesi gerekir. Bu da bu uzuvlara ait tahrik
sistemlerinde yer alan Harmonic Drive mekanizmalarda ters
yönde bir güç iletimine yol açacaktır.

Çevrim oranı N olmak üzere, redüksiyon elemanı için
giriş ve çıkış momentleri arasındaki ilişkiyi veren (3.9)
eşitliği,

$$T_c = N \eta T_g \quad (3.11)$$

şeklinde idi. Ancak, yukarıda da açıklandığı üzere hare-
ketin bazı anlarında güç iletimi yönü düşük hızlı yük
tarafından motor kademesine doğru oluşmaktadır. Diğer
bir deyişle, Harmonic Drive mekanizması gerçekte hız dü-
şürme (redüksiyon) yerine bir hız yükseltici gibi çalış-
maktadır. Bu durumda giriş ve çıkış momentleri arasında-
ki ilişki için,

$$T_g = \frac{T_c}{N} \cdot \eta \quad (3.12)$$

yazılabilir. Bu eşitlik (3.11) 'e benzer şekilde yeniden düzenlenirse,

$$T_c = N \frac{1}{\eta} T_g \quad (3.13)$$

elde edilir. Sonuç olarak, mekanizma veriminin sabit bir η değerine sahip olması durumunda ve güç iletiminin her iki yönü için geçerli olmak üzere, motor ile robot uzvu arasındaki tahrik sistemine ait (3.10) bağıntısı yeniden düzenlenebilir :

$$N^2 f (J_m + J_1) \ddot{\theta} + [N^2 f B_m + B_y] \dot{\theta} + [N f T_{c_m} + T_{c_y}] \text{sign} \dot{\theta} = N f T_m - T_y \quad (3.14)$$

Motor kademesinden tahrik için : $f = \eta$

Yük (uzuv) kademesinden tahrik için : $f = (1 / \eta)$

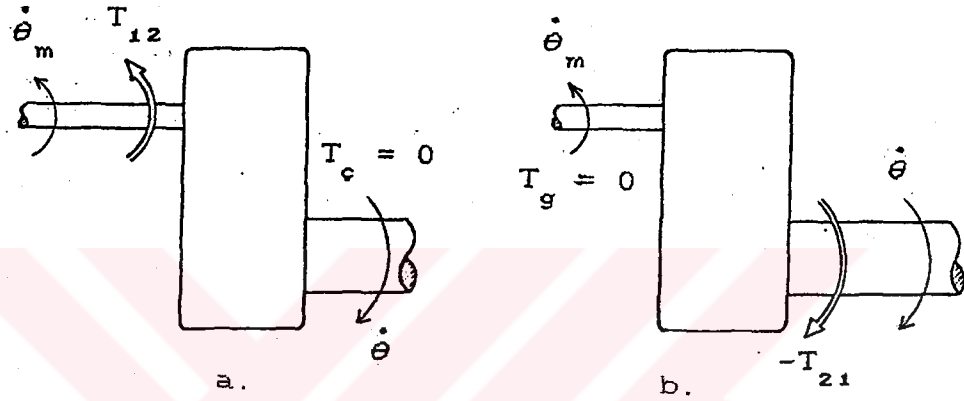
3.3. Verimin Değişmesi

Harmonic Drive mekanizması verimi gerçekte; dönme hızı, çıkış momenti (T_c) ve çalışma sıcaklığı gibi parametrelere bağlı olarak değişebilmektedir. Ancak sıcaklığa olan bağıllık ihmal edilebilir. Çünkü belirli bir süre çalışmış sistemde ısınma sonucu sıcaklığın 30°C 'den daha az olması beklenemez. Şekil 2.5 'te görüldüğü gibi, 30°C nin üzerinde verimin sıcaklığa bağımlılığı ihmal edilebilir. Bu yüzden çalışma sıcaklığının 40°C alınması durumdaki verim değerleri kullanılabilir.

3.3.1. Yükstüz Çalışma Momentleri

Harmonic Drive mekanizmalarında ; güç alan kademe herhangi bir moment direnci (yük) etkisinde olmadığı halde, hareketin sağlanabilmesi için güç veren kademeden bir

moment uygulanması gerekmektedir. Yüksek hızlı kademedan düşük hızlı tarafa doğru güç iletiminde (Şekil 3.5.a) T_{12} ile gösterilen bu yüksüz çalışma momenti (no load starting torque) değeri, ters yönde güç iletimi için (Şekil 3.5.b) çok daha büyük bir T_{21} (no load back driving torque) değerine sahip olmaktadır. Harmonic Drive mekanizmaları üzerinde yapılan deneylerle tespit edilmiş olan bu sabit moment değerleri (Şekil 3.6), tahrik kademesine karşı bir



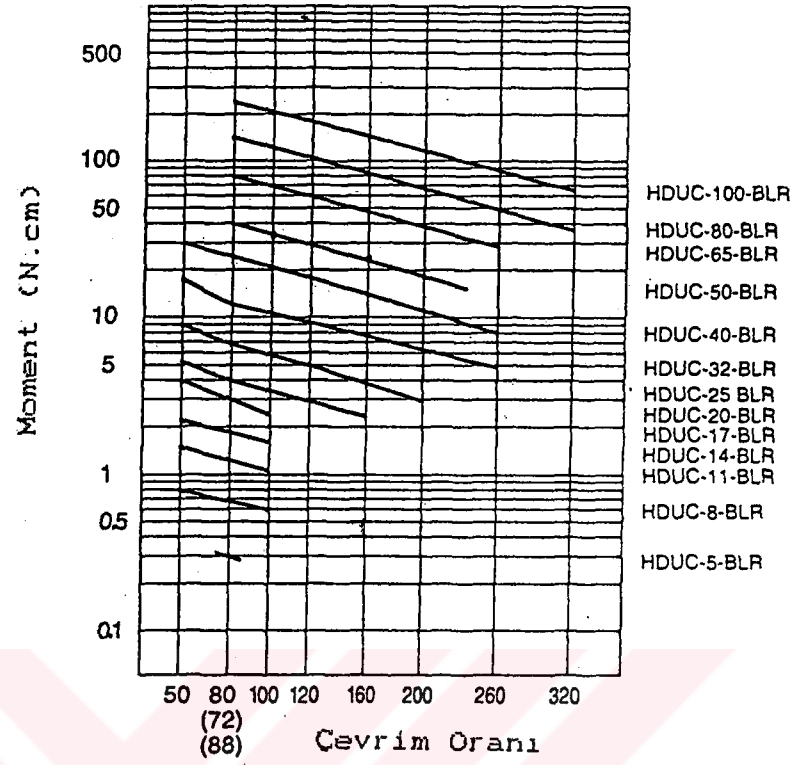
Şekil 3.5. Yüksüz çalışma durumları

direnc niteliğindedir. O halde, iki farklı yönde güç iletimi için bu momentleri mekanizma dahilinde ve tahrik kademesi üzerinde yer alan kuru (Coulomb) sürtünme direnci olarak modellemek mümkündür. Şekil 3.7 'de görüldüğü gibi, mekanizma bünyesinde yer alan bu T_{12} ve T_{21} yüksüz çalışma momentleri haricinde, güç iletimi için bir η' verimi tanımlamak mümkündür. Bu verim değeri için iki kabul yapılacaktır :

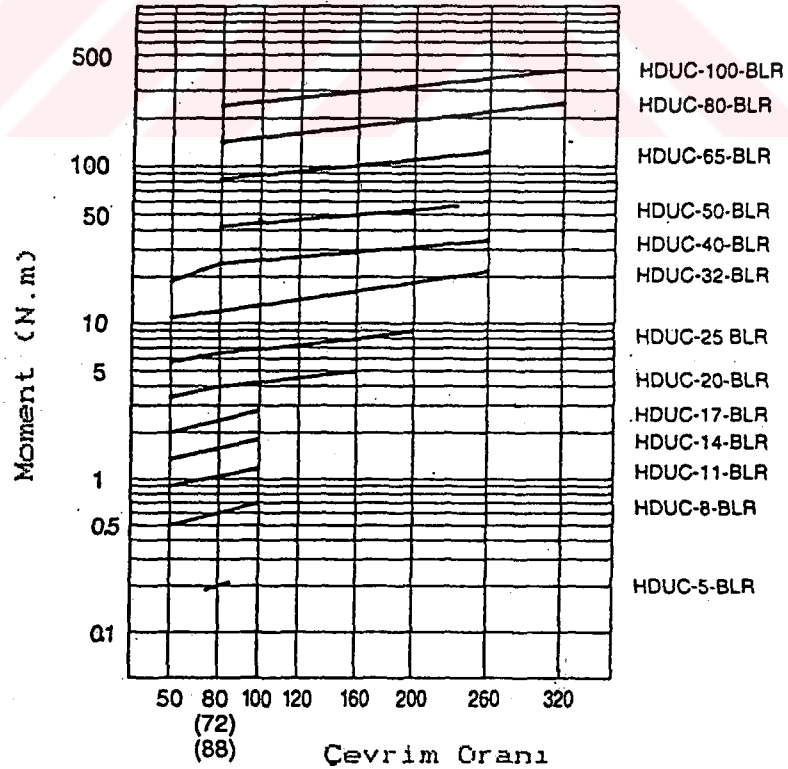
1. η' verimi çalışma momentinden (T_c) bağımsızdır. Ancak mekanizma devir sayısına bağlı olarak değişir.

2. Aynı devir sayısında çalışmak üzere, farklı yönlerde güç iletimine ait η' verim değerleri aynıdır (Şekil 3.7.a ve b).

Yüksek hızlı motor kademesinden düşük hızlı yük tarafına doğru güç iletimi söz konusu olduğunda mekanizmanın toplam verimi η_{12} ise Şekil 3.7.a yardımıyla,



a. Yüksek hızlı kademeden düşük hızlı kademeye (T_{12})



b. Düşük hızlı kademeden yüksek hızlı kademeye (T_{21})

Sekil 3.6. Çeşitli Harmonic Drive mekanizmaları için sabit yüksüz çalışma momenti değerleri [3].

$$\eta_{12} = \frac{T_c}{N T_{g1}} \quad (3.15)$$

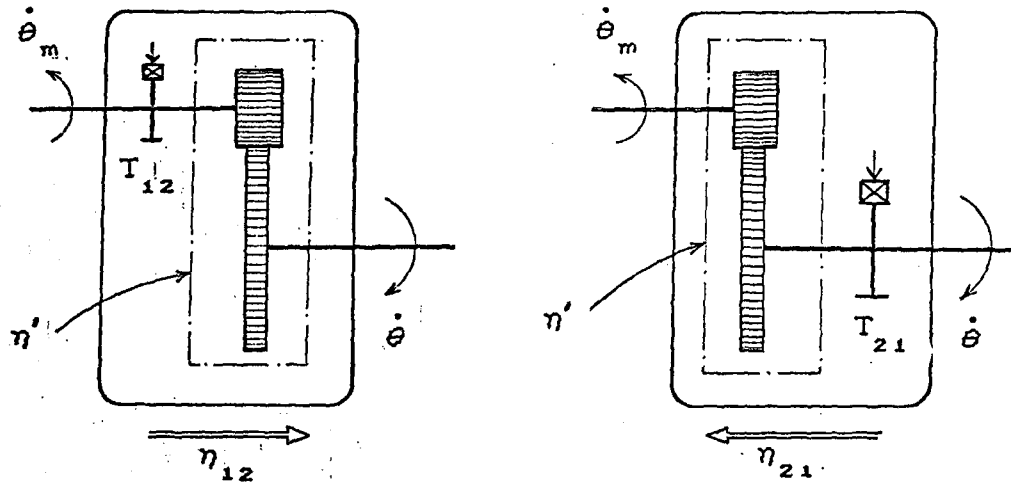
$$\eta' = \frac{T_c}{N (T_{g1} - T_{12} \text{ sign } \dot{\theta})} \quad (3.16)$$

yazılabilir. Diğer taraftan, ters yönde güç iletimi için (Şekil 3.7.b) mekanizmanın toplam verimi η_{21} ise,

$$\eta_{21} = \frac{N T_{g2}}{T_c} \quad (3.17)$$

$$\eta' = \frac{N T_{g2}}{(T_c + T_{21} \text{ sign } \dot{\theta})} \quad (3.18)$$

eşitlikleri geçerlidir. Aynı çalışma hızı için, yapılan kabul gereği (3.16) ve (3.18) eşitlikleri özdeştir. Böylece, tüm bu eşitliklerden yararlanarak herhangi bir hız



a. Yüksek hızlı motor kademesinden yük tarafına

b. Düşük hızlı yük tarafından motor kademesine

Şekil 3.7. Farklı güç iletimi yönlerinde T_{12} ve T_{21} yüksüz çalışma momentleri

değeri için η' verimi ve toplam verimler arasında

$$\eta' > \eta_{12} > \eta_{21} \quad (3.19)$$

eşitsizliklerinden bahsedilebilir. Sonuç olarak η_{12} ve η_{21} mekanizma verimlerinin T_c momentı ve çalışma hızına bağlı olarak değiştikleri, aynı hız ve T_c momentı için bu verimlerin farklı değerlere sahip oldukları söylenebilir.

3.3.2. Verimlerin Belirlenmesi

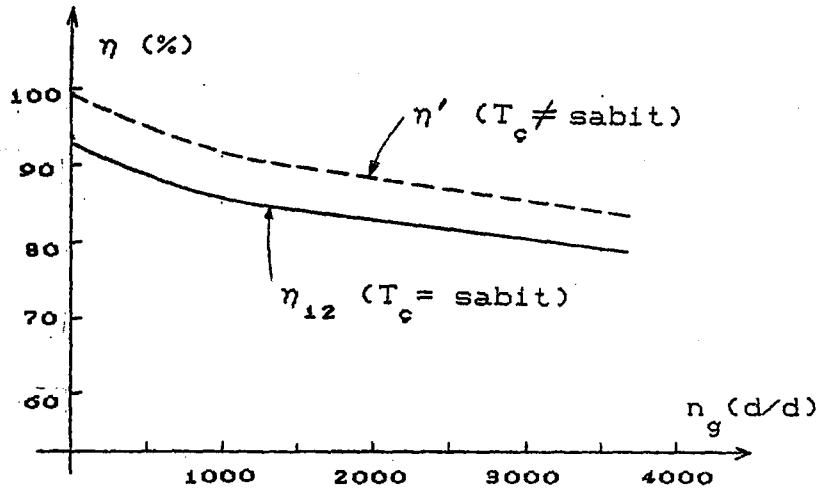
Harmonic Drive mekanizmaları için yapılan ölçümler çoğunlukla yüksek hızla dönen kademedan düşük hızlı kademeye doğru güç iletimine ait η_{12} değerlerini bulmaya yöneliktir. Ancak, hesaplamada kullanılması gereken η_{21} verim değerleri de saptanmalıdır. Bunun için η' veriminin hıza bağlı değişiminin bilinmesi gerekir. Böylece, güç iletim yönüne bağlı olarak (3.16) ve (3.15) ya da (3.18) ve (3.17) bağıntılarından yararlanarak herhangi bir T_c momentı için η_{12} ya da η_{21} verimlerinin bulunması mümkün olacaktır.

Harmonic Drive mekanizmalarında, yaklaşık 40°C ortam sıcaklığı ve sabit bir T_c çıkış momentı için η_{12} veriminin artan n_g giriş hızı ile azalan bir eğilim gösterdiği (Şekil 3.8) söylenebilir (Bu sonuç, Şekil 2.5 'deki η_{12} için verilmiş olan dört ayrı verim eğrisinden yararlanarak da elde edilebilir).

Sabit bir T_c momentı değeri için, n_g giriş hızına bağlı η_{12} değişimi bilindiğine göre (3.15) eşitliği yardımıyla

$$T_{g1} = \frac{T_c}{N \eta_{12}} \quad (3.20)$$

giriş momentı değerini ve bu değer (3.16) 'da kullanılmasıyla da T_c 'den bağımsız olan η' verimi değişimini



Şekil 3.8. Giriş hızına bağlı η_{12} verimi değişimi [3].

elde etmek mümkündür (Şekil 3.8). Elde edilen bu η değişiminin özelliği, daha önce de kabul edildiği gibi her iki yönde güç iletimi için geçerli olmasıdır. O halde, yüksek hızlı motor kademesinden tahrik durumu için (3.16) eşitliğinin yeniden düzenlenmesi sonucu

$$T_{g1} = T_{12} \text{sign } \dot{\theta} + \frac{T_c}{N \eta'} \quad (3.21)$$

giriş momenti ve bu değer (3.15) 'te yer almasıyla da herhangi bir T_c çalışma momenti için istenen η_{12} verimi elde edilir. Ters yönde güç iletimi söz konusu ise, (3.18) eşitliği aynı şekilde düzenlenerek,

$$T_{g2} = \frac{T_c + T_{21} \text{sign } \dot{\theta}}{N} \eta' \quad (3.22)$$

değeri ve buradan da (3.17) ile η_{21} verimi bulunabilir.

Mekanizmaya ait η_{12} ve η_{21} verimleri η' verimi ile

belirlendiğine göre, momente ve hıza bağlı olarak değişen bu toplam verimleri Bölüm 3.2.3 'de yer alan (3.14) bağıntısında kullanmak mümkündür :

$$N^2 f (J_m + J_1) \ddot{\theta} + [N^2 f B_m + B_y] \dot{\theta} + [N f T_{c_m} + T_{c_y}] \text{sign } \dot{\theta} = N f T_m - T_y \quad (3.23)$$

Motor kademesinden tahrik için : $f = \eta_{12}$

Yük (uzuv) kademesinden tahrik için : $f = (1 / \eta_{21})$

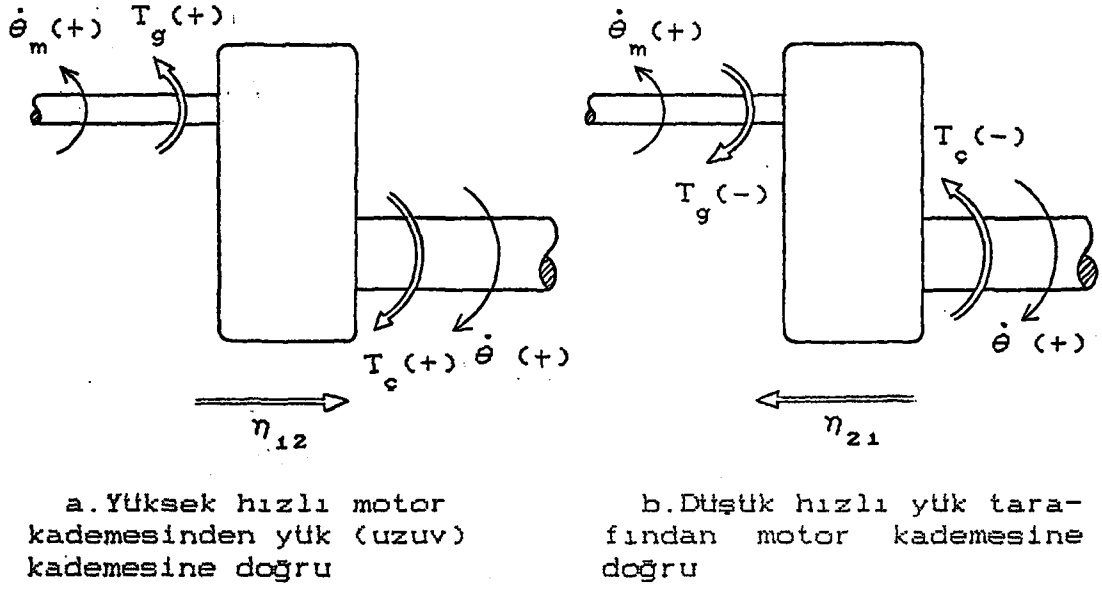
Böylece ; verimin moment, hız ve güç iletim yönüne bağlı değişimi dikkate alınarak (3.23) bağıntısı yardımıyla bilinmeyen $T_m(t)$ motor momenti değişimi bulunabilecektir.

3.3.3. Güç İletim Yönünün Saptanması

Robot uzuvlarının hareketi sırasında, bu uzuvlara ait tahrik sistemlerinde yer alan Harmonic Drive mekanizmalarında güç iletimi yönü bir veya birkaç kez değişebilir. Bu durumda harekete ait (3.23) bağıntısındaki verim değeri de η_{12} veya η_{21} gibi farklı değerlere sahip olacaktır. O halde, güç iletiminin hangi şart veya şartlarda yön değiştirdiğinin belirlenmesi gerekir.

Şekil 3.9 'da, tahrik sistemi modeli üzerinde güç iletim yönünün iki farklı hali görülmektedir. Bu model örneği Tablo 2.1 'de yer alan, çıkışa göre giriş (motor) kademesinin ters yönlü olduğu çalışma haline uygundur. Ancak, çıkışa göre girişin ne yönde olduğu dikkate alınmaksızın pozitif yönler için aşağıdaki tanımlamaları yapmak mümkündür :

a. θ için pozitif yön, robot uzvunun önceden belirlenen bir referansa göre pozitif şekilde hareketini sağlayan yöndür.



Şekil 3.9. Güç iletim yönünün farklı durumları

b. θ_m için pozitif yön, θ 'nın pozitif (+) yönde hareketini sağlayan yön olarak belirlenir.

c. Harmonic Drive mekanizmasına giriş momenti (T_g) ve motor momenti (T_m) için pozitif yönler θ_m için, T_y yük momenti ve T_c momenti için pozitif yönler ise θ için belirlenen pozitif yönlerdir.

Şekil 3.9 'deki her iki durum için de motor ve yük kademeleri pozitif yönde dönmektedir. Ancak güç iletim yönleri farklıdır. Ayrıca güç iletim yönünün belirli bir hali için motor momenti T_m ve yük momenti T_y 'nin yönleri (+) veya (-) olabilir. O halde güç iletim yönünün saptanmasında T_g ve T_c momentleri belirleyici etkenlerdir. Bu momentlerden herhangi birinin ve $\dot{\theta}$ dönme hızının yönleri yardımıyla güç iletimi yönü bulunabilir.

Robot uç noktasının istenen şartlarda hareketine göre ; ters kinematik bağıntılarla her bir uzuv için $\dot{\theta}$ ve $\ddot{\theta}$ değerleri, bu değerleri kullanarak ve manipülatör dinamiği bağıntıları yardımı ile de uzva verilmesi gereken T_y yük momenti elde edilebilir. Bu durumda (3.4) bağıntısı

yeniden düzenlenirse,

$$T_c = B_y \dot{\theta} + T_{c_y} \text{sign } \dot{\theta} + T_y \quad (3.24)$$

şeklinde T_c 'nin büyüklüğü ve işareti (yönü) bulunabilir. Tablo 3.1 'de güç iletim yönünün T_c ve $\dot{\theta}$ 'nin yönlerine bağlı olarak değişimi görülmektedir.

Redüksiyon elemanında güç iletim yönünün belirlenmesinde Tablo 3.1 'de yer almayan bazı özel durumlar söz konusudur. Bunlar şöyle sıralanabilir :

1. $\dot{\theta} = 0$ halı : İncelenen hareketin başlangıç ve bitişinde genellikle uzuvlar hareketsiz kabul edilebilir. Bu durumda $\ddot{\theta}$ 'nin yönünden yararlanmak mümkündür.

Tablo 3.1. Güç iletim yönü ve verimin belirlenmesi

T_c	$\dot{\theta}$	Güç iletim yönü	Verim	f
+	+	m $\rightarrow$ y	η_{12}	η_{12}
-	-	m $\rightarrow$ y	η_{12}	η_{12}
+	-	y $\rightarrow$ m	η_{21}	$1 / \eta_{21}$
-	+	y $\rightarrow$ m	η_{21}	$1 / \eta_{21}$

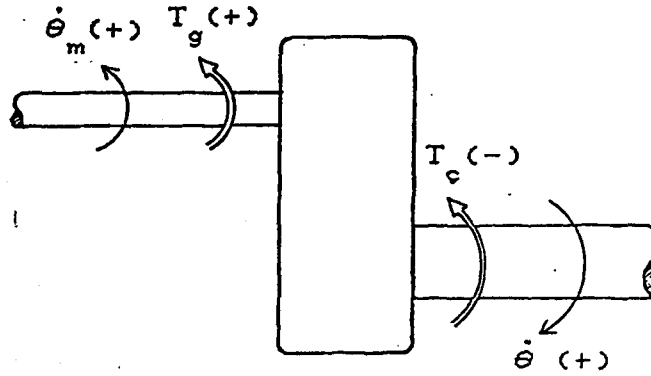
m $\rightarrow$ y : Yüksek hızlı motor kademesinden uzuv tarafına
y $\rightarrow$ m : Uzuv (yük) tarafından motor kademesine

2. Şekil 3.7.b 'de görüldüğü gibi, mekanizma dahilinde yüksüz çalışma direncini temsil eden T_{21} momenti düşürülürse, Tablo 3.1 'deki (y $\rightarrow$ m) halinin oluşabilmesi için

$$|T_c| > T_{21} \quad (3.25)$$

eşitsizliği gerçekleşmelidir. Aksi halde,

$$|T_c| < T_{21} \quad (3.26)$$



Şekil 3.10. Harmonic Drive mekanizmasının her iki yönden de tahrik edilmesi ($|T_c| < T_{21}$ hali)

olduğunda, hareketin istenen açısal hız ve ivmede olabilmesi için motor kademesinden de tahrik işlemi söz konusudur (Şekil 3.10). T_{21} moment direncinin aşılabilmesi için mekanizmaya her iki kademeden de güç (enerji) girişi söz konusu olduğuna göre bu durum için herhangi bir güç iletim yönü ve η_{21} genel veriminden bahsedilemez. Ancak, Şekil 3.7.b 'de görülen η' verimi söz konusudur ve bu verim yardımıyla (3.23) bağıntısında kullanmak üzere bir f katsayısı tanımlanabilir. Bunun için T_g momentini hesaplamak gerekecektir. T_{21} direncinin daima $\dot{\theta}$ hızı ile ters yönde olduğu düşünülürse,

$$\eta' N T_g = T_c + T_{21} \text{sign } \dot{\theta} \quad (3.27)$$

yazılabilir. Bu eşitlikten yararlanarak, $N T_g$ ile T_c arasındaki ilişki (3.11) ve (3.13) eşitliklerine benzer şekilde düzenlenirse f katsayısı elde edilebilir :

$$f = \frac{T_c}{N T_g} = \frac{\eta' T_c}{T_c + T_{21} \text{sign } \dot{\theta}} < 0 \quad (3.28)$$

3. Yine Tablo 3.1 'deki (y $\rightarrow$ m) hali için, $|T_c| = T_{21}$ ise (3.27) 'den $T_g = 0$ bulunur. Bu da ters yönde yüksüz çalışma halini temsil eder (no load back

driving). (3.23) ile motor momenti bulunamaz ($\eta_{21} = 0$ ve $f = \infty$). Motor kademesine ait yazılan (3.1) bağıntısı $\dot{\theta}_m = N \dot{\theta}$ alınarak yeniden düzenlenmelidir.

$$T_m = T_g + (J_m + J_1) N \ddot{\theta} + B_m N \dot{\theta} + T_{c_m} \text{sign} \dot{\theta} \quad (3.29)$$

4. $T_c = 0$ hali : Bu da bir yüksüz çalışma halidir. Diğer bir deyişle $T_g = T_{12}$ 'dir. Bu değerin (3.29) bağıntısında kullanılmasıyla T_m elde edilebilir.

Sonuç olarak, özel hallerin de dikkate alınmasıyla Tablo 3.2 oluşturulabilir. Bu tablo yardımıyla çıkış şartlarına göre ara değerleri belirlemek ve T_m hesabı için kullanılacak bağıntıları bulmak mümkündür.

Tablo 3.2. Güç iletim yönüne göre motor momentinin tayini

T_c	$\dot{\theta}$ $\left[\begin{matrix} \dot{\theta}=0 \\ \text{ise} \\ \ddot{\theta} \end{matrix} \right]$	$ T_c $	Güç iletim Yönü	Verim	f	T_g	T_m
+	+		m $\rightarrow$ y	η_{12}	η_{12}	$T_c / N f$	(3.23)
-	-		m $\rightarrow$ y	η_{12}	η_{12}	$T_c / N f$	(3.23)
+	-	$> T_{21}$	y $\rightarrow$ m	η_{21}	$1 / \eta_{21}$	$T_c / N f$	(3.23)
		$< T_{21}$	m $\rightarrow$ < y		(3.28)		
		$= T_{21}$				0	(3.29)
-	+	$> T_{21}$	y $\rightarrow$ m	η_{21}	$1 / \eta_{21}$	$T_c / N f$	(3.23)
		$< T_{21}$	m $\rightarrow$ < y		(3.28)		
		$= T_{21}$				0	(3.29)
0	+/-					$T_{12} \text{sign} \dot{\theta}$	(3.29)

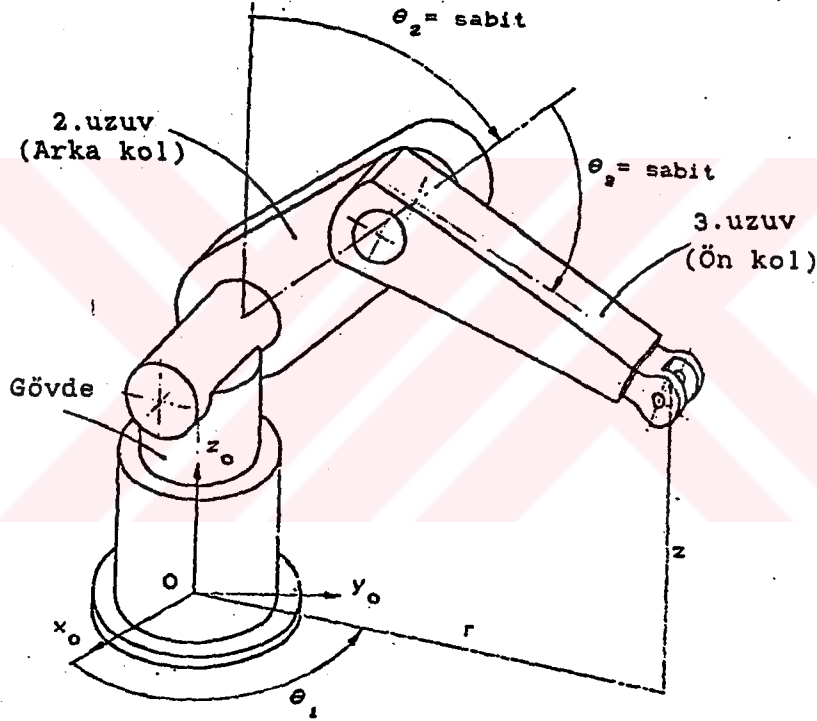
m $\rightarrow$ y : Yüksek hızlı motor kademesinden düşük hızlı yük (uzuv) tarafına doğru

y $\rightarrow$ m : Düşük hızlı yük tarafından yüksek hızlı motor kademesine doğru

m $\rightarrow$ < y : Harmonic Drive mekanizmasının her iki kademedan de tahrik edilmesi

BÖLÜM 4 : BASİT DÖNME HAREKETİNİN İNCELENMESİ

Bu bölümde, PUMA tipinde bir robota ait gövdenin belirli bir açıda dönmesi durumunda taban motoru momenti değişimi incelenmektedir. Bunun için, robot uç noktasının z yüksekliğindeki yatay bir düzlemde, $O-x_0y_0z_0$ sabit eksen takımına göre r yarıçaplı bir yörüngede belirli bir açıdaki dönme hareketi seçilebilir (Şekil 4.1).



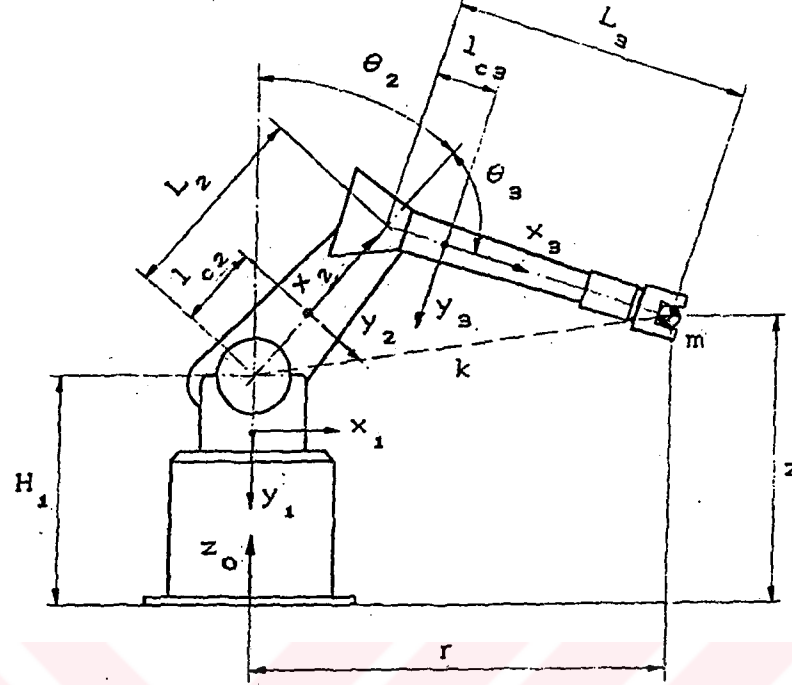
Şekil 4.1. Robot gövdesinin sabit konfigürasyonda dönmesi

Bu durumda, hareket boyunca θ_2 ve θ_3 konfigürasyon açıları sabittir ve bu dönmeleri sağlayan, diğer bir deyişle, 2 ve 3 no'lu uzuvları (Ön ve arka kol) tahrik eden motorlar sabit (statik) momentler uygularlar.

4.1. Harekete Ait Büyüklüklerin Belirlenmesi

Uç noktasının dairesel hareketinde, dönme yarıçapı r

ve yükseklik z ise (Sekil 4.2).



Sekil 4.2. Robota ait geometrik büyüklükler

$$k^2 = r^2 + (z - H_1)^2 \quad (4-1)$$

olmak üzere,

$$\theta_2 = \text{Arccos} \frac{z - H_1}{k} - \text{Arccos} \frac{k^2 + L_2^2 - L_3^2}{2 k L_2} \quad (4-2)$$

$$\theta_3 = \text{Arccos} \frac{k^2 - (L_2^2 + L_3^2)}{2 L_2 L_3} \quad (4-3)$$

olarak belirlidir. Bu açılar hareket boyunca değişmediğine göre, tüm uzuvların sabit z_0 eksenine göre eylemsizlik momentleri toplamı da sabit kalacaktır.

Robotun her uzvunun kendi kütle merkezinden geçen ve ait olduğu uzuvla beraber hareket eden eksen takımları Sekil 4.2 'de görülmektedir. Her 3 uzvun kendilerine ait bu eksen takımlarına göre 3 adet I_{x_i} , I_{y_i} ve I_{z_i} eylemsizlik momenti değerleri bilinmektedir. Ancak, her bir

uzuv sabit z_0 eksenini etrafında dönme hareketi yapmaktadır ve bu yüzden uzuvların z_0 eksenine göre $I_{z_0_1}$, $I_{z_0_2}$ ve $I_{z_0_3}$ eylemsizlik momentlerinin belirlenmesi gerekir. 1 no'lu gövde için kolaylıkla

$$I_{z_0_1} = I_{y_1} \quad (4.4)$$

yazılabilir (Şekil 4.2). 2 ve 3 no'lu uzuvlar (arka ve ön kol) için, "Eksenlerin Dönmesi" ve "Eksenlerin Paralel Kayması (Steiner)" formülleri sıra ile uygulanabilir. Arka ve ön kol kütleleri m_2 ve m_3 ise, çarpım eylemsizlik momentlerinin ihmal edilmesi durumunda,

$$I_{z_0_2} = [I_{x_2} \cos^2 \theta_2 + I_{y_2} \sin^2 \theta_2] + m_2 [l_{c_2} \sin \theta_2]^2 \quad (4.5)$$

$$I_{z_0_3} = [I_{x_3} \cos^2 (\theta_2 + \theta_3) + I_{y_3} \sin^2 (\theta_2 + \theta_3)] + m_3 [L_2 \sin \theta_2 + l_{c_3} \sin (\theta_2 + \theta_3)]^2 \quad (4.6)$$

şeklindedir. Buna göre uzuv eylemsizlikleri toplamı

$$I_{top} = I_{z_0_1} + I_{z_0_2} + I_{z_0_3} \quad (4.7)$$

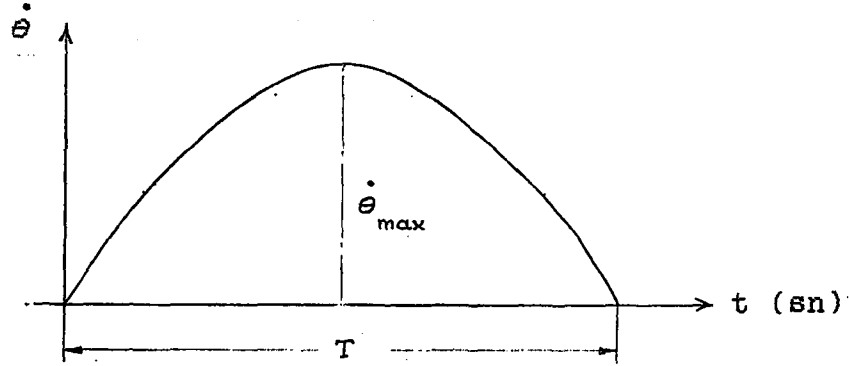
olacaktır.

4.2. Motor Momenti Değişiminin İncelenmesi

Robot uç noktası dönme açısal hızının Şekil 4.3 'te görüldüğü gibi parabolik formda bir değişime sahip olduğu kabul edilirse, toplam hareket süresi T ve maksimum açısal hız $\dot{\theta}_{max}$ olmak üzere, herhangi bir t anındaki açısal hız ve ivme,

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_{max} \left[1 - \frac{(T - 2t)^2}{T^2} \right] \quad (4.8)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{4 \dot{\theta}_{\max}}{T^2} (T - 2t) \quad (4.9)$$



Sekil 4.3. Uç noktası açısal hız değişimi

şeklindedir. Bu değerler aynı zamanda, gövde ve gövdeye ait tahrik sistemindeki yük (uzuv) kademesi için açısal hız ve ivme değerleridir. O halde ters kinematik bağıntılara gerek yoktur. Ayrıca, gövdeye verilmesi gereken momentin hesabı da basittir :

$$T_y = J_y \ddot{\theta} = I_{\text{top}} \ddot{\theta} \quad (4.10)$$

Aşağıda, robota ve gövde tahrik sistemine ait değerler görülmektedir.

Kütleler	: $m_2 = 20 \text{ kg}$	$m_3 = 24 \text{ kg}$
Kütle merkezlerinin yeri	: $l_{c_2} = 0.30 \text{ m}$	$l_{c_3} = 0.20 \text{ m}$
Boyutlar	: $H_1 = 0.70 \text{ m}$	$L_2 = 0.60 \text{ m}$
	$L_3 = 0.80 \text{ m}$	
Eylemsizlikler	: $I_{y1} = 0.24 \text{ kg.m}^2$	
	$I_{x2} = 0.10 \text{ kg.m}^2$	
	$I_{y2} = 0.90 \text{ kg.m}^2$	
	$I_{x3} = 0.10 \text{ kg.m}^2$	
	$I_{y3} = 4.60 \text{ kg.m}^2$	
Motor eylemsizliği	: $J_m = 14.5 \times 10^{-4} \text{ kg.m}$	
Motor ve yük kademeleri		
viskoz sönüm katsayıları	: $B_m = 0.0002 \text{ N.m/s}$	
	$B_y = 0.0002 \text{ N.m/s}$	

Motor ve yük kademeleri kuru

(Coulomb) sürtünmeleri : $T_{c_m} = T_{c_y} = 0.08 \text{ N.m}$

Harmonic Drive mekanizmasında

wave generator eylemsizliği : $J_1 = 11.4 \times 10^{-4} \text{ kg.m}$

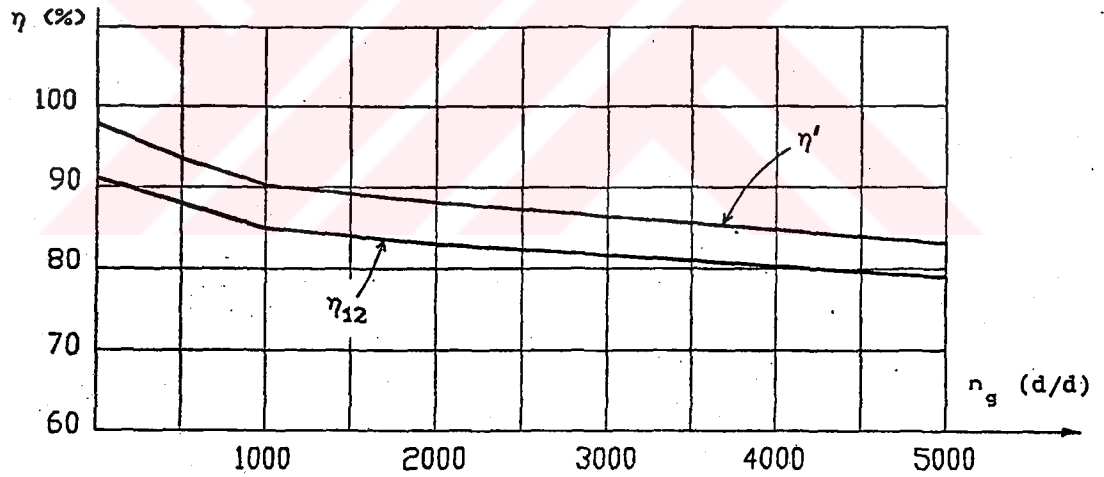
Mekanizma çevrim oranı : $N = 100$

Mekanizmada yüksüz

çalışma momentleri : $T_{12} = 0.32 \text{ Nm}$

$T_{21} = 43 \text{ Nm}$

Sekil 4.4 'te, $T_c = T_N = 470 \text{ Nm}$ nominal yük altında çalışma hali için, Harmonic Drive mekanizmasına ait yüksek hızlı kademenin n_g giriş hızına bağlı olan η_{12} genel verim değişimi görülmektedir. Aynı şekil üzerinde, bu verim değişiminden yararlanarak ve Bölüm 3.3.2 'deki hesaplama adımlarının kullanılmasıyla elde edilen hıza bağlı η' verimi değişimi de yer almaktadır.



Sekil 4.4. Giriş hızına bağlı verim değişimleri [3].

Robota ait gerekli sabit değerler bilindiğine göre, motor momenti hesabında aşağıdaki adımlar uygulanabilir:

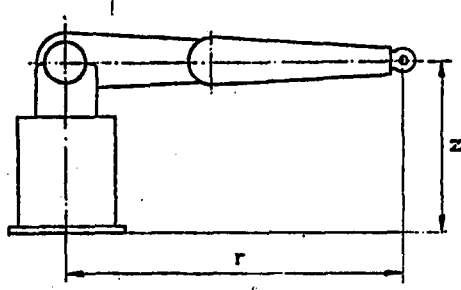
1. Uc noktasının verilen bir r yarıçapı ve z yüksekliği için, hareket boyunca sabit kalacak olan θ_2 ve θ_3 konfigürasyon açıları belirlenir ve bu açılara bağlı olarak, (4.7) ile sabit $I_{top} = J_y$ eylemsizliği hesaplanır.

2. Hareketin herhangi bir t anı için (4.8), (4.9) ve

(4.10) bağıntıları yardımıyla T_y momenti bulunur. $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$ ve T_y değerlerinin Bölüm 3.3 'teki (3.24) bağıntısında kullanılması ile, tahrik sistemindeki Harmonic Drive mekanizması çıkış tarafı için T_c hesaplanır.

4. T_c ve $\dot{\theta}$ değerleri ve Şekil 4.4 'te yer alan hıza bağlı η' verim değişiminden de yararlanarak, Tablo 3.2 yardımıyla motor momenti hesaplanır.

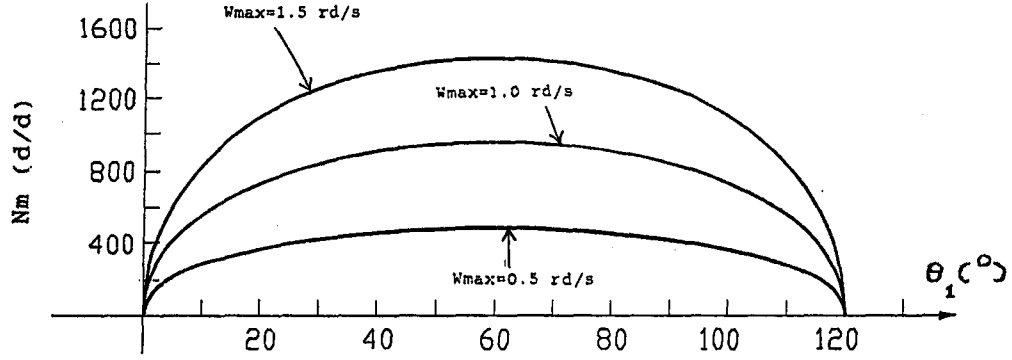
Hesaplama adımlarından da anlaşıldığı gibi, motor momentinin bulunması için güç iletim yönü ve özellikle (3.23) bağıntısında yer alan f değerinin hareketin her t anında bilinmesi gerekecektir. Ek A 'da yer alan programda; istenen bir maksimum dönme açısal hızı ve uzuv konfigürasyonu için, hareket süresince motor hızı ve momenti değişimi de elde edilmektedir. Harekete ait sonuçlar Şekil 4.5...4.8 'de görülmektedir.



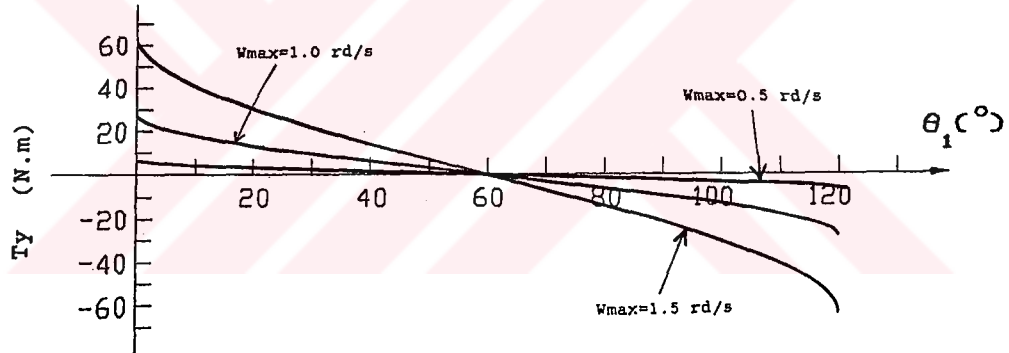
Yarıçap : $r = 1.4 \text{ m}$

Toplam dönme
açısı : $\Delta \theta_1 = 120^\circ$

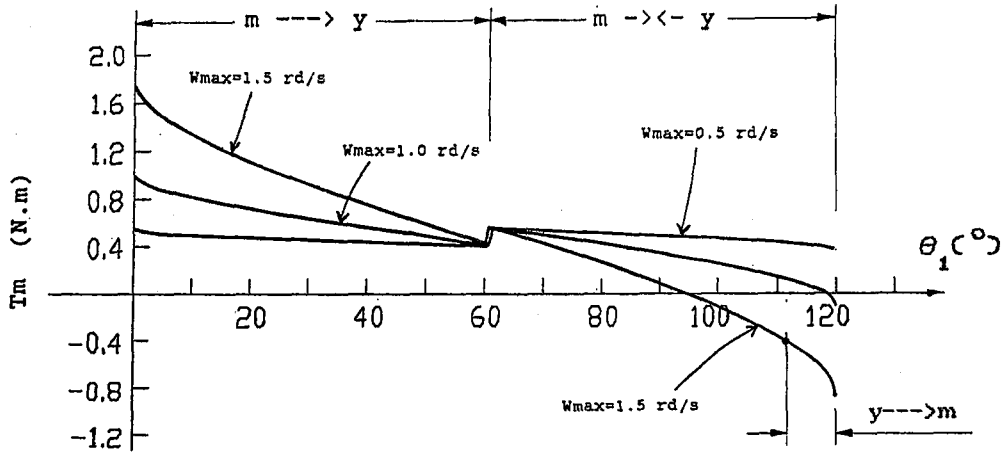
Yükseklik : $z = 0.7 \text{ m}$



a. Taban motoru hızı değişimi

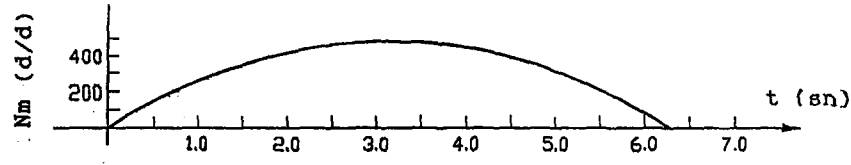


b. Gövde için mafsal seviyesi (yük) momenti değişimi

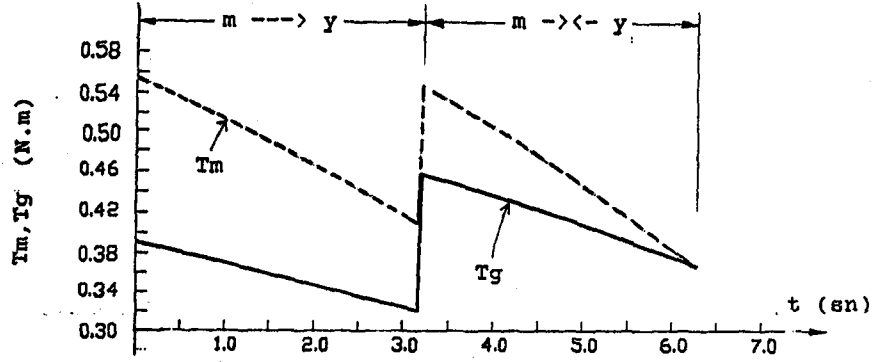


c. Taban motoru momenti değişimi

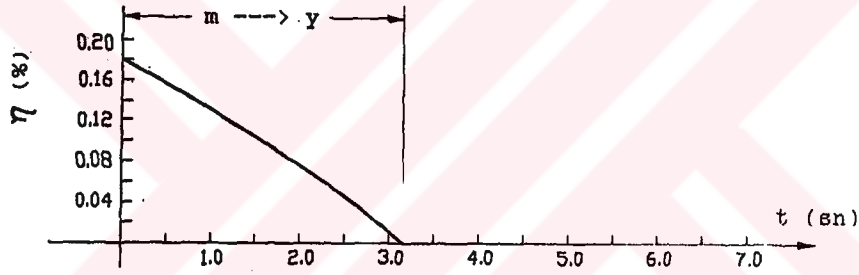
Sekil 4.5. Farklı $\omega_{\max}$ değerleri için moment ve motor hızı değişimleri



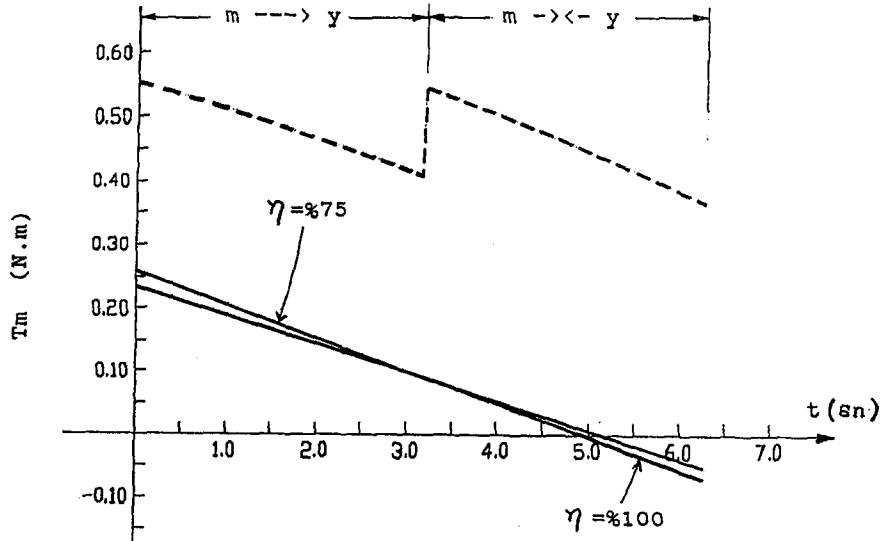
a. Taban motoru hızı değişimi



b. Motor momenti (T_m) ve Harmonic Drive mekanizmasında giriş tarafı (Şekil 3.1) momenti (T_g) değişimleri

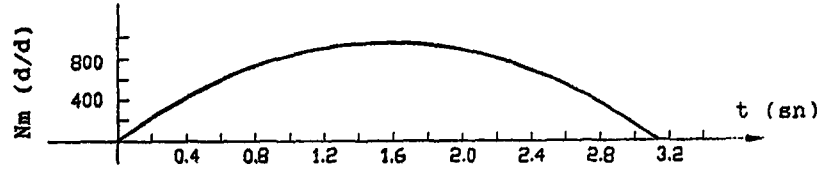


c. Harmonic Drive mekanizması verimi (η) değişimi

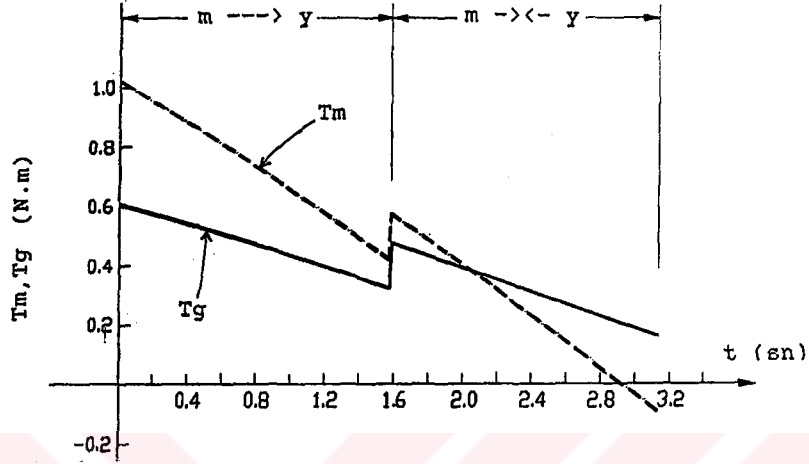
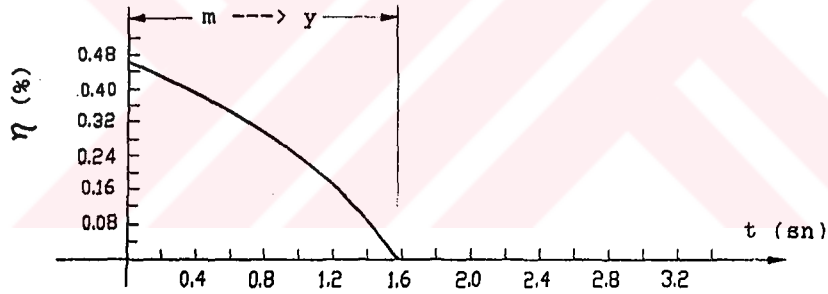
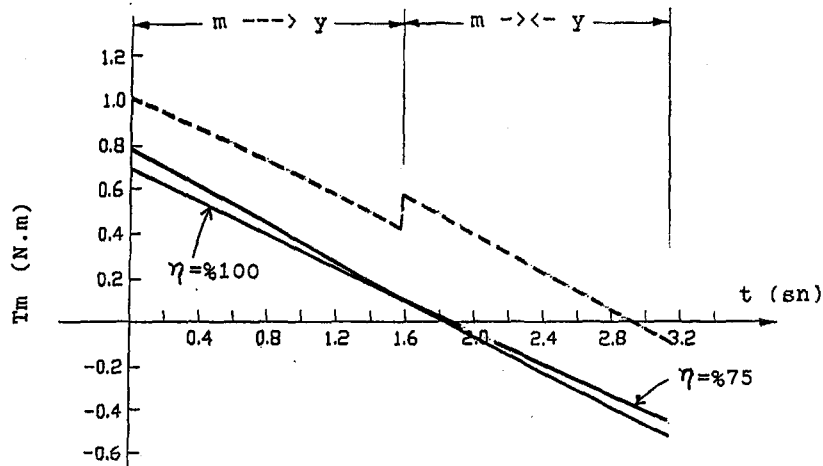


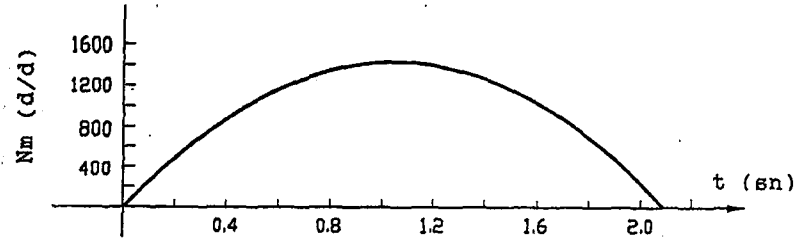
d. η = sabit kabul edilmesi durumunda motor momentinde meydana gelen değişim miktarları

Şekil 4.6. $\omega_{max} = 0.5$ rd/s için moment hız ve verim değişimleri

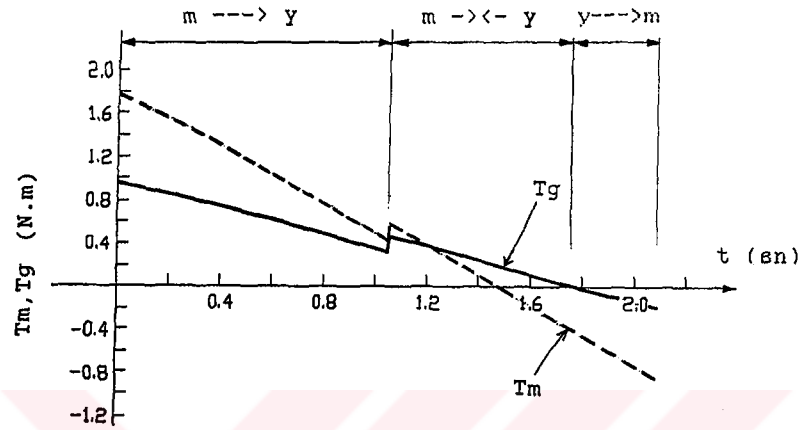
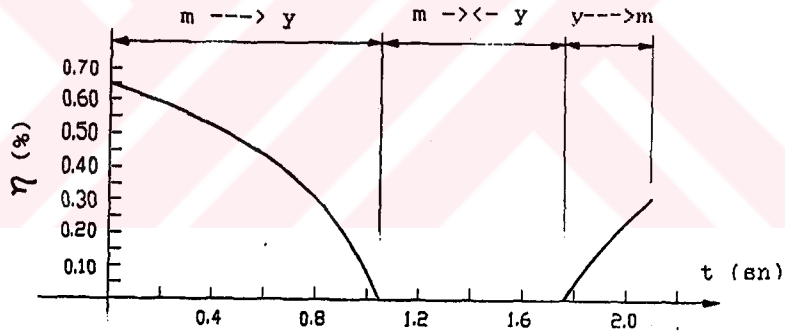
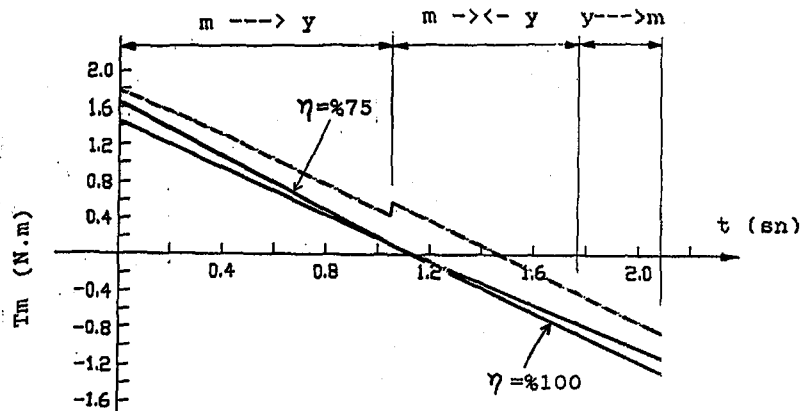


a. Taban motoru hızı değişimi

b. Motor momenti (T_m) ve Harmonic Drive mekanizmasında giriş tarafı (Şekil 3.1) momenti (T_g) değişimleric. Harmonic Drive mekanizması verimi (η) değişimid. η = sabit kabul edilmesi durumunda motor momentinde meydana gelen değişim miktarlarıŞekil 4.7. $\omega_{max} = 1.0$ rd/s için moment hız ve verim değişimleri



a. Taban motoru hızı değişimi

b. Motor momenti (T_m) ve Harmonic Drive mekanizmasında giriş tarafı (Şekil 3.1) momenti (T_g) değişimleric. Harmonic Drive mekanizması verimi (η) değişimid. η = sabit kabul edilmesi durumunda motor momentinde meydana gelen değişim miktarları

Sekil 4.8. $\omega_{\max} = 1.5 \text{ rd/s}$ için moment hız ve verim değişimleri

Farklı ω_{max} açısal hızlarına ait şekillerden de görüldüğü gibi, hızlanma sürecinde tahrik sisteminde motor kademesinden yük tarafına doğru bir güç iletimi söz konusudur. Tahrik sistemindeki tüm kayıplar için gerekli enerji bu süre içinde motor tarafından karşılanmaktadır. ω_{max} maksimum açısal hızı aşıldıktan sonra ise gövde uzvundan motor kademesine doğru bir güç iletimi olduğu düşünülebilir. Ancak, Bölüm 3 'te açıklandığı gibi, sistemde yer alan kayıplar ω dönme açısal hızında istenenden daha fazla bir yavaşlama sağlamaktadır. Kayıpların başlıca nedeni, tahrik sistemindeki Harmonic Drive mekanizması modelinde yer alan T_{21} momenti etkisi ile oluşan dirençtir. O halde, gövdenin istenen açısal hızda dönmesi için taban motorunun tahrik işlemine devam etmesi gerekecektir. Bu durumda, hem gövdenin yavaşlaması ile ortaya çıkan hem de motor tarafından verilen enerjiler Harmonic Drive mekanizmasındaki kayıpları karşılamaktadır. Bu sebeple, herhangi bir güç iletim yönteminin söz konusu olmadığı bu safhaya geçildiği anda ($m \rightarrow y$ hali) Şekil 4-5'te görülen motor momenti değişimi eğrilerinde bir süreksizlik meydana gelmektedir.

Şekil 4.6.b, 4.7.b ve 4.8.b 'de, motor momenti değişimleri yanında Harmonic Drive mekanizmasına motor kademesinden verilen T_g momenti değişimleri de görülmektedir. Her üç durum için de, hareketin hızlanma safhasında T_m ve T_g arasındaki fark ($T_m - T_g$) pozitifdir ve bu fark motor kademesinin hızlanması ve bu kademedeki viskoz ve coulomb sürtünmelerinin karşılanması için kullanılmaktadır. Maksimum hız aşıldıktan sonra ise, yukarıda da açıklandığı gibi, mekanizmaya ait T_{21} moment direncinin aşılabilmesi için motor kademesinden pozitif dönme yönünde verilmesi gereken T_g momenti, T_m motor momenti yanında kısmen de motor kademesinin yavaşlaması ile ortaya çıkan kinetik enerji farkı ile temin edilmektedir. Aşağıda motor kademesine ait (3.29) bağıntısı tekrar düzenlenmiştir.

$$T_m - T_g = (J_m + J_1) \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + T_c \text{sign} \dot{\theta}_m \quad (4.11)$$

Yavaşlama sonucu oluşan bu kinetik enerji farkı negatif değere sahip olan $(J_m + J_1) \ddot{\theta}_m$ terimi ile kendini göstermektedir. Ancak $\omega_{max} = 0.5$ rd/sn olan düşük açısal hızda bu değer, eşitliğin sağ tarafındaki diğer terimler yanında küçüktür. Bu sebeple $T_m > T_g$ 'dir. $\omega_{max} = 1.0$ rd/sn ve $\omega_{max} = 1.5$ rd/sn gibi daha büyük açısal hızlarda ise yavaşlama sürecinden kısa bir süre sonra $T_m < T_g$ olmaktadır. $T_m = 0$ olduğunda ise mekanizmaya verilmesi gereken T_g momenti ve diğer kayıplar tamamen motor kademesinin yavaşlaması ile sağlanmaktadır.

$\omega_{max} = 1.5$ rd/sn için, Şekil 4.8 'de görüldüğü gibi, hareketin sonlarına doğru $T_g = 0$ 'dır. Bu durumda, Harmonic Drive mekanizmasına ait T_{21} direnci ve yük kademesindeki kayıplar toplamı gövdenin yavaşlaması için gerekli direnci tam olarak sağlamıştır. Daha sonra ise bu kayıplar yetersiz kalmakta ve uzun frenlenmesi için negatif bir T_g momenti gerekmektedir. Bu da, hareketin bu safhasında ters yönde bir güç iletiminin (y $\rightarrow$ m) belirtisidir.

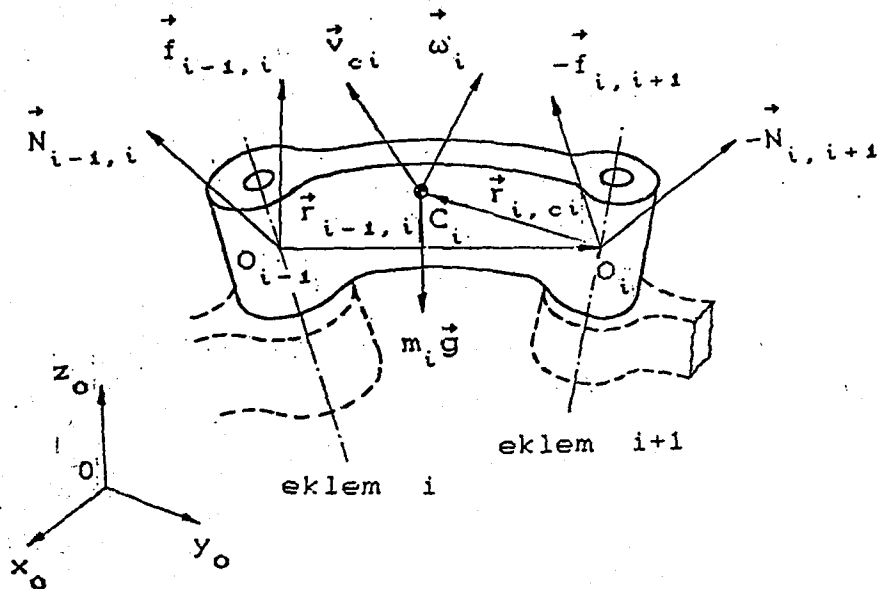
Farklı ω_{max} hızları için, Harmonic Drive mekanizması verimi değişimleri şekillerde verilmiştir. Bu verim değerleri genelde yüksek değildir ve hızlanma süreci boyunca sürekli azalmaktadır. Verimin hareket boyunca sabit kabul edildiği durumda ya da, mekanizmada herhangi bir enerji kaybının olmadığı ($\eta = \%100$) kabulleri için taban motoru momenti değişimleri şekillerde görülmektedir. Eğriler arasındaki farklar düşük ω_{max} değerlerinde nispi olarak dikkate değerdir. Bunun sebebi, $\omega_{max} = 0.5$ rd/s için mekanizma veriminin $\eta = \%75$ 'ten çok daha düşük olması ($\eta \approx \%18$) ve bu düşük verimin T_g ve buradan da (4.11) bağıntısı dolayısıyla T_m taban motoru momenti değerini etkilemesidir. $\omega_{max} = 1.5$ rd/s için ise verim başlangıçta nispeten yüksektir. Ayrıca, bu verimin etkilediği T_g değerinin T_m motor momenti üzerindeki etkisi daha azdır ve böylece eğriler nispi olarak daha yakın durumdadır.

BÖLÜM 5. MANİPÜLATÖR DİNAMIĞI

Bir manipülatörün dinamik davranışı, uzuvlara uygulanan momentlere bağlı olarak bu uzuvların konfigürasyonlarının zamana bağlı değişimleri olarak tanımlanabilir. Bu ilişkiyi ifade eden hareket denklemlerini elde etmek için 2 metot kullanılabilir. Bunlar, "Newton-Euler Hareket Denklemleri" ve "Lagrange Denklemleri" dir.

5.1. Newton-Euler Hareket Denklemleri

Bu bölümde, manipülatöre ait herhangi bir uzvun diğerlerinden bağımsız olarak hareketi ele alınacaktır. Rijit olarak kabul edilen bu uzvun hareket bağıntıları iki denklem ile simgelenebilir. Bunlardan biri kütle merkezinin hareketi ve diğeri de bu kütle merkezi etrafındaki dönme hareketi ile ilgilidir. Bunlardan ilki, bir kütle-sel parçacık için Newton'un hareket bağıntısı ve diğeri de Euler'in hareket bağıntısıdır.



Sekil 5.1. i uzvuna ait vektörel büyüklükler (1).

Şekil 5.1'de, herhangi bir i uzvuna etkiyen tüm kuvvet ve moment vektörleri görülmektedir. Burada :

- $\vec{f}_{i-1,i}$ ve $\vec{N}_{i-1,i}$: $(i-1)$ 'inci uzvun i uzvuna uyguladığı kuvvet ve moment vektörleri
- $-\vec{f}_{i,i+1}$ ve $-\vec{N}_{i,i+1}$: $(i+1)$ 'inci uzvun i uzvuna uyguladığı kuvvet ve moment vektörleri

Yere bağlı $O_o-x_o y_o z_o$ eksen takımına göre kütle merkezinin ivmesi $\vec{a}_{ci}$ ise, m_i kütleli uzva ait atalet kuvveti $-m_i \vec{a}_{ci}$ 'dir. Bu kuvvetin de ilavesiyle, n uzuvlu bir manipülatörün herhangi bir i uzvu için kuvvetler dengesi şöyle yazılabilir :

$$\vec{f}_{i-1,i} - \vec{f}_{i,i+1} + m_i \vec{g} - m_i \vec{a}_{ci} = 0 \quad (5.1)$$

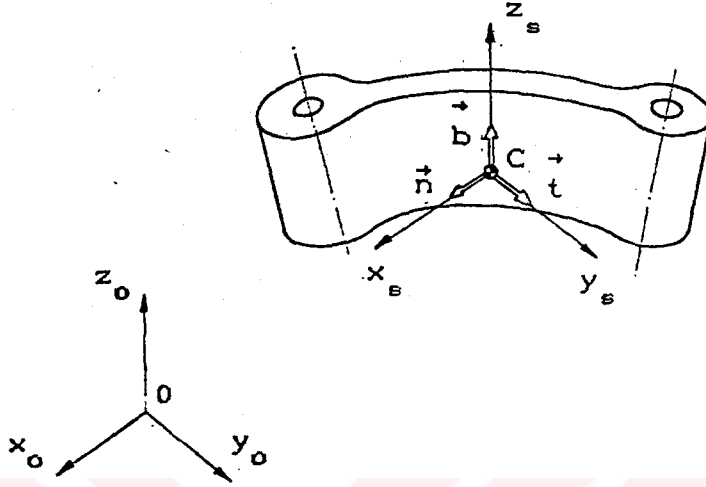
Burada $\vec{g}$ yerçekimi ivme vektörüdür. $\vec{g} = [0 \ 0 \ -9,81]^T$

Uzvu kütle merkezi etrafında dönme hareketi de aynı şekilde tanımlanabilir. Burada da, moment dengesi bağıntılarına atalet momentlerini ilave etmek gerekir. Bunun için, kütle merkezi etrafında dönme hareketine ait uzvu kütle özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Bunu simetrik bir eylemsizlik matrisi ile tanımlamak mümkündür. Uzvu kütlelesel yoğunluğu ρ ve tüm hacmi V ise,

$$I = \begin{bmatrix} \int (y_s^2 + z_s^2) \rho dV & -\int x_s y_s \rho dV & -\int x_s z_s \rho dV \\ -\int x_s y_s \rho dV & \int (x_s^2 + z_s^2) \rho dV & -\int y_s z_s \rho dV \\ -\int x_s z_s \rho dV & -\int y_s z_s \rho dV & \int (x_s^2 + y_s^2) \rho dV \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

yazılabilir. Bu eylemsizlik tansöründe yer alan integral değerleri Şekil 5.2 'deki $C-x_s y_s z_s$ eksen takımına göre

hesaplanmaktadır. Bu eksen takımı kütle merkezine bağlı ve uzuvla birlikte hareket etmesine rağmen, oryantasyonu daima $O_0-x_0y_0z_0$ yer eksen takımı ile aynıdır. Diğer bir deyişle, $C-x_sy_sz_s$ eksen takımına ait $\vec{n}$ $\vec{t}$ $\vec{b}$ birim vek-



Sekil 5.2. Uzuvla beraber hareketli eksen takımı.

törleri hareket boyunca sabit kalmaktadır. Diğer taraftan, uzvun konfigürasyonu hareket boyunca değiştiğine göre I eylemsizlik tansörü de bu konfigürasyona bağlı olarak değişecektir.

Manipülatörün herhangi bir i uzvu için açısal hız vektörü $\vec{\omega}_i$ (Şekil 5.1) ve kütle merkezine ait eylemsizlik tansörü I_i ise açısal momentum $I_i \vec{\omega}_i$ şeklindedir. Bu açısal momentum değerinin zamana göre türevi sadece $I_i \dot{\vec{\omega}}_i$ açısal ivme vektörünü değil, aynı zamanda eylemsizlik tansörünün de değişimini içerir. $\dot{\vec{\omega}}_i \times I_i \vec{\omega}_i$ şeklinde tanımlı bu değere "Jiroskopik Moment" adı verilir. Bu terimlerin ilave edilmesiyle momentler dengesi şöyledir :

$$\vec{N}_{i-1,i} - \vec{N}_{i,i+1} + \vec{r}_{i,ci} \times \vec{f}_{i,i+1} - \vec{r}_{i-1,ci} \times \vec{f}_{i-1,i} =$$

$$I_i \dot{\vec{\omega}}_i - \vec{\omega}_i \times (I_i \vec{\omega}_i) = 0 \quad (5.3)$$

Burada $\vec{r}_{i,ci}$ ve $\vec{r}_{i-1,ci}$ Şekil 5.1 'de görülen yer vektörleridir. Böylece, manipülatörün tüm uzuvlarına ait

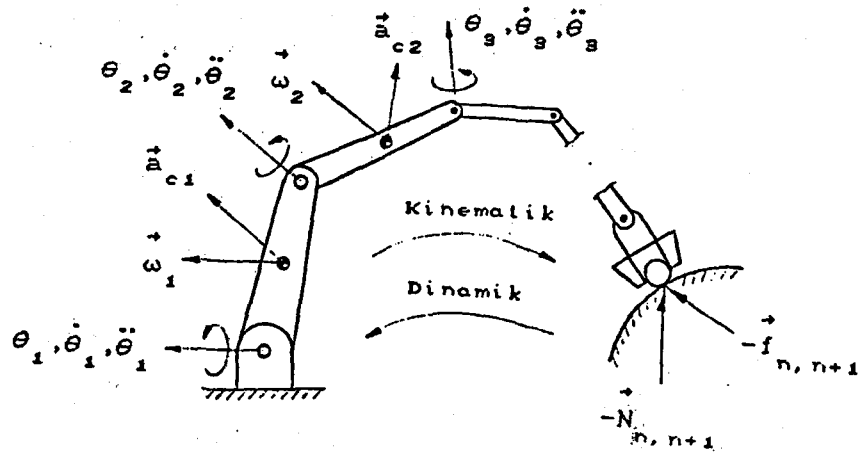
hareket denklemleri (5.1) ve (5.3) bağıntılarının her ikisinin de bu uzuvlara ayrı ayrı uygulanmasıyla elde edilebilir.

5.2. Ters Dinamik Bağıntılar

Manipülatör uç noktasının istenen yörüngede hareketinde, her bir uzva verilmesi gereken moment değerlerinin bulunmasını sağladığı için ters dinamik bağıntılar robot kontrol ve programlamada önemli rol oynamaktadır. Bu hesaplamada iki etkili hesap algoritması geliştirilmiştir. Bunlar, Lagrange formülasyonu ve Newton-Euler eşitliklerine dayanmaktadır.

5.2.1. Geri Dönüştü (Recursive) Algoritma

Newton-Euler bağıntılarına dayanan bu algoritmanın esası eşitliklerin geri dönüştü (Recursive) formda oluşturulmasıdır. n uzva sahip bir manipülatör için Şekil 5.3 'te görüldüğü gibi, hesaplama önce $i=1$ no'lu uzuvdan başlamakta ve bilinen uç noktası şartları yardımıyla son



Şekil 5.3. Geri dönüştü (Recursive) algoritma yapısı [1].

uzuvdan geriye doğru devam ederek sonuçta tüm uzuvlara verilmesi gereken momentler elde edilmektedir. Hesaplarda

kullanılan ve uzuvların konfigürasyonunu gösteren θ_i açıları ile bunlara ait $\dot{\theta}_i$ ve $\ddot{\theta}_i$ açısal hız ve açısal ivme skaler değerlerinin ters kinematik bağıntılar ile bulunduğu kabul edilmektedir.

Algoritmanın ilk fazı uzuvların tüm kinematik değişkenlerinin belirlenmesidir. Bunlar her bir uzuv için lineer ve açısal hızlar ile bunlara ait ivme vektörleridir. Algoritma 1. uzuv ile başlar. Bilinen $\dot{\theta}_1$ ve $\ddot{\theta}_1$ skaler değerleri yardımıyla 1. uzuv kütle merkezi C_1 'e ait hız ve ivme vektörleri ($\vec{v}_{c1}$, $\vec{\omega}_1$, $\vec{a}_{c1}$ ve $\dot{\vec{\omega}}_1$) hesaplanır. Bulunan bu vektörel büyüklükler ve 2. uzva ait $\dot{\theta}_2$ ve $\ddot{\theta}_2$ değerleri yardımıyla 2. uzuv kütle merkezi C_2 için de $\vec{v}_{c2}$, $\vec{\omega}_2$, $\vec{a}_{c2}$ ve $\dot{\vec{\omega}}_2$ değerleri elde edilir. Bu işlemler diğer uzuvların kütle merkezleri için de aynı şekilde sürdürülerek tüm uzuvların kinematik değişkenleri bulunur.

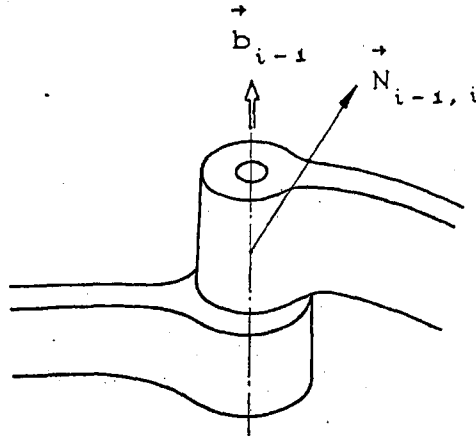
Geri dönüşlü algoritmanın ikinci aşaması, ilk aşamada hesaplanan kinematik değişkenleri kullanarak tüm uzuvlara verilmesi gereken T_{yi} momentlerinin bulunmasıdır. Herhangi bir i uzvu için (5.1) ve (5.3) eşitlikleri yeniden düzenlenirse,

$$\vec{f}_{i-1,i} = \vec{f}_{i,i+1} - m_i \vec{g} + m_i \vec{a}_{ci} \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} \vec{N}_{i-1,i} = & \vec{N}_{i,i+1} - \vec{r}_{i,ci} \times \vec{f}_{i,i+1} + \\ & \vec{r}_{i-1,ci} \times \vec{f}_{i-1,i} + I_i \dot{\vec{\omega}}_i + \vec{\omega}_i \times (I_i \vec{\omega}_i) \end{aligned} \quad (5.5)$$

elde edilir. İşlem en son uzuvdan başlar. Manipülatör n uzva sahipse, son uzuv için (5.4) ve (5.5) bağıntılarında $i=n$ alınarak elde edilen $\vec{f}_{n,n+1}$ ve $\vec{N}_{n,n+1}$ vektörleri manipülatör uç noktasından dış çevreye iletilen kuvvet ve moment vektörleridir. Hareket boyunca bu vektörler bilindiğine göre, (5.4) eşitliğinden $\vec{f}_{n-1,n}$ kuvveti ve bu değer (5.5) eşitliğinin sağ tarafında kullanılmasıyla da $\vec{N}_{n-1,n}$ moment vektörü elde edilebilir. Aynı işlemler $i=1$

olana kadar sürdürülerek tüm uzuvlar için $N_{i-1,i}$ moment



Sekil 5.4. i uzvuna uygulanan moment ve dönme eksen.

vektörleri elde edilebilir. i uzvunun (i-1) 'inci uzva göre hareketinde dönme ekseninde yer alan birim vektör $\vec{b}_{i-1}$ ise (Şekil 5.4), i uzvuna verilmesi gereken moment,

$$T_{yi} = \vec{b}_{i-1} \cdot \vec{N}_{i-1,i} \quad (5.6)$$

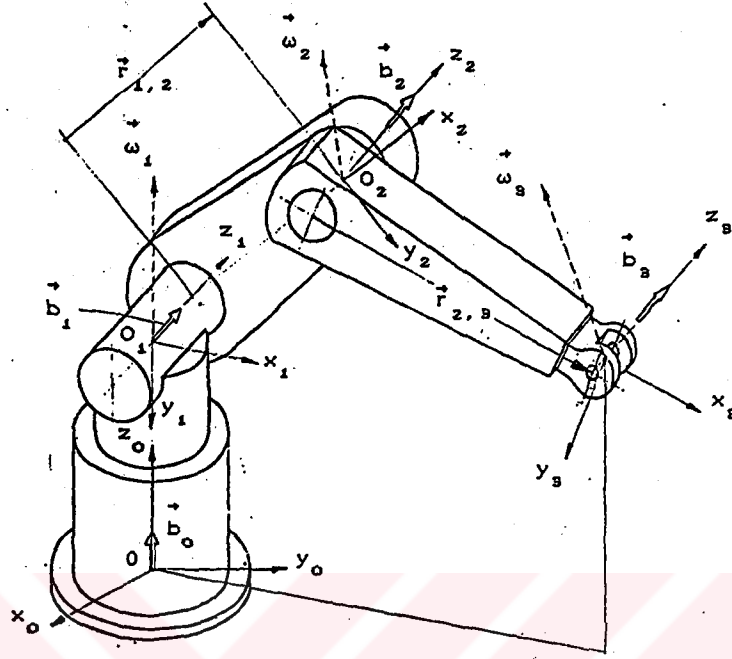
skaler çarpımı ile bulunabilir. Bu değer i uzvunu tahrik eden mekanizma için (3.23) bağıntısında yer alan T_y yük momenti değeridir.

5.2.2. Kinematik Büyüklüklerin Belirlenmesi

Manipülatöre ait (5.4) ve (5.5) eşitliklerinin kullanılabilmesi için, geri dönüşlü (recursive) algoritmanın ilk aşamasında yer alan kinematik değişkenlerin ($\vec{\omega}_i$, $\vec{a}_{ci}$ ve $\dot{\vec{\omega}}_i$) bilinmesi gerekmektedir. Bunun için öncelikle uzuvlara bağlı olan eksen takımlarının (Şekil 5.5) mutlak hareketlerine ait hız ve ivmeler belirlenmelidir.

Manipülatörün herhangi bir i uzvuna ait $O_i-x_i y_i z_i$ eksen takımının hız ve ivme vektörleri $\vec{v}_{ci}$, $\dot{\vec{\omega}}_i$, $\vec{a}_{ci}$ ve $\dot{\vec{\omega}}_i$ biliniyorsa, (i+1) 'inci uzva ait $O_{i+1}-x_{i+1} y_{i+1} z_{i+1}$ eksen takımının kinematik büyüklükleri de bağlı hareketler

için bilinen bağıntılar yardımıyla elde edilebilir. Buna göre lineer hız şöyle tanımlanabilir :



Sekil 5.5. Robot uzuvlarına ait eksen takımları.

$$\vec{v}_{i+1} = \vec{v}_i + \frac{d \vec{r}_{i,i+1}}{dt} \Big|_{\text{bağıl}} + \vec{\omega}_i \times \vec{r}_{i,i+1} \quad (5.7)$$

Coriolis ve santrifüj etkileri de içeren lineer ivme ise,

$$\vec{a}_{i+1} = \vec{a}_i + \frac{d^2 \vec{r}_{i,i+1}}{dt^2} \Big|_{\text{bağıl}} + \dot{\vec{\omega}}_i \times \vec{r}_{i,i+1} +$$

$$\vec{\omega}_i \times (\vec{\omega}_i \times \vec{r}_{i,i+1}) + 2\vec{\omega}_i \times \frac{d \vec{r}_{i,i+1}}{dt} \Big|_{\text{bağıl}} \quad (5.8)$$

şeklindedir. Luh-Walker-Paul tarafından geliştirilen algoritmaya göre, dönel eklemlili uzuv bağlantısı için,

$$\vec{\omega}_{i+1} = \vec{\omega}_i + \dot{\theta}_{i+1} \vec{b}_i \quad (5.9)$$

$$\dot{\vec{r}}_{i+1} = \dot{\vec{r}}_i + \ddot{\theta}_{i+1} \vec{b}_i + \vec{\omega}_i \times \dot{\theta}_i \vec{b}_i \quad (5.10)$$

yazılabilir. (5.7) ve (5.8) bağıntılarında $\vec{r}_{i,i+1}$ yer vektörünün zamana göre alınan türevleri bağıl hız ve ivmelerdir. Dönel eklemler için,

$$\left. \frac{d \vec{r}_{i,i+1}}{dt} \right|_{\text{bağıl}} = \dot{\theta}_{i+1} \vec{b}_i \times \vec{r}_{i,i+1} \quad (5.11)$$

$$\left. \frac{d^2 \vec{r}_{i,i+1}}{dt^2} \right|_{\text{bağıl}} = \ddot{\theta}_{i+1} \vec{b}_i \times \vec{r}_{i,i+1} + \dot{\theta}_{i+1} \vec{b}_i \times (\dot{\theta}_{i+1} \vec{b}_i \times \vec{r}_{i,i+1}) \quad (5.12)$$

yazılabilir. (5.9) ve (5.11) eşitlikleri yardımıyla (5.7) bağıntısı

$$\vec{v}_{i+1} = \vec{v}_i + \vec{\omega}_{i+1} \times \vec{r}_{i,i+1} \quad (5.13)$$

şeklinde yazılabilir. Aynı şekilde, (5.10) ve (5.12) eşitliklerinden yararlanarak (5.8) bağıntısı yeniden düzenlenebilir. Herhangi 3 vektörel büyüklük için,

$$(\vec{a} \times \vec{b}) \times \vec{c} = (\vec{a} \cdot \vec{c}) \vec{b} - (\vec{b} \cdot \vec{c}) \vec{a} \quad (5.14)$$

$$\vec{a} \times (\vec{b} \times \vec{c}) = (\vec{a} \cdot \vec{c}) \vec{b} - (\vec{a} \cdot \vec{b}) \vec{c} \quad (5.15)$$

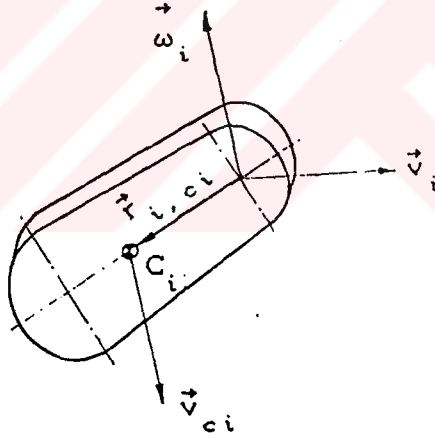
şeklinde bilinen vektörel çarpım kuralları kullanılarak,

$$\vec{a}_{i+1} = \vec{a}_i + \dot{\vec{r}}_{i,i+1} + \vec{\omega}_{i+1} \times (\vec{\omega}_{i+1} \times \vec{r}_{i,i+1}) \quad (5.16)$$

elde edilir. (5.13) ve (5.16) eşitlikleri ile hesaplanan hız ve ivmeler, uzuvlara değişmez olarak bağlı eksen takımlarının (Şekil 5.5) orijinlerine ait vektörel büyüklere aittir. Ancak Newton-Euler eşitliklerinden yararlanılan geri dönüşlü (recursive) algoritmada, (5.4) bağıntısında görüldüğü gibi uzuvların kütle merkezlerine ait $\vec{a}_{ci}$ ivme vektörlerinin bilinmesi gerekmektedir. Herhangi bir i uzvuna ait $O_i-x_i y_i z_i$ eksen takımının hız ve ivme vektörleri $\vec{v}_i$ ve $\vec{a}_i$ ise, bu uzvun kütle merkezi için aşağıdaki eşitlikler geçerlidir :

$$\vec{v}_{ci} = \vec{v}_i + \vec{\omega}_i \times \vec{r}_{i,ci} \quad (5.17)$$

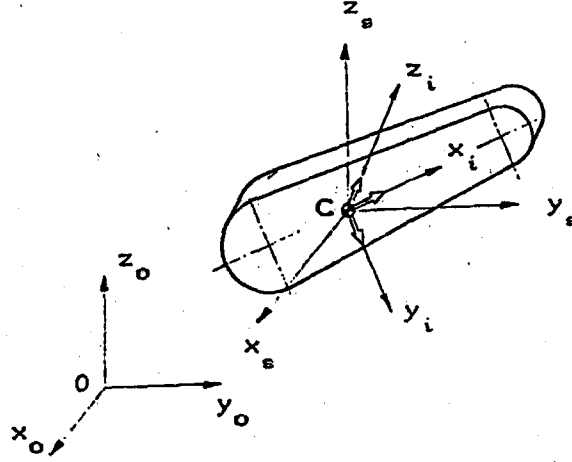
$$\begin{aligned} \vec{a}_{ci} = \vec{a}_i + \dot{\vec{\omega}}_i \times \vec{r}_{i,ci} + \\ \vec{\omega}_i \times (\vec{\omega}_i \times \vec{r}_{i,ci}) \end{aligned} \quad (5.18)$$



Şekil 5.6. Kütle merkezi hız vektörünün tayini [1].

Newton-Euler bağıntılarında hesaplanması gereken bir büyüklük de I_i eylemsizlik tansörüdür. Bu simetrik matrisin (5.2) bağıntısında verildiği gibi hareketin her anı için integral hesabı ile belirlenmesi zordur. Bunun için i uzvuna değişmez şekilde bağlı $C-x_i y_i z_i$ eksen takımından yararlanılabilir (Şekil 5.7). Kütle merkezinde yer alan bu eksen takımına göre tanımlı uzvun $\bar{I}_i$ eylemsizlik momenti hareket boyunca sabittir. $C-x_i y_i z_i$ eksen takımının birim vektörleri $\vec{n}_i$, $\vec{t}_i$ ve $\vec{b}_i$ ise, bu eksen takımının

Şekil 5.2 'de tanımlı $C-x_s y_s z_s$ eksen takımına (ya da sabit $O-x_o y_o z_o$ eksen takımına) göre oryantasyonunu gösteren matris,



Şekil 5.7. i uzvuna bağlı eksen takımları.

$$R_i = \begin{bmatrix} \vec{n}_i & \vec{t}_i & \vec{b}_i \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

şeklindedir. Hareket boyunca sürekli değişen (3×3) elemanlı bu matris yardımıyla Newton-Euler hareket bağıntılarında yer alan eylemsizlik tansörü;

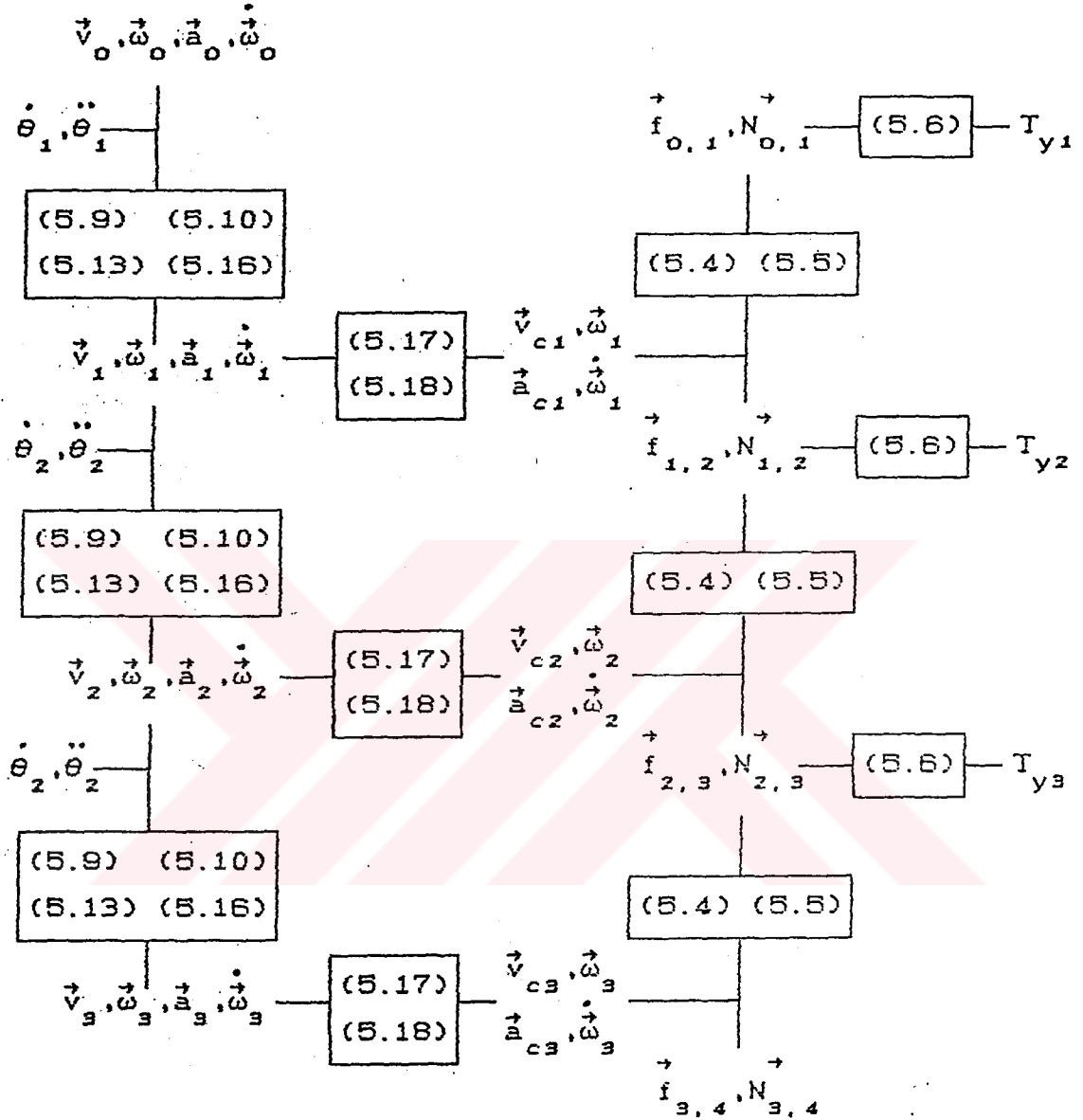
$$I_i = R_i \bar{I}_i R_i^T \quad (5.20)$$

şeklinde 3 matrisin art arda çarpımı ile elde edilebilir.

Uç dönmeye haiz bir manipülatör için Luh-Walker-Paul e dayanan geri dönüşlü (recursive) algoritma yapısı özetle Şekil 5.8 'de görüldüğü gibidir. Şeklin sol yarısı kinematik değişkenlerin, sağ tarafı ise dinamik büyüklüklerin hesaplanmasını gösteren bloklardır (bloklarda yer alan bilgiler hesaplarda kullanılan bağıntı numaralarını göstermektedir).

Kinematik hesaplama aşağı doğru ilerlemekte ve daha sonra yukarı doğru geri dönülerek dinamik büyüklükler elde edilmektedir. Ters kinematik bağıntılarıyla bulunan dönel eklemlerdeki $\dot{\theta}_i$ ve $\ddot{\theta}_i$ skaler büyüklükleri yatay

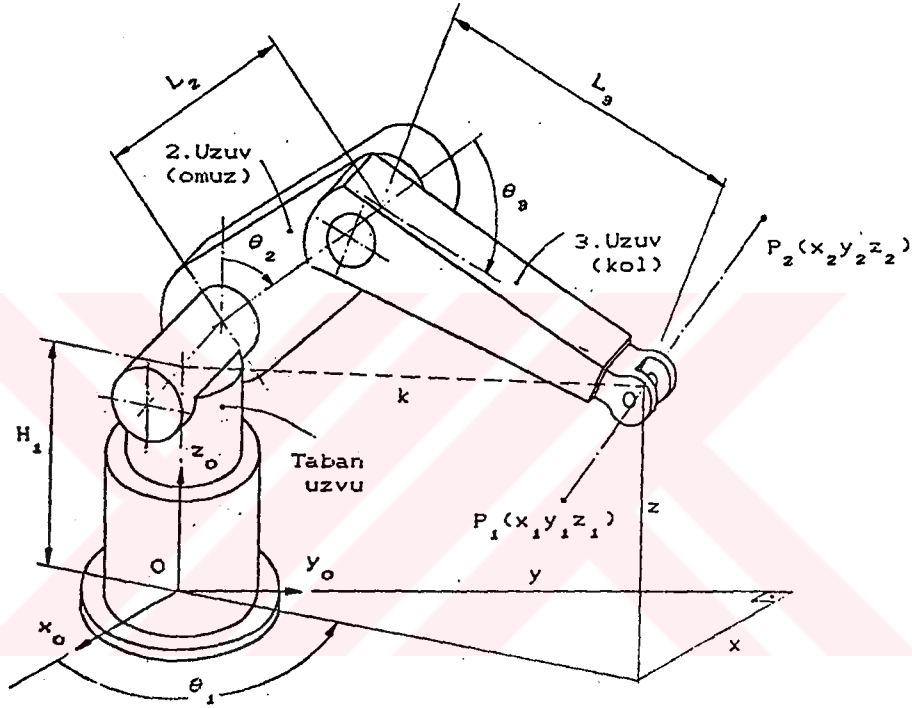
olarak verilmiş bilgi girişleridir. Son sütunda yer alan değerler ise, sonuçta bulunan ve her bir uzva verilmesi gereken T_{yi} momentleridir.



Sekil 5.8. Luh-Walker-Paul 'e dayanan geri dönlü (recursive) algoritma yapısı [1].

BÖLÜM 6. DÜŞEY HAREKETİN İNCELENMESİ

Bu bölümde, robot uç noktasının istenen P_1 başlangıç ve P_2 bitiş noktaları arasındaki doğrusal yörüngede hareketi incelenmektedir. Bölüm 5 'te yer alan manipülatör



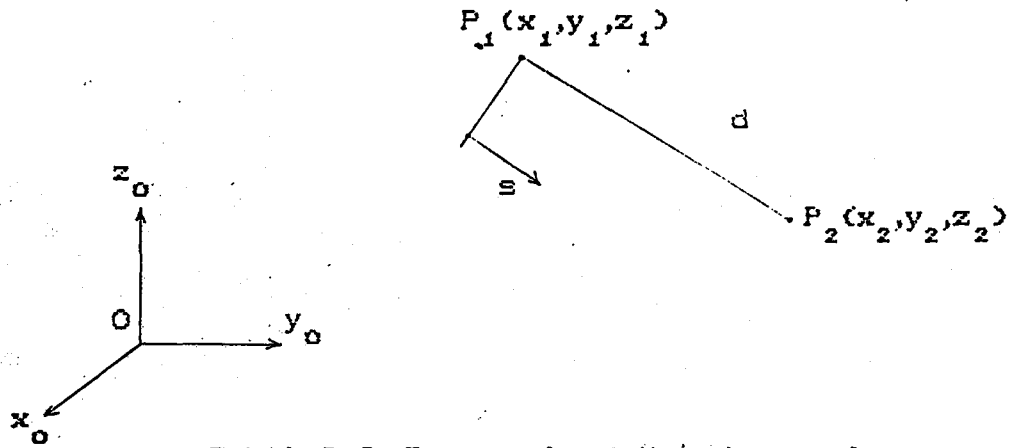
Şekil 6.1. Robot uç noktasının doğrusal hareketi.

dinamiği bağıntılarından da yararlanarak yapılan hesaplamada, özellikle düşey doğrultudaki aşağıya doğru hareket için arka ve ön kola ait (Şekil 6.1) motor momentlerinin değişimleri ele alınmaktadır.

6.1. Harekete Ait Özelliklerin Belirlenmesi

6.1.1. Uzun Konfigürasyonlarının Değişimi

Uç noktasının, $P_1(x_1, y_1, z_1)$ den $P_2(x_2, y_2, z_2)$ noktasına doğru hareketi söz konusu olduğuna göre (Şekil 6.2), bu doğrusal hareket boyunca alınan yol,



Şekil 6.2. Doğrusal yörüngede s yolu.

$$d^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 \quad (6.1)$$

olacaktır. Bu sabit yörüngeye ait doğrultu cosinüsleri

$$\cos \alpha = (x_2 - x_1) / d \quad (6.2)$$

$$\cos \beta = (y_2 - y_1) / d \quad (6.3)$$

$$\cos \gamma = (z_2 - z_1) / d \quad (6.4)$$

olarak tanımlanabilir. Yörünge üzerinde herhangi bir t anında alınan yol s olmak üzere, başlangıçta $P_1(x_1, y_1, z_1)$ konumunda olan uç noktası bu t anında,

$$x = x_1 + s \cos \alpha \quad (6.5)$$

$$y = y_1 + s \cos \beta \quad (6.6)$$

$$z = z_1 + s \cos \gamma \quad (6.7)$$

koordinatlarında olacaktır. Uç noktasının bu $P(x, y, z)$ konumu için uzuvların konfigürasyon açıları geometrik olarak belirlenebilir.

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (6.8)$$

$$r^2 + (z - H_1)^2 = k^2 \quad (6.9)$$

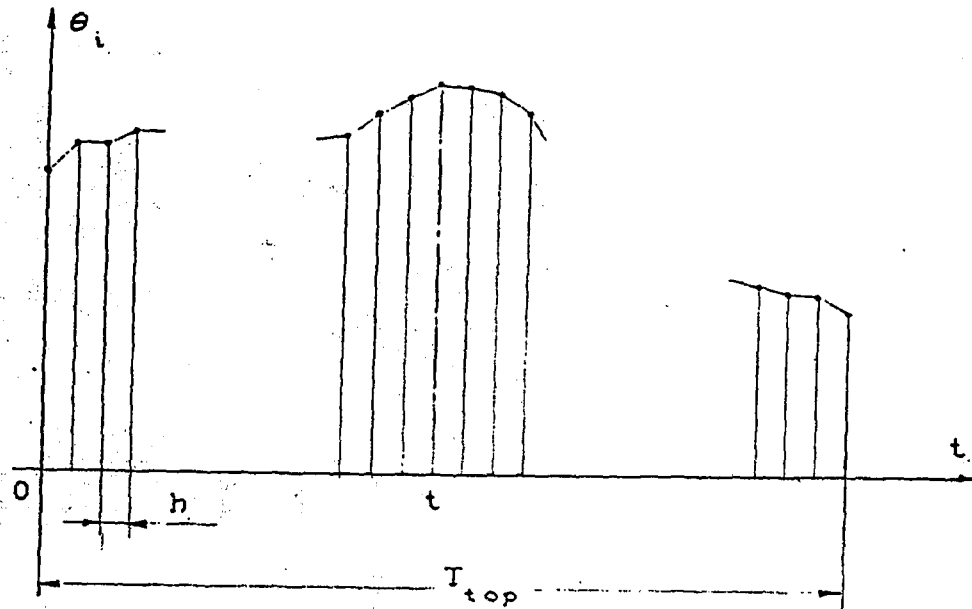
olmak üzere Şekil 6.1 yardımıyla

$$\theta = \text{Arctg} (y / x) \quad (6.10)$$

$$\theta_2 = \text{Arccos} \frac{z - H_1}{k} - \text{Arccos} \frac{k^2 + L_2^2 - L_3^2}{2 k L_2} \quad (6.11)$$

$$\theta_3 = \text{Arccos} \frac{k^2 - (L_2^2 + L_3^2)}{2 L_2 L_3} \quad (6.12)$$

elde edilir. Manipülatör dinamiği denklemlerinde kullanmak üzere bu θ_i konfigürasyon açılarının zamana göre $\dot{\theta}_i$ ve $\ddot{\theta}_i$ türevleri ters kinematik bağıntılarla elde edilebilir. Ancak bu değerler "Sonlu Farklar Metodu"nun basit bir uygulaması ile de kolayca hesaplanabilmektedir. Bunun için uç noktasının zamana bağlı $P(x,y,z)$ konumunun belirli olmasından yararlanılır. $t=0$ 'dan başlayarak her küçük zamana adımı (h) için uzvun θ_i konfigürasyon açısı belirlenir. Böylece h değerinin küçüklüğü oranında bir hassasiyetle uzvun zamana bağlı $\theta_i(t)$ açısı değişimi bulunmuş olur. Şekil 6.3 'ten de görüldüğü gibi herhangi



Şekil 6.3. Konfigürasyon açısının zamanla değişimi.

bir t anı için bu açı $\theta_i(t)$ ise " Merkezi Farklar Metodu " kullanılarak

$$\dot{\theta}_i(t) = \frac{\theta_i(t+h) - \theta_i(t-h)}{2h} \quad (6.13)$$

$$\ddot{\theta}_i(t) = \frac{\theta_i(t-h) - 2\theta_i(t) + \theta_i(t+h)}{h^2} \quad (6.14)$$

şeklinde $\dot{\theta}_i$ ve $\ddot{\theta}_i$ türevleri elde edilir.

6.1.2. Vektörel Büyüklüklerin Belirlenmesi

Bölüm 5 'te yer alan Luh-Walker-Paul algoritmasındaki hız-ivme ve kuvvet-moment değerlerinin belirlenebilmesi için Şekil 6.1 'deki manipülatöre ait vektörel büyüklüklerin bilinmesi gerekir.

$$\begin{aligned} \cos \theta_1 &= C_1 & \sin \theta_1 &= S_1 \\ \cos \theta_2 &= C_2 & \sin \theta_2 &= S_2 \end{aligned} \quad (6.15)$$

$$\cos (\theta_1 + \theta_2) = C_{12} \quad , \quad \sin (\theta_1 + \theta_2) = S_{12}$$

olmak üzere uzuvlara ait dönme birim vektörleri Şekil 6.4 e göre

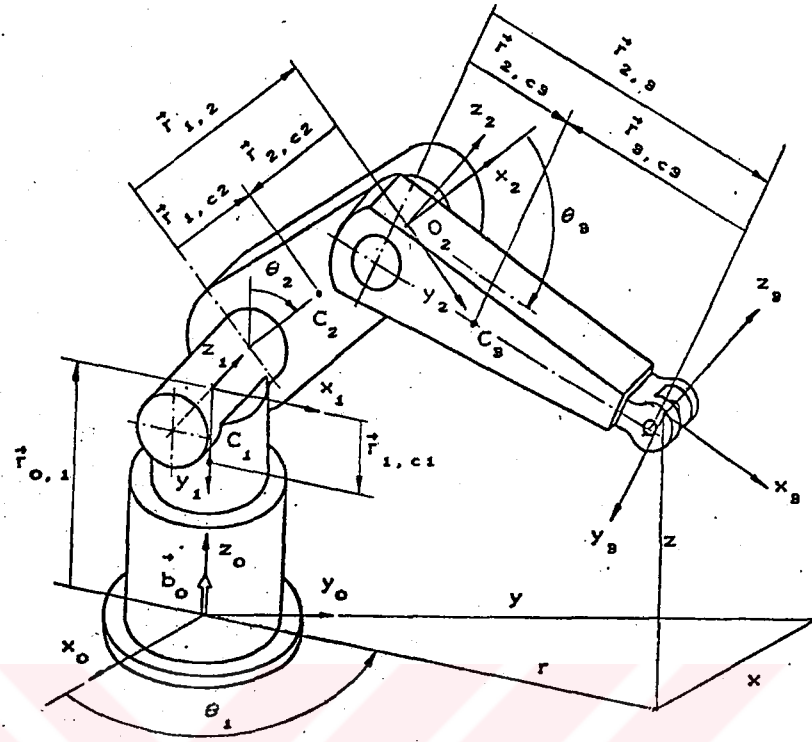
$$\vec{b}_0 = [0 \ 0 \ 1]^T \quad (6.16)$$

$$\vec{b}_1 = \vec{b}_2 = [-S_1 \ C_1 \ 0]^T \quad (6.17)$$

olarak tanımlanabilir. $i=1$ nolu uzva ait $O_1-x_1y_1z_1$ eksen takımı basit bir dönme hareketi yaptığından buna ait kinematik büyüklükler kolaylıkla bulunabilir :

$$\vec{v}_1 = \vec{a}_1 = 0 \quad (6.18)$$

$$\vec{\omega}_1 = \dot{\theta}_1 \vec{b}_0 = [0 \ 0 \ \dot{\theta}_1]^T \quad (6.19)$$



Şekil 6.4. Uzuvlara ait koordinatlar ve yer vektörleri.

$$\vec{\omega}_1 = \dot{\theta}_1 \vec{b}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ \dot{\theta}_1]^T \quad (6.20)$$

$i=1$ uzvu için bilinen bu kinematik büyüklükler yardımıyla (5.9) ve (5.10) bağıntılarını kullanarak $i=2$ ve daha sonra da $i=3$ için açısal hız ve ivme vektörleri bulunabilir. Uzuvlara bağlı eksen takımlarına ait yer vektörleri

$$\vec{r}_{12} = [L_2 C_1 S_2 \quad L_2 S_1 S_2 \quad L_2 C_2]^T \quad (6.21)$$

$$\vec{r}_{23} = [L_3 C_1 S_{23} \quad L_3 S_1 S_{23} \quad L_3 C_{23}]^T \quad (6.22)$$

şeklinde tanımlanırsa, $i=2$ ve $i=3$ uzuvları için lineer hız ve ivmeleri de (5.13) ve (5.16) bağıntıları ile hesaplamak mümkündür. Kütle merkezlerine ait

$$\vec{r}_{0,c1} = [0 \ 0 \ h_1]^T \quad (6.23)$$

$$\vec{r}_{1,c1} = [0 \ 0 \ (h_1 - H_1)]^T \quad (6.24)$$

$$\vec{P}_{1,c2} = (1_{c2} / L_2) \cdot \vec{P}_{1,2} \quad (6.25)$$

$$\vec{P}_{2,c2} = ((1_{c2} - L_2) / L_2) \cdot \vec{P}_{1,2} \quad (6.26)$$

$$\vec{P}_{2,c3} = (1_{c3} / L_3) \cdot \vec{P}_{2,3} \quad (6.27)$$

$$\vec{P}_{3,c3} = ((1_{c3} - L_3) / L_3) \cdot \vec{P}_{2,3} \quad (6.28)$$

yer vektörleri yardımıyla ise Newton-Euler bağıntıları için gerekli kütle merkezi hız ve ivmelerini veren (5.17) ve (5.18) bağıntıları kullanılabilir. Böylece geri dönüşlü (recursive) algoritmaya ait kinematik büyüklükler elde edilmiş olacaktır.

Manipülatör uzuvlarına ait belirlenmesi gereken son büyüklük de konfigürasyon bağımlı I_i eylemsizlik tansörleridir. Herhangi bir i uzvunun kendisine değişmez bağlı ve kütle merkezinden geçen C_i - $x_i y_i z_i$ eksen takımına göre eylemsizlik tansörü (çarpım eylemsizlik momentleri ihmal edilmek üzere),

$$\bar{I}_i = \begin{bmatrix} I_{xi} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yi} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zi} \end{bmatrix} \quad (6.29)$$

sabit değerindedir. Uzuvlara bağlı eksen takımlarının (Şekil 6.4) O - $x_o y_o z_o$ eksen takımına göre konfigürasyonlarını veren matrisler şöyle tanımlanabilir :

$$R_1 = [\vec{n}_1 \ \vec{t}_1 \ \vec{b}_1] = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 \\ S_1 & 0 & C_1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.30)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} \vec{n}_2 & \vec{t}_2 & \vec{b}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 S_2 & C_1 C_2 & -S_1 \\ S_1 S_2 & S_1 C_2 & C_1 \\ C_2 & -S_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.31)$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} \vec{n}_3 & \vec{t}_3 & \vec{b}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 S_{23} & C_1 C_{23} & -S_1 \\ S_1 S_{23} & S_1 C_{23} & C_1 \\ C_{23} & -S_{23} & 0 \end{bmatrix} \quad (6.32)$$

Bu durumda (5.20) bağıntısını kullanarak konfigürasyon bağımlı I_i eylemsizlik tansörünü elde etmek mümkündür. Örneğin, $i=1$ nolu uzuv için

$$I_1 = R_1 \bar{I}_1 R_1^T \quad (6.33)$$

$$I_1 = \begin{bmatrix} (C_1^2 I_{x1} + S_1^2 I_{z1}) & C_1 S_1 (I_{x1} - I_{z1}) & 0 \\ C_1 S_1 (I_{x1} - I_{z1}) & (S_1^2 I_{x1} + C_1^2 I_{z1}) & 0 \\ 0 & 0 & I_{y1} \end{bmatrix} \quad (6.34)$$

simetrik matrisi elde edilir.

6.2. Düşey Doğrusal Hareketin İncelenmesi

Harekete ait kinematik özellikler belirlendiğine göre, (5.4) ve (5.5) bağıntılarını kullanarak her bir uzuv için moment vektörlerini ve (5.6) ile de T_{yi} yük momentlerini bulmak mümkün olacaktır.

Manipülatör uç noktasında yer alan bilek mekanizması

ihmal edilmesine rağmen, bu mekanizmaya ait kütle, 1 = 3 no'lu ön kola ait kütesel özelliklere kabaca ilave edilebilir. Böylece, uç noktadan çevreye iletilen kuvvet ve

Tablo 6.1. Robota ait uzuv ölçüleri

		1. uzuv (Gövde)	2. uzuv (Arka Kol)	3. uzuv (Ön Kol)
Boyutlar		$H_1 = 0.7 \text{ m}$	$L_2 = 0.6 \text{ m}$	$L_3 = 0.8 \text{ m}$
Kütle merkezlerinin yerleri		$h_1 = 0.5 \text{ m}$	$l_{c2} = 0.3 \text{ m}$	$l_{c3} = 0.20 \text{ m}$
Kütleler		$m_1 = 20 \text{ kg}$	$m_2 = 20 \text{ kg}$	$m_3 = 24 \text{ kg}$
Kütle merkezlerine göre tanımlı Eylemsizlikler [kg.m ²]	I_{xi}	0.08	0.10	0.10
	I_{yi}	0.24	0.90	4.60
	I_{zi}	0.08	0.90	4.60

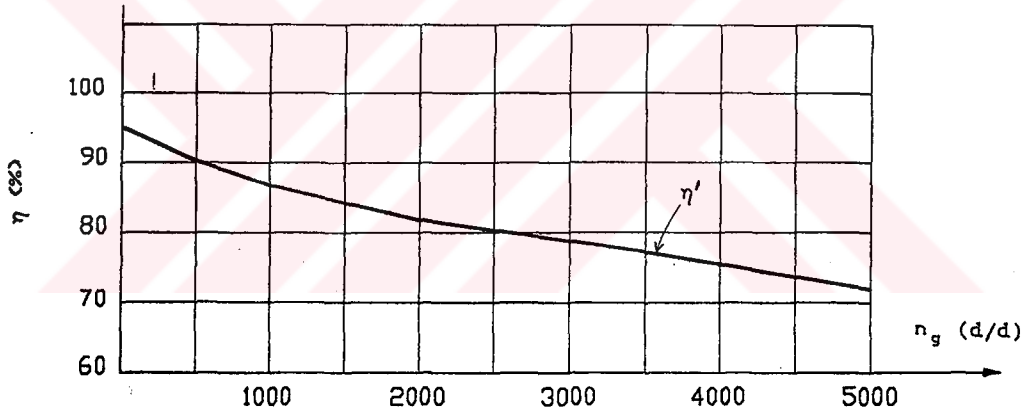
Tablo 6.2. Tahrik sistemlerine ait büyüklükler [3]

		1. uzuv (Gövde)	2. uzuv (Arka Kol)	3. uzuv (Ön Kol)
Motor Eylemsizliği (J_m) [kg.m ²]		14.5×10^{-4}	14.5×10^{-4}	11×10^{-4}
Motor ve yük kademeleri viskoz sönüm katsayıları [Nm /s]	B_m	2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}
	B_y	2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}
Motor ve yük kademeleri kuru (Coulomb) sürtünmeleri [Nm]	T_{cm}	0.08	0.08	0.08
	T_{cy}	0.08	0.08	0.08
Harmonic Drive mekanizmada Wave Generator Eylemsizliği (J_1) [kg.m ²]		11.4×10^{-4}	11.4×10^{-4}	1.46×10^{-4}
Mekanizma çevrim oranı (N)		100	160	100
Mekanizmadaki yüksüz çalışma Momentleri [Nm]	T_{12}	0.32	0.225	0.105
	T_{21}	43	50	13

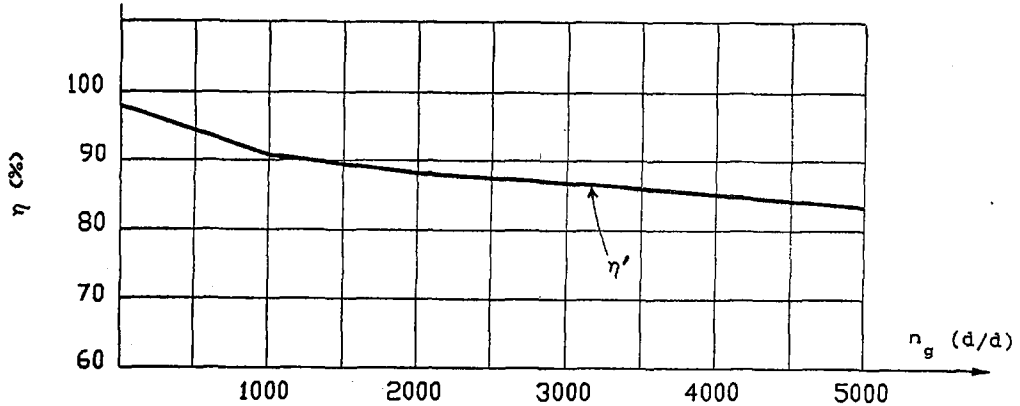
moment vektörleri hareket boyunca

$$\vec{f}_{34} = \vec{N}_{34} = 0 \quad (6.35)$$

alınmaktadır. Tablo 6.1 'de, Bölüm 4.2 'deki robota ait tüm uzuv ölçüleri verilmiştir. Tablo 6.2 'de ise, bu üç uzuvda yer alan tahrik sistemlerine ait sabit değerler görülmektedir. Bunun dışında, tüm Harmonic Drive mekanizmalarına ait çalışma hızına bağlı η' verim değişimlerinin de bilinmesi gerekecektir. Gövdeye ait tahrik sisteminde yer alan mekanizma için bu değişim Şekil 4.4 'te verilmiştir. Arka ve ön kola ait tahrik sistemlerindeki mekanizmalar için de yine Bölüm 3.2.2'de uygulanan hesaplama tarzını kullanmak mümkündür. Bu şekilde elde edilen η' verim değişimleri Şekil 6.5 'te görülmektedir.



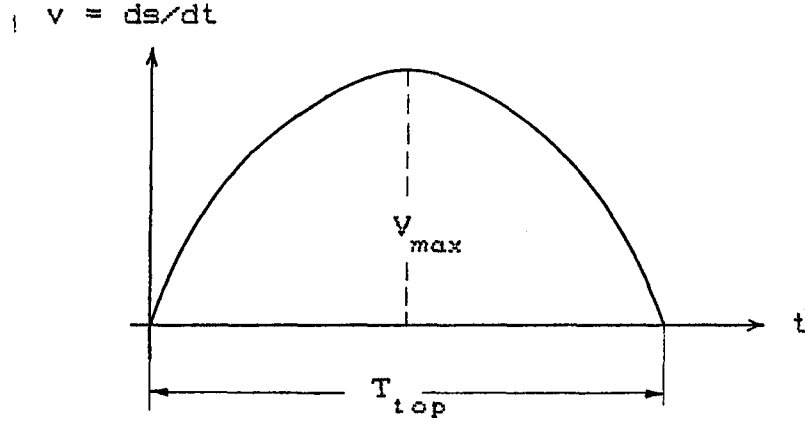
a. Arka kol tahrik sistemindeki Harmonic Drive mekanizması için hızla bağlı η' verim değişimi



b. Ön kol tahrik sistemindeki Harmonic Drive mekanizması için hızla bağlı η' verim değişimi

Şekil 6.5. Hıza bağlı verim değişimleri [3].

Son olarak ta, uç noktasının hareket şekli belirlenmelidir. Doğrusal yörüngedeki (Şekil 6.2) hız değişimi



Şekil 6.6. Doğrusal yörüngede hız değişimi

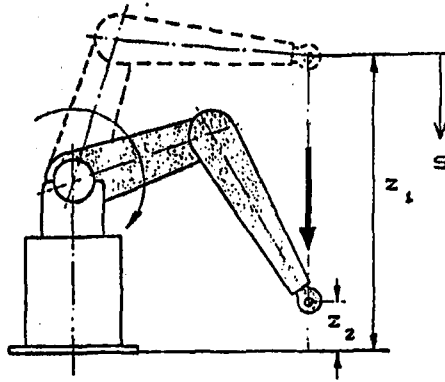
için Şekil 6.6 'da görüldüğü gibi parabolik bir form seçilebilir. Buna göre, herhangi bir t anı için,

$$v = ds/dt = \frac{4 V_{max} t}{T_{top}^2} (T_{top} - t) \quad (6.36)$$

$$s = \int_0^t v dt = \frac{2 V_{max} t^2}{3 T_{top}^2} (3 T_{top} - 2 t) \quad (6.37)$$

Robot uzuvları ve bunları tahrik eden sistemlere ait tüm gerekli değerlerin yanında uç noktasının hareket şekli de belirlendiğine göre, farklı V_{max} hızları ve uzuv konfigürasyonları için Tablo 3.2 'den de yararlanarak motor momentleri değişimini bulmak mümkün olacaktır.

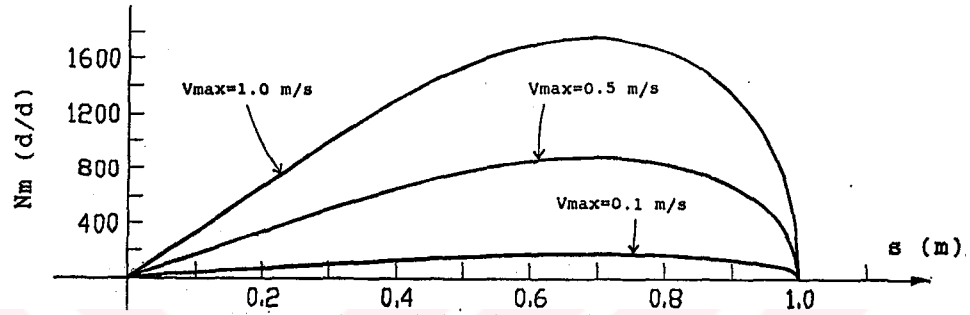
Ek B 'de, manipülatör uç noktasının istenen bir $P_1 (x_1, y_1, z_1)$ noktasından $P_2 (x_2, y_2, z_2)$ noktasına doğrusal bir yörüngede maksimum hızı V_{max} olan ve T_{top} süresinde tamamlanan hareketi için, uzuvları tahrik eden motorlara ait momentlerin zamana göre değişimlerini belirleyen bir program görülmektedir. Şekil 6.7....6.22 'te ise, farklı hız ve konfigürasyonlara ait sonuçlar grafikler halinde görülmektedir.



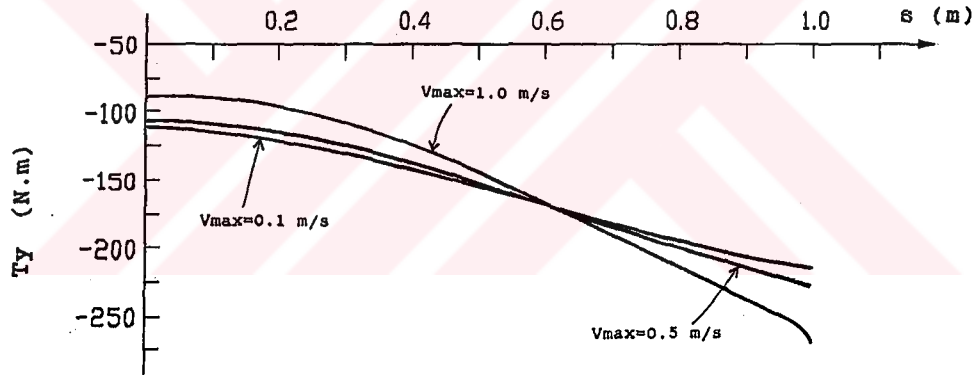
Uc noktası başlangıç ve bitiş koordinatları :

$$X_1, Y_1, Z_1 \text{ [m] : } 0.7, 0.7, 1.2$$

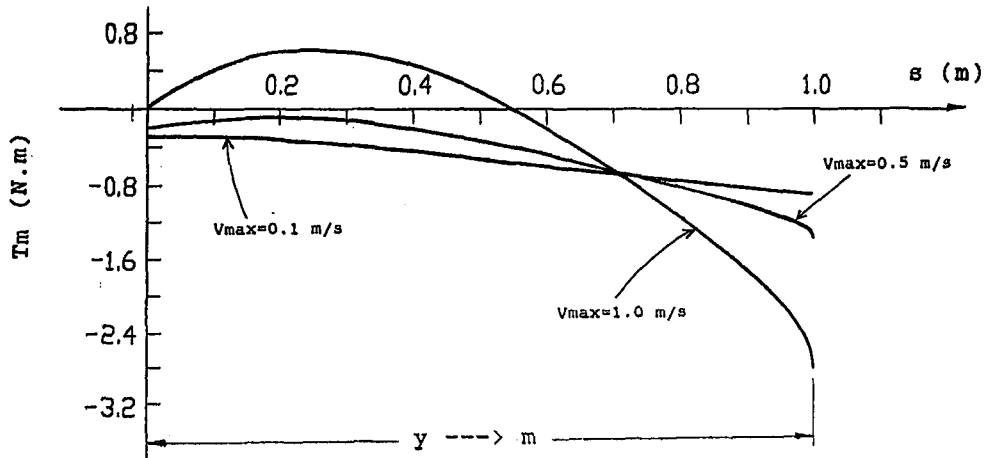
$$X_2, Y_2, Z_2 \text{ [m] : } 0.7, 0.7, 0.2$$



a. Omuz motoru hızı değişimi

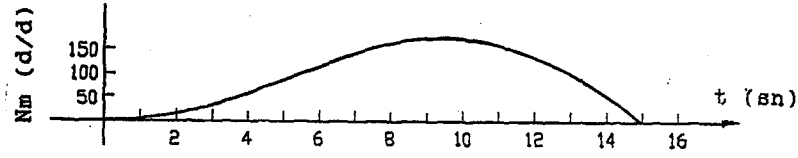


b.Arka kol için mafsals seviyesi (yük) momenti değişimi

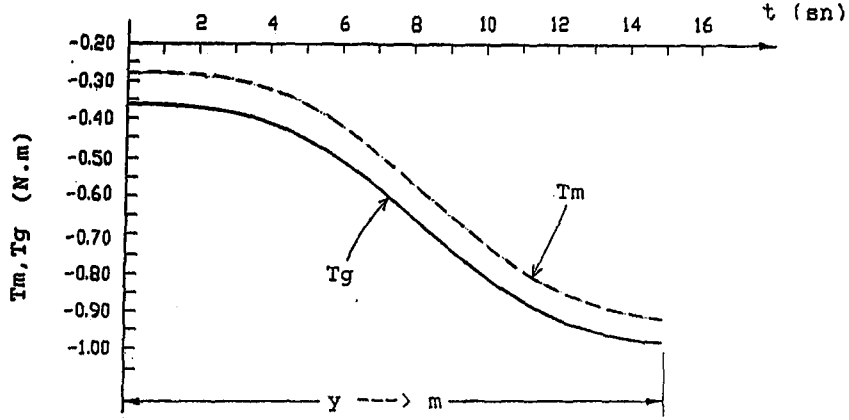


c.Omuz motoru momenti değişimi

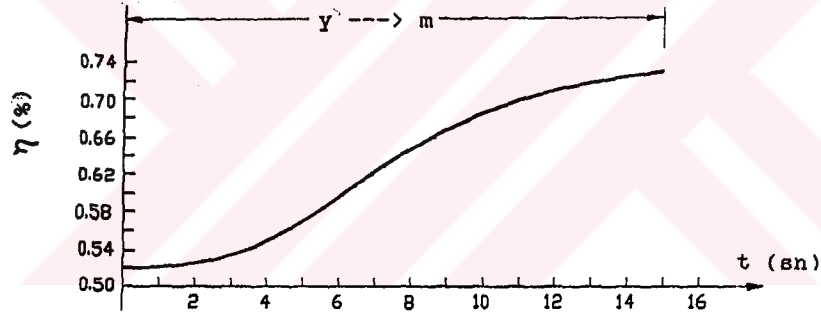
Şekil 6.7. Uc noktasının düşey hareketinde, farklı V_{max} hızlarında omuz motoruna ait hız ve moment değişimleri



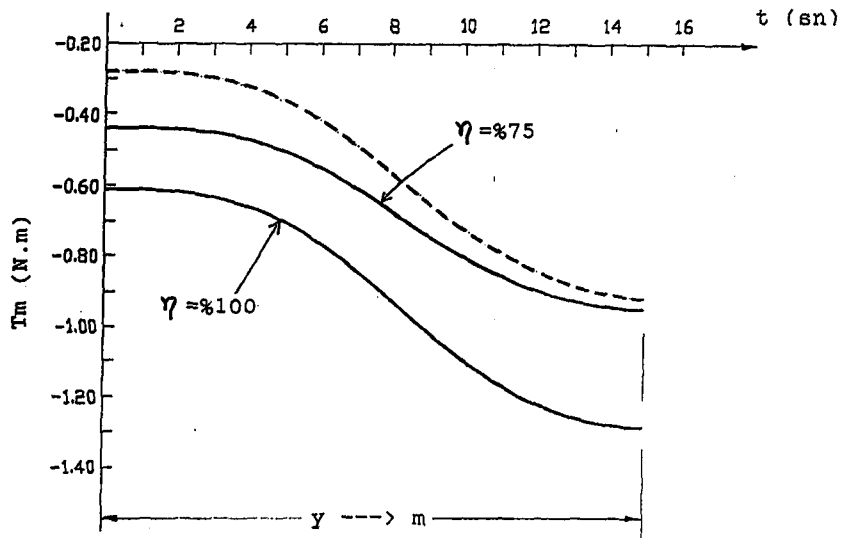
a. Omuz motoru hızı değişimi



b. Motor momenti (T_m) ve Harmonic Drive mekanizmasında giriş tarafı (Şekil 3.1) momenti (T_g) değişimleri

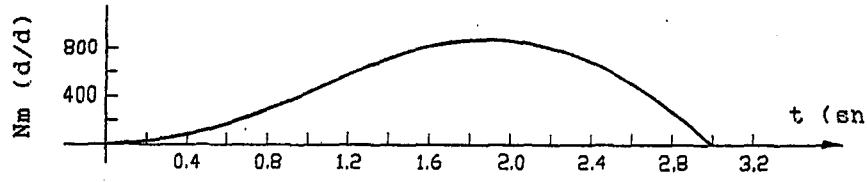


c. Harmonic Drive mekanizması verimi (η) değişimi

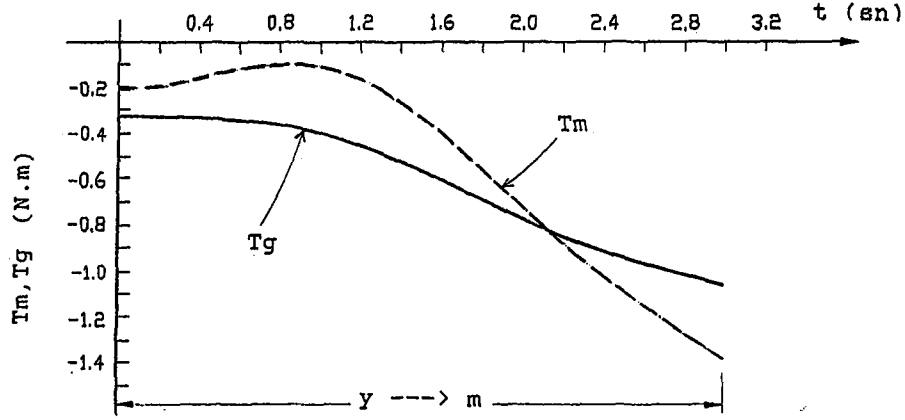


d. η = sabit kabul edilmesi durumunda motor momentinde meydana gelen değişim miktarları

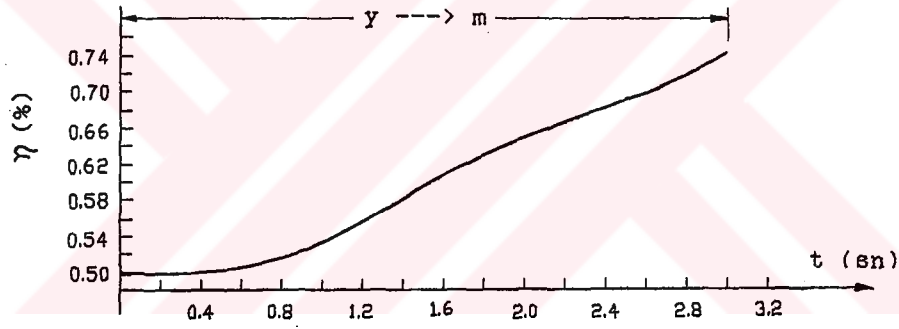
Şekil 6.8. $V_{max} = 0.1$ m/s için arka kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri



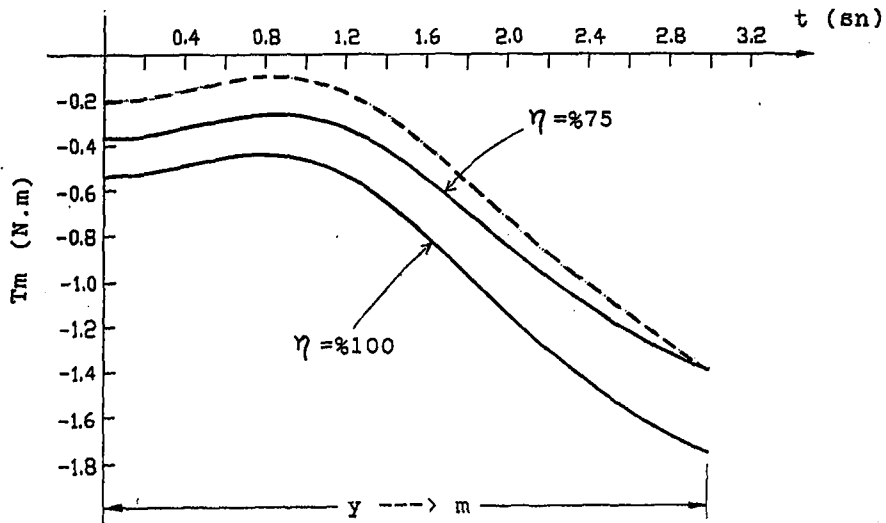
a. Omuz motoru hızı değişimi



b. Motor momenti (T_m) ve Harmonic Drive mekanizmasında giriş tarafı (Şekil 3.1) momenti (T_g) değişimleri

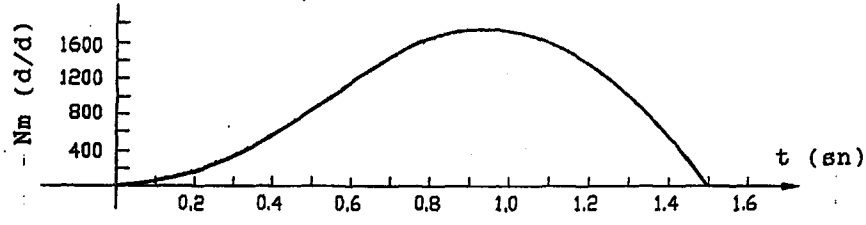


c. Harmonic Drive mekanizması verimi (η) değişimi

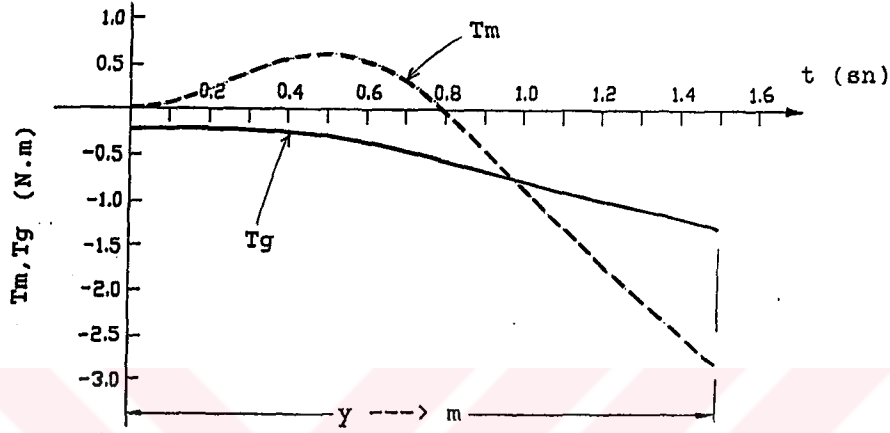


d. η = sabit kabul edilmesi durumunda motor momentinde meydana gelen değişim miktarları

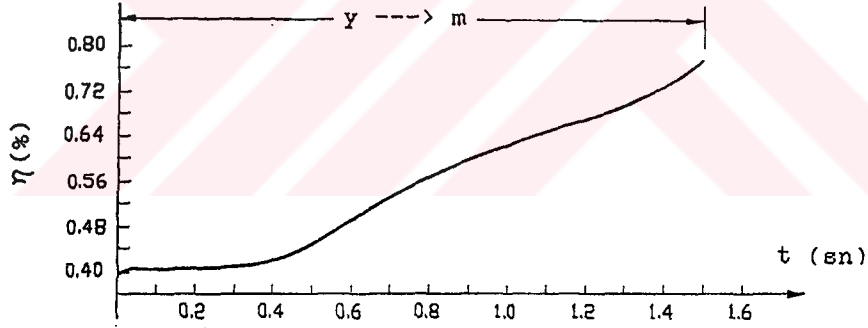
Şekil 6.9. $V_{max} = 0.5$ m/s için arka kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri



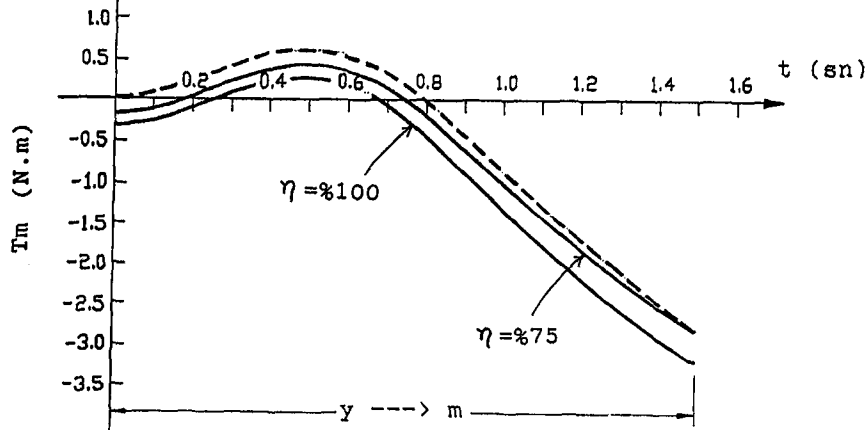
a. Omuz motoru hızı değişimi



b. Motor momenti (T_m) ve Harmonic Drive mekanizmasında giriş tarafı (Şekil 3:1) momenti (T_g) değişimleri

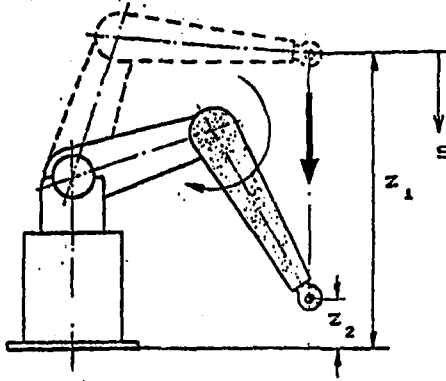


c. Harmonic Drive mekanizması verimi (η) değişimi



d. η = sabit kabul edilmesi durumunda motor momentinde meydana gelen değişim miktarları

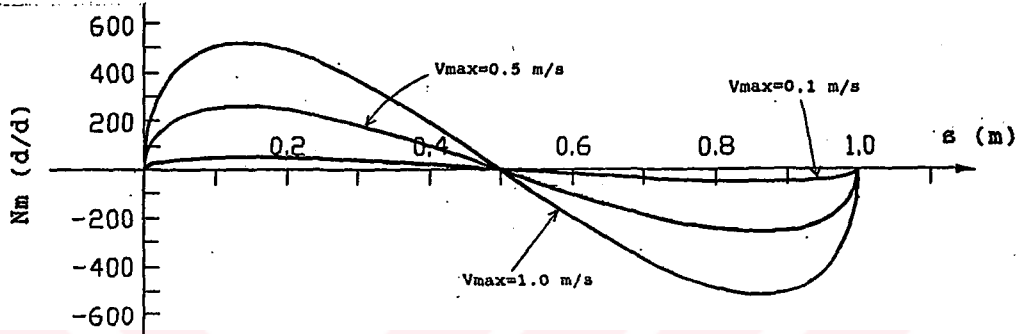
Şekil 6.10. $V_{max} = 1.0 \text{ m/s}$ için arka kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri



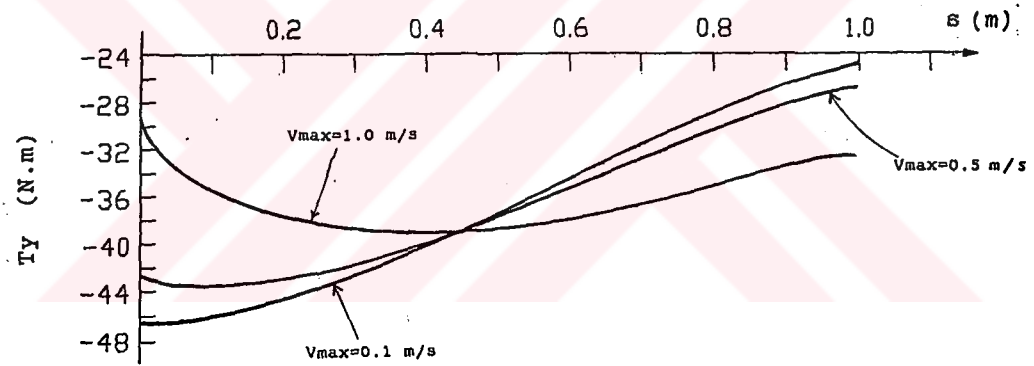
Uç noktası başlangıç ve bitiş koordinatları :

X_1, Y_1, Z_1 [m] : 0.7, 0.7, 1.2

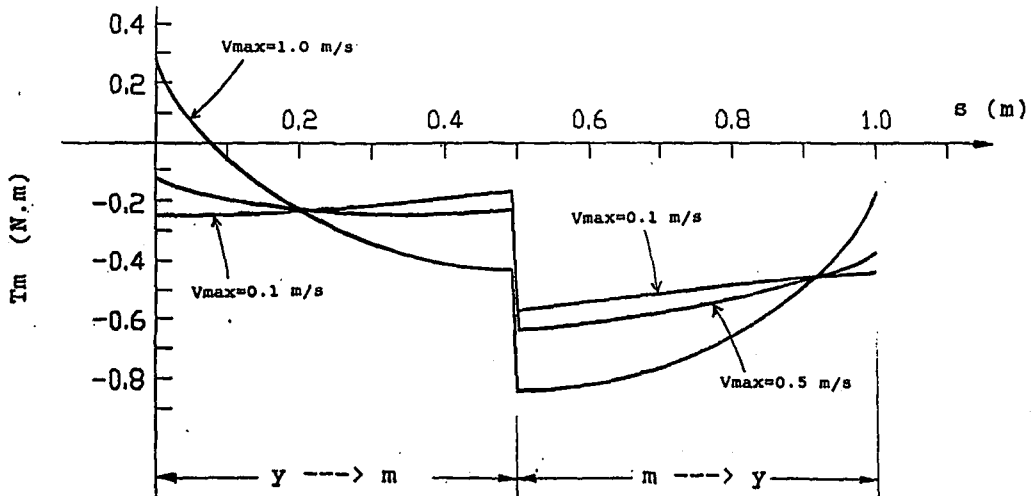
X_2, Y_2, Z_2 [m] : 0.7, 0.7, 0.2



a. Dirsek motoru hızı değişimi

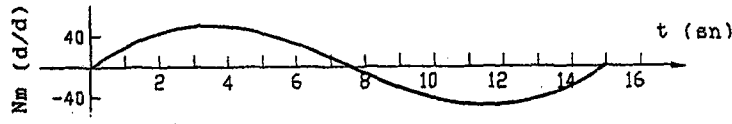


b. Ön kol için mafsal seviyesi (yük) momenti değişimi

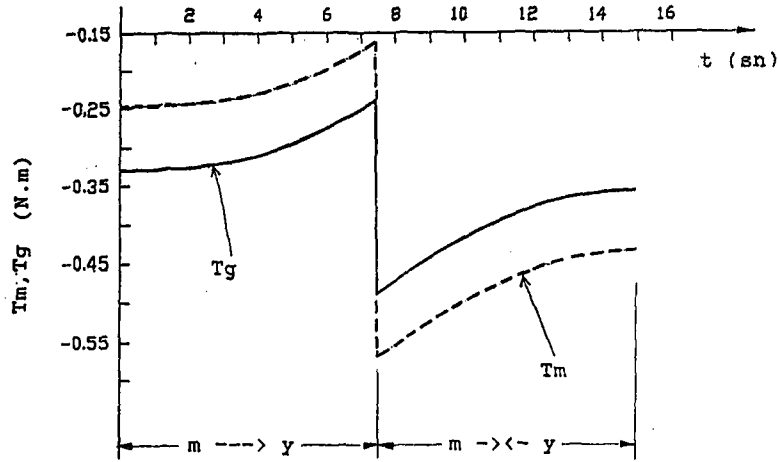


c. Dirsek motoru momenti değişimi

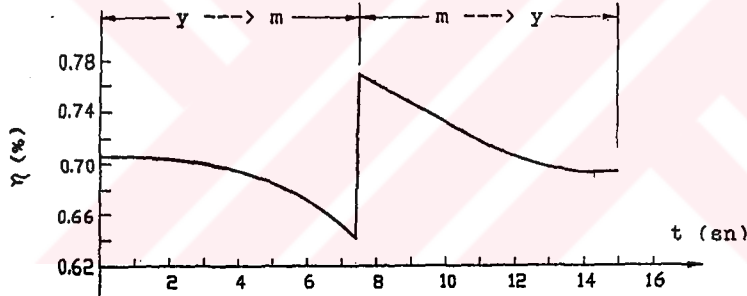
Sekil 6.11. Uç noktasının düşey hareketinde, farklı V_{max} hızlarında dirsek motoruna ait hız ve moment değişimleri



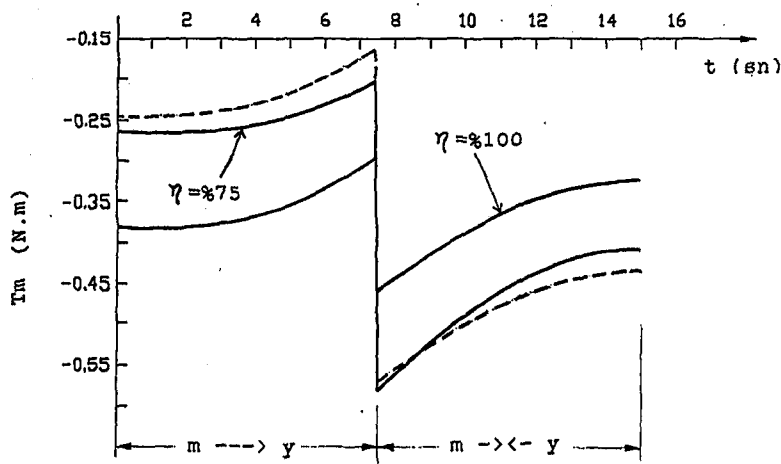
a. Dirsek motoru hızı değişimi



b. Motor momenti (T_m) ve Harmonic Drive mekanizmasında giriş tarafı (Şekil 3.1) momenti (T_g) değişimleri

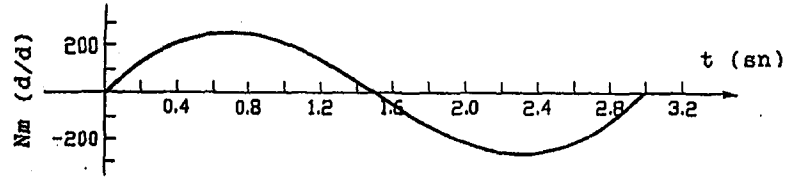


c. Harmonic Drive mekanizması verimi (η) değişimi

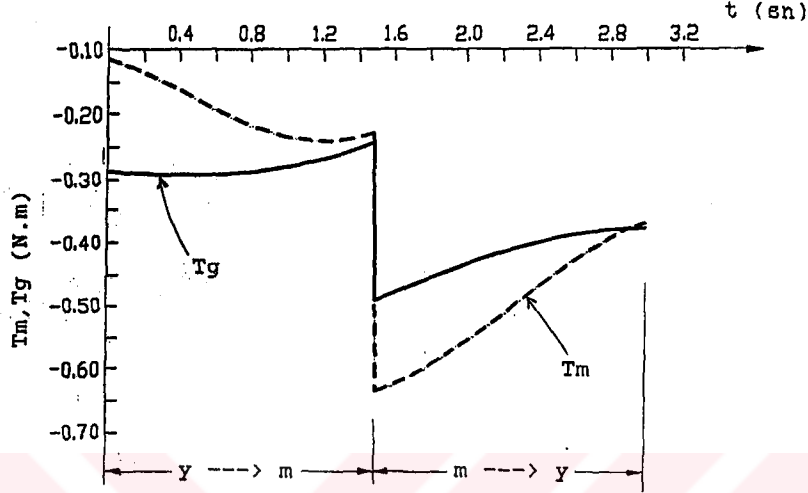


d. η = sabit kabul edilmesi durumunda motor momentinde meydana gelen değişim miktarları

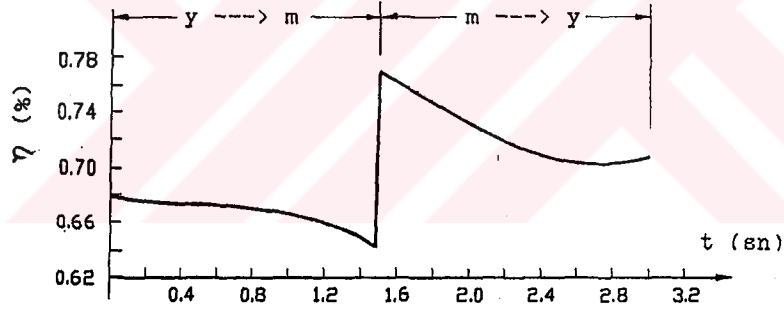
Şekil 6.12. $V_{max} = 0.1$ m/s için ön kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri



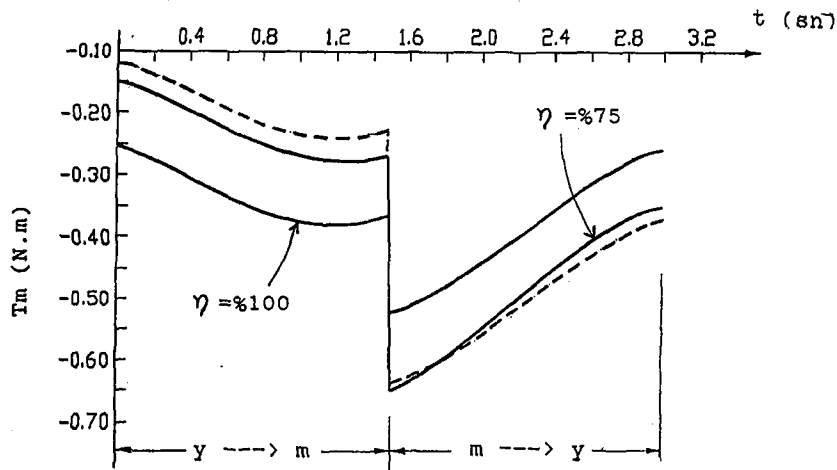
a. Dirsek motoru hızı değişimi



b. Motor momenti (T_m) ve Harmonic Drive mekanizmasında giriş tarafı (Şekil 3.1) momenti (T_g) değişimleri

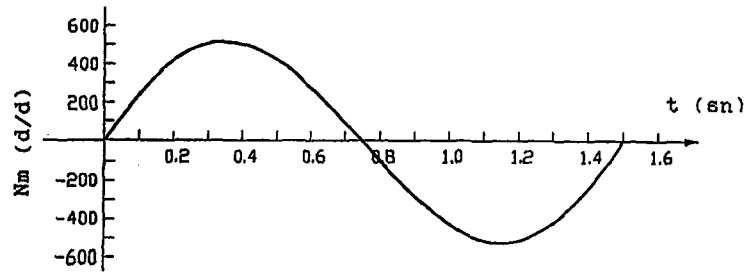


c. Harmonic Drive mekanizması verimi (η) değişimi

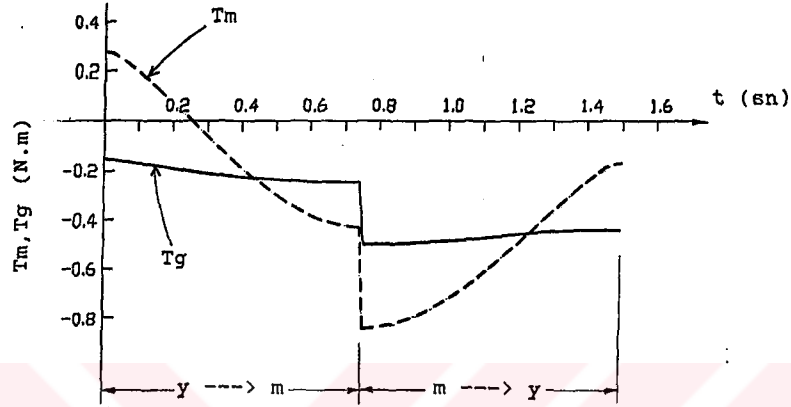


d. η = sabit kabul edilmesi durumunda motor momentinde meydana gelen değişim miktarları

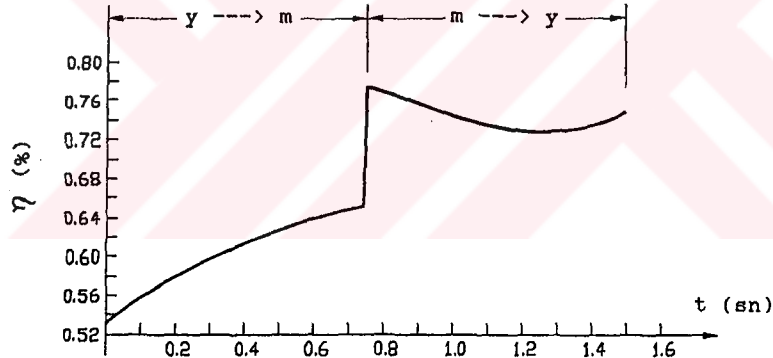
Şekil 6.13. $V_{max} = 0.5$ m/s için ön kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri



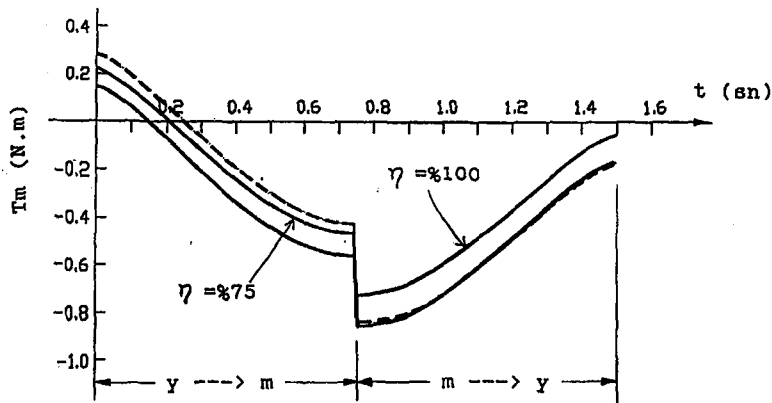
a. Dirsek motoru hızı değişimi



b. Motor momenti (T_m) ve Harmonic Drive mekanizmasında giriş tarafı (Şekil 3.1) momenti (T_g) değişimleri



c. Harmonic Drive mekanizması verimi (η) değişimi



d. η = sabit kabul edilmesi durumunda motor momentinde meydana gelen değişim miktarları

Şekil 6.14. $V_{max} = 1.0$ m/s için ön kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri

Sekil 6.7'de verilen konfigürasyon için, hareket boyunca arka kola ait tahrik sisteminde güç iletimi uzuvdan motora ($y \rightarrow m$) doğrudur. Robot uç noktasının farklı V_{max} hızları ile hareketleri için, arka ve ön kolun ağırlıkları istenen hızlanmadan daha fazlasını sağlayabilmektedir. Bu sebeple, hareket boyunca arka kola mafsal seviyesinde verilmesi gereken T_y yük momentleri hareketi yavaşlatacak yönde (negatif) olmalıdır. Aynı şekilde, omuz motoru momenti değişimleri de (3 farklı V_{max} uç noktası hızı için) benzer karakterdedir. Ancak, $V_{max} = 1.0$ m/s için hareketin hızlanma sürecinin bir bölümünde motor momenti (T_m) pozitif bir değer kazanmaktadır. Bunun sebebi, Şekil 3.1'deki tahrik sistemi modelinde, motor seviyesi için daha önce de verilmiş olan (3.29) bağıntısında gizlidir :

$$T_m = T_g + [(J_m + J_1) \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + T_{c_m} \text{sign } \dot{\theta}_m] \quad (6.38)$$

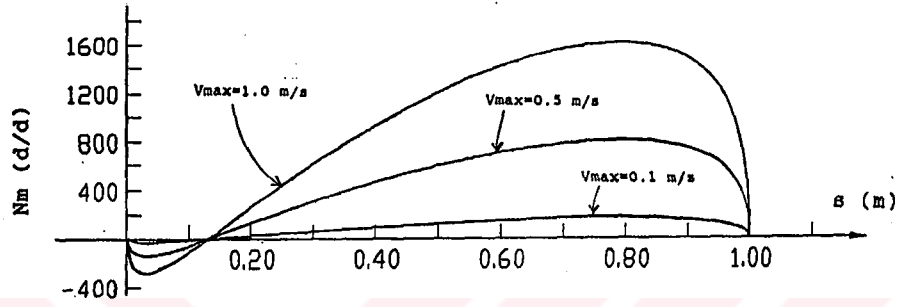
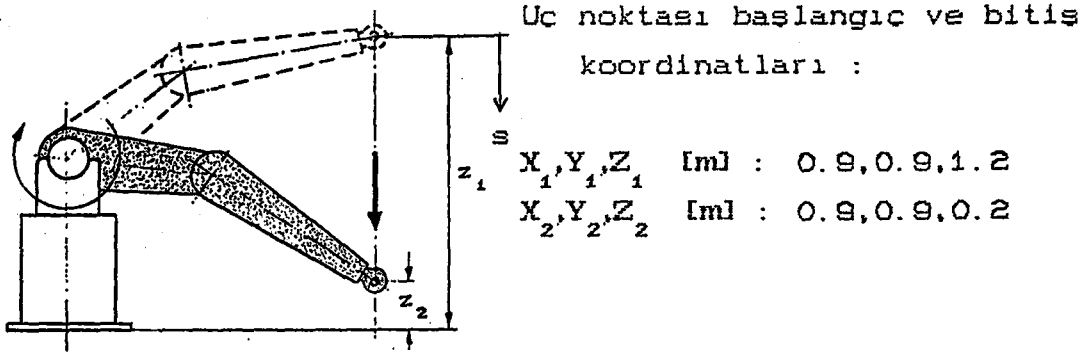
Sekil 6.8.a, 6.9.a ve 6.10.a'da, 3 ayrı maksimum hız için T_m değişimleri yanında Harmonic Drive mekanizmasına giriş momenti (T_g) değişimleri de görülmektedir. Burada, T_m ve T_g eğrileri arasındaki fark (6.38) bağıntısının sağ tarafında, T_g 'nin dışında kalan terimler toplamıdır. Uç noktasının yüksek V_{max} hızları için şekillerden de görüldüğü gibi T_g değeri daha düşüktür, $\ddot{\theta}_m$ ve $\dot{\theta}_m$ pozitif değerleri ise yüksek mertebelere sahiptir. Bu da (6.38)'de T_m 'nin pozitif olmasını sağlayabilir. O halde bu sonuçları aşağıdaki gibi açıklamak mümkündür :

Verilen konfigürasyonda uzuvların gravitasyonel etkisi, arka kol tahrik sistemindeki motor ve yük kademeleleri ile Harmonic Drive mekanizmasına ait tüm dirençleri karşılamamanın yanında, bu kademelerin aşırı hızlanmasına yol açacağı için omuz motoru devreye girmekte ve gerekli frenlemeyi sağlamaktadır. Ancak, $V_{max} = 1.0$ m/s için hareketin bir bölümünde bu gravitasyonel etki Harmonic Drive mekanizmasını yük kademesinden tahrik etmesine rağmen, motor kademesinde istenen hızlanmayı sağlayamamakta ve bu

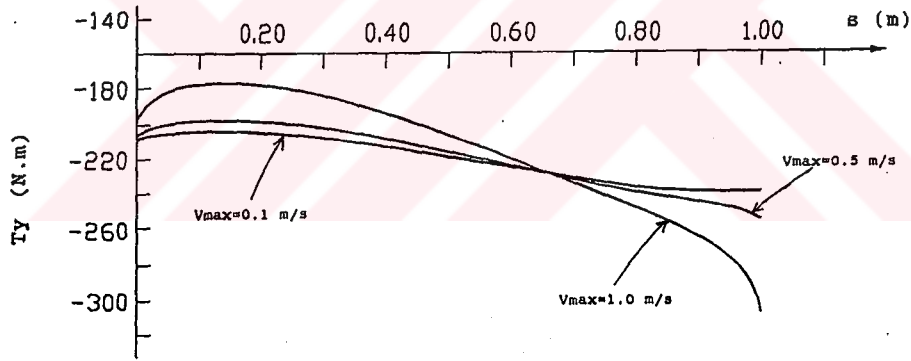
yüzden omuz motoru pozitif yönde bir moment ile devreye girerek kendi kademesinin hızlanmasına yardım etmektedir.

Sekil 6.8, 6.9 ve 6.10 'da, farklı V_{max} hızlarında tahrik sisteminde yer alan Harmonic Drive mekanizmasına ait verim değişimleri yanında, hareket boyunca mekanizma da herhangi bir enerji kaybının oluşmadığı ($\eta=100$) veya bu kayıpların $\eta=75$ gibi sabit bir verim değeri ile sim- gelendiği durumlar için belirlenen T_m değişimleri de gör- rülmektedir. T_m 'nin bu farklı yaklaşımlara ait değişim- leri arasında farklar dikkate degerdir. Ancak $V_{max} = 1.0$ m/s için (Sekil 6.10.d) daha geniş bir moment değişim sa- hasında bu fark nispi olarak daha az belirgin haldedir.

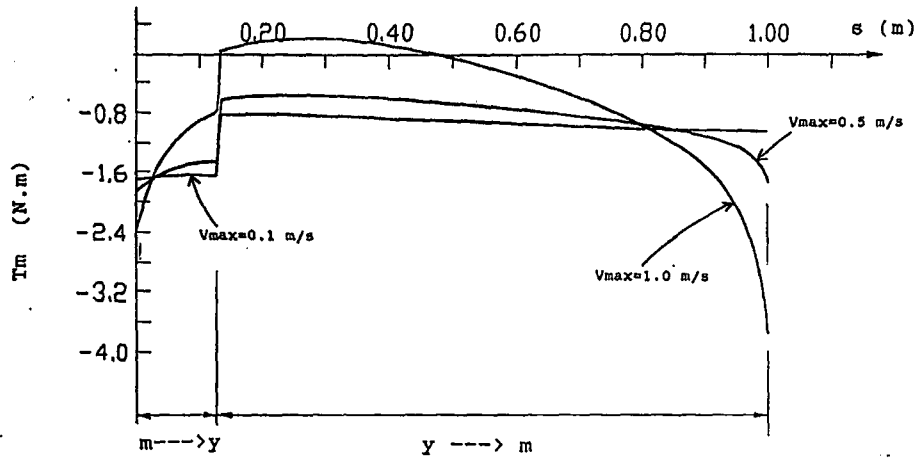
Sekil 6.11 'de, aynı konfigürasyon için ön kola ait momentler ve dirsek motoru hız değişimleri görülmektedir. Hareketin ilk yarısında uzuv kendi ağırlığında çalışmakta ve motor kademesine doğru bir güç iletimi meydana gelmek- tedir. Bu durumda dirsek motoru frenleyici bir rol oyna- yarak istenen yavaşlamayı sağlar. Ancak, $V_{max} = 1.0$ m/s i- cin hareketin başlangıcında dirsek motoru bir süre kendi kademesinin hızlanmasına yardımcı olmakta ve pozitif yön- de bir moment uygulamaktadır. $T_g < 0$ olduğundan güç ile- tim yönü yine de uzuvdan motor kademesine ($y \rightarrow m$) doğ- rudur. Hareketin ikinci yarısında ise uzuv (ön kol) yer- çekimine karşı yükselme hareketine başlamaktadır. Dirsek motoru bu durumda ters yönde dönmekte ve böylece güç ile- timi motor kademesinden yük (uzuv) tarafına doğru ($m \rightarrow y$) oluşmaktadır. Güç iletim yönündeki bu değişiklik mo- ment değişim eğrilerinde ani bir süreksizlik ve değer ar- tışına yol açmıştır. Aynı şekilde Harmonic Drive meka- nizması verimleri de (her uç ayrı hızdaki hareket için) $|T_g|$ ile doğru orantılı olarak değişim göstermektedir. Yüksek hızlarda verim daha geniş bir değişim skalasına sahiptir. Mekanizma verimi için yapılan farklı kabullere ait T_m motor momenti değişimleri de yine bir karşılaştıır- ma amacıyla şekillerde verilmiştir. Burada da düşük V_{max} hızlarındaki nispi fark daha belirgindir.



a. Omuz motoru hızı değişimi

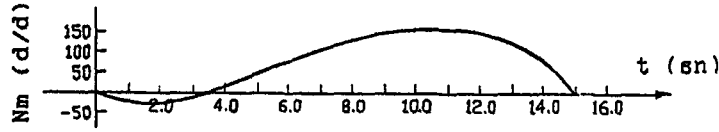


b. Arka kol için mafsal seviyesi (yük) momenti değişimi

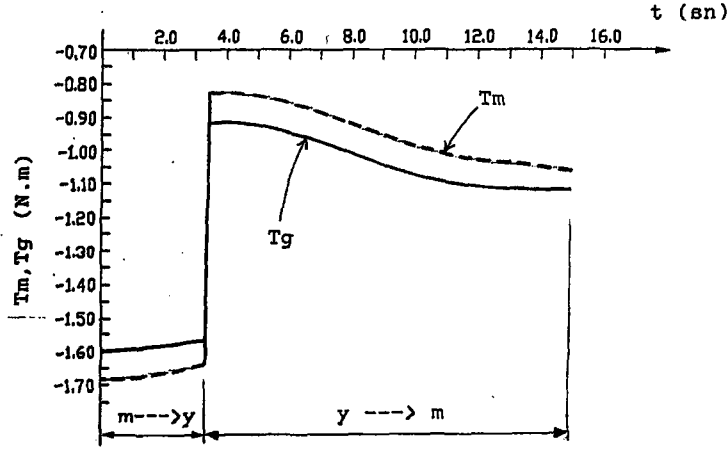


c. Omuz motoru momenti değişimi

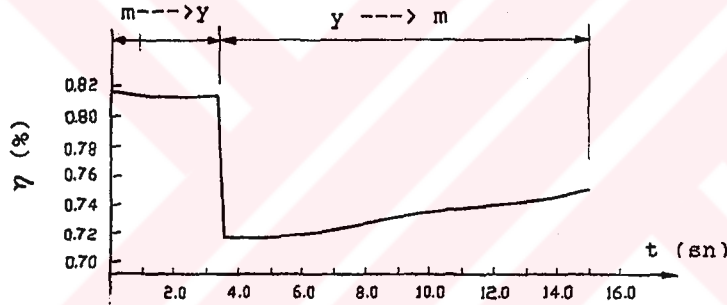
Şekil 6.15. Uc noktasının düşey hareketinde, farklı V_{max} hızlarında omuz motoruna ait hız ve moment değişimleri



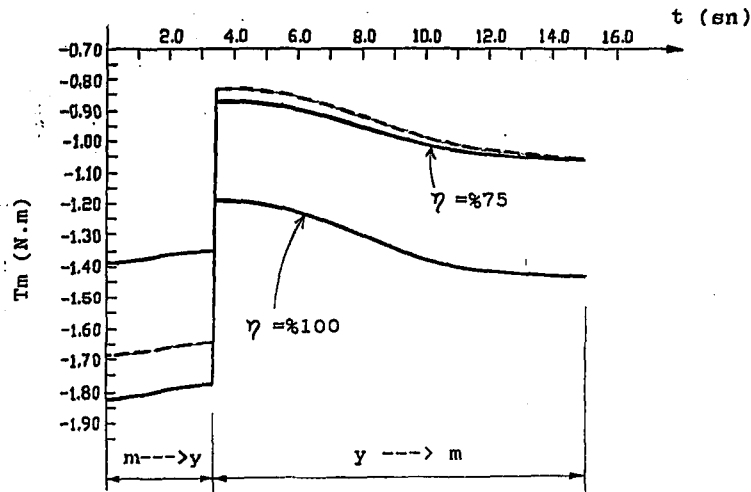
a. Omuz motoru hızı değişimi



b. Motor momenti (T_m) ve Harmonic Drive mekanizmasında giriş tarafı (Şekil 3.1) momenti (T_g) değişimleri

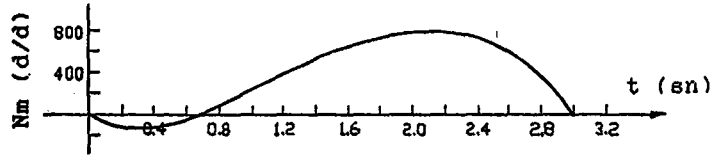


c. Harmonic Drive mekanizması verimi (η) değişimi

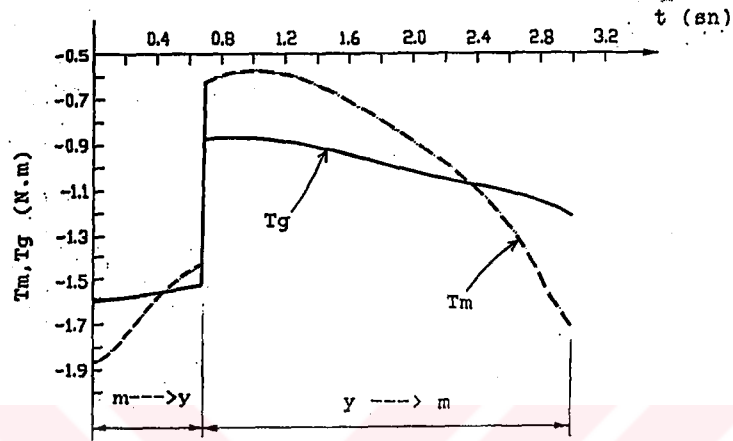


d. η = sabit kabul edilmesi durumunda motor momentinde meydana gelen değişim miktarları

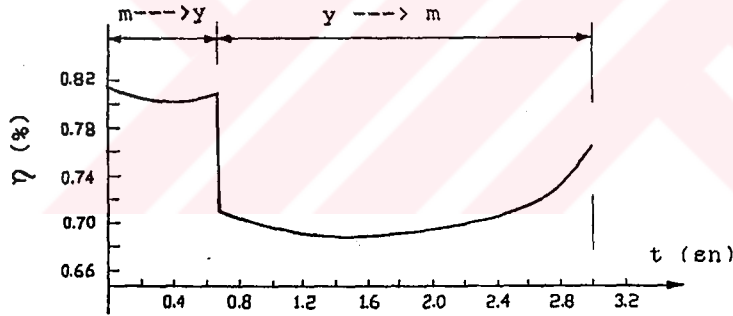
Şekil 6.16. $V_{max} = 0.1 \text{ m/s}$ için arka kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri



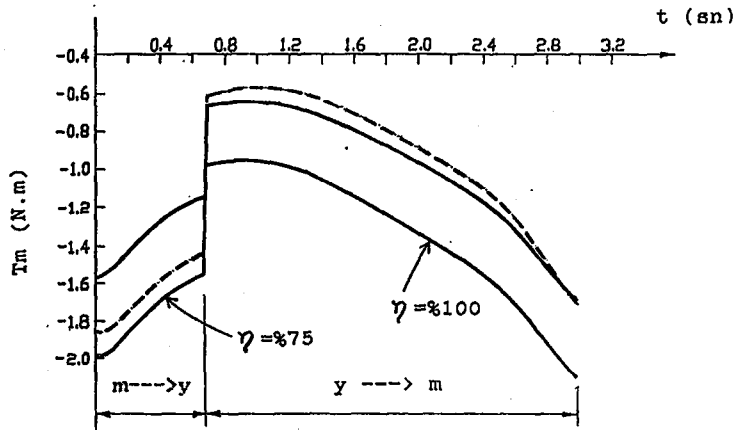
a. Omuz motoru hızı değişimi



b. Motor momenti (T_m) ve Harmonic Drive mekanizmasında giriş tarafı (Şekil 3.1) momenti (T_g) değişimleri

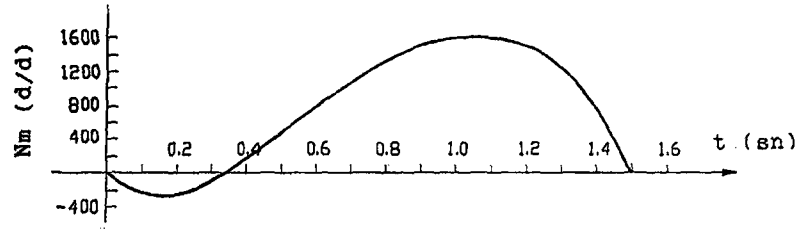


c. Harmonic Drive mekanizması verimi (η) değişimi

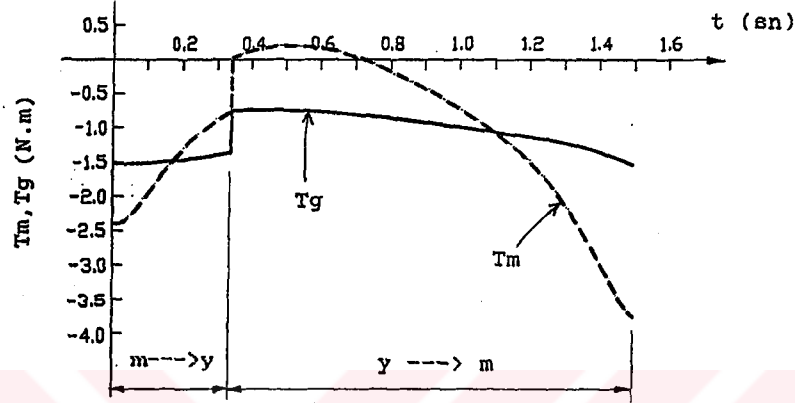


d. η = sabit kabul edilmesi durumunda motor momentinde meydana gelen değişim miktarları

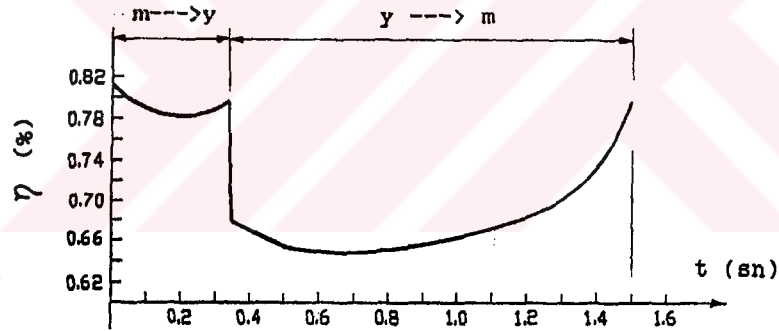
Şekil 6.17. $V_{max} = 0.5$ m/s için arka kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri



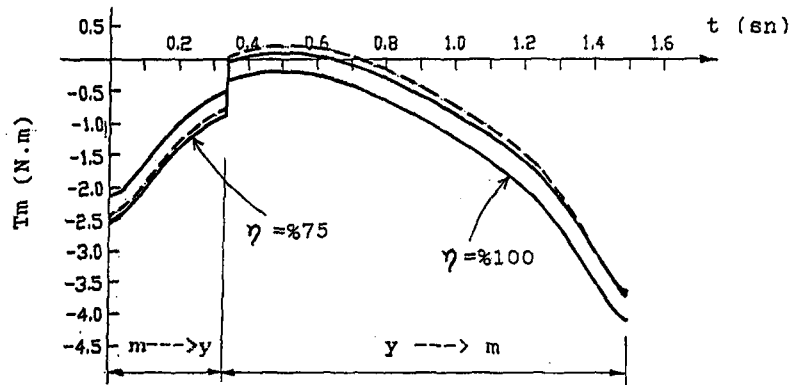
a. Omuz motoru hızı değişimi



b. Motor momenti (T_m) ve Harmonic Drive mekanizmasında giriş tarafı (Şekil 3.1) momenti (T_g) değişimleri

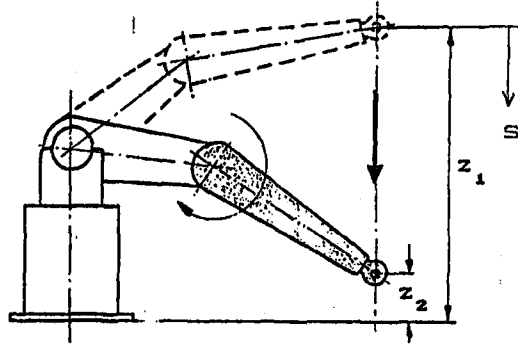


c. Harmonic Drive mekanizması verimi (η) değişimi



d. η = sabit kabul edilmesi durumunda motor momentinde meydana gelen değişim miktarları

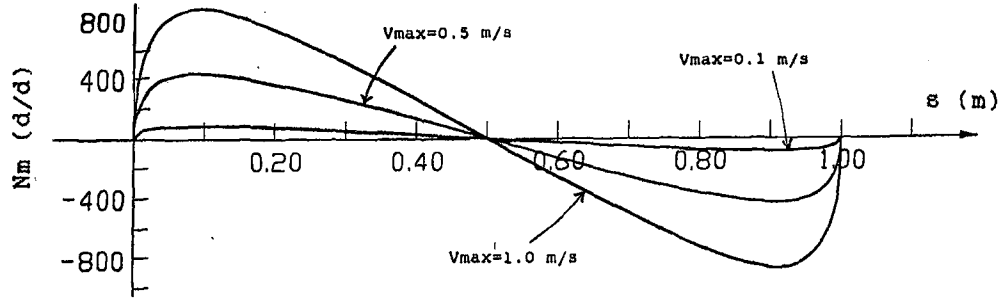
Şekil 6.18. $V_{max} = 1.0$ m/s için arka kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri



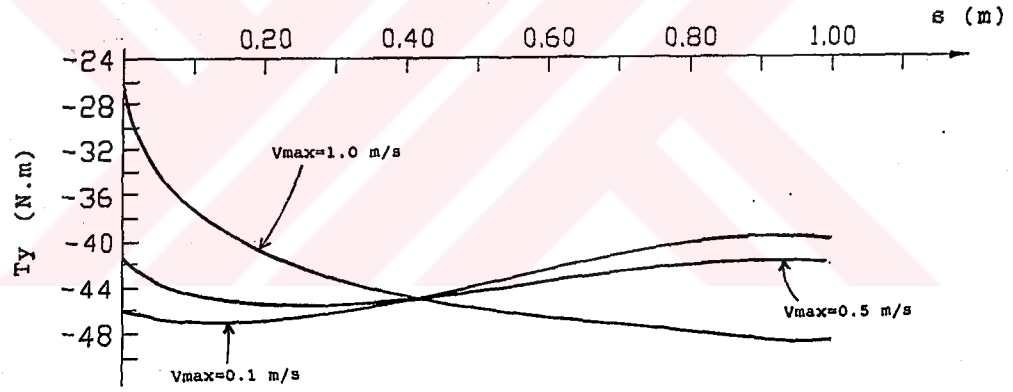
Uç noktası başlangıç ve bitiş koordinatları :

X_1, Y_1, Z_1 [m] : 0.9, 0.9, 1.2

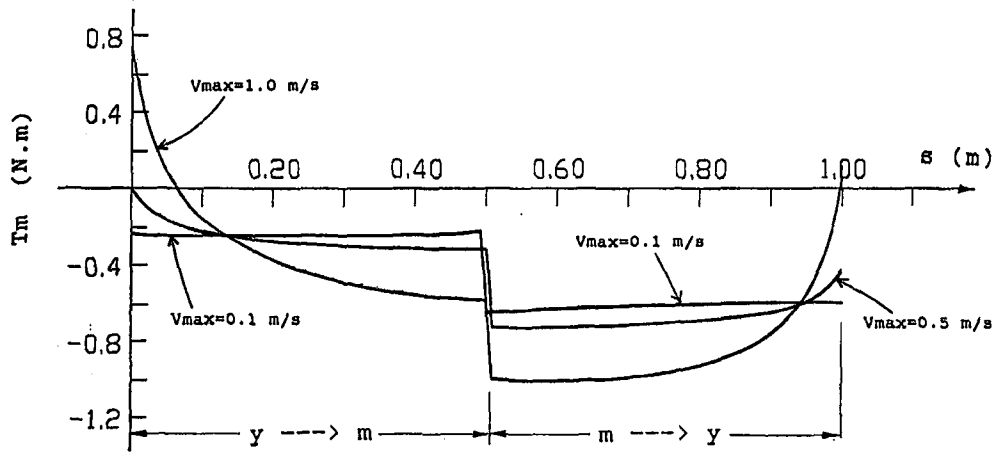
X_2, Y_2, Z_2 [m] : 0.9, 0.9, 0.2



a. Dirsek motoru hızı değişimi

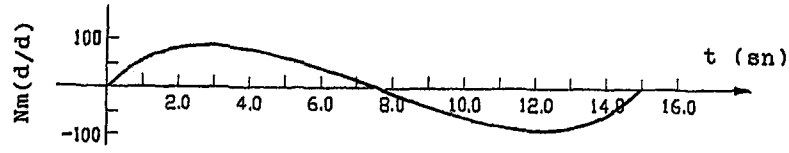


b. Ön kol için mafsal seviyesi (yük) momenti değişimi

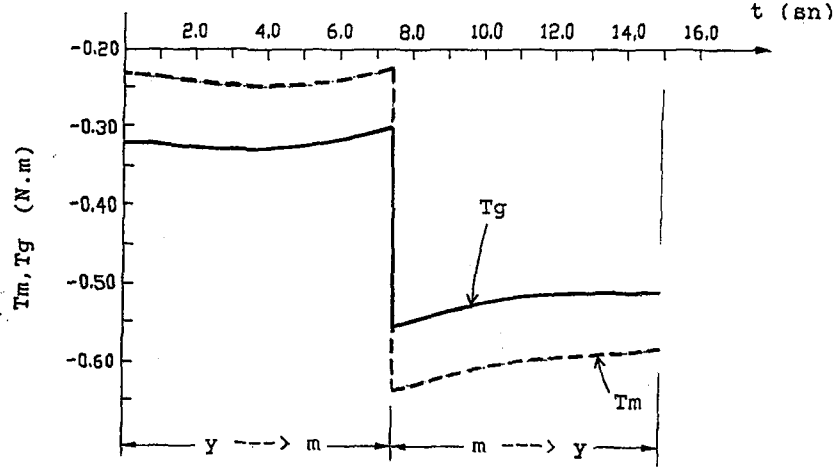


c. Dirsek motoru momenti değişimi

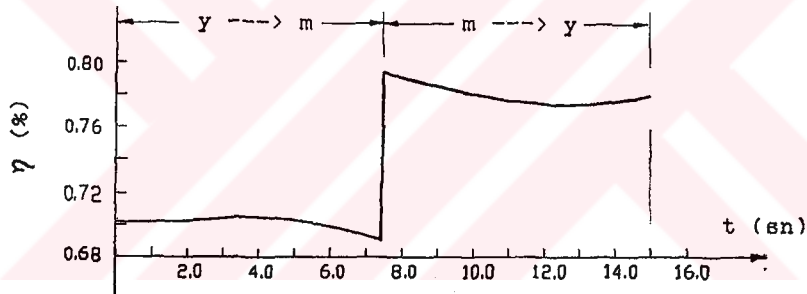
Şekil 6.19. Uç noktasının düşey hareketinde, farklı V_{max} hızlarında dirsek motoruna ait hız ve moment değişimleri



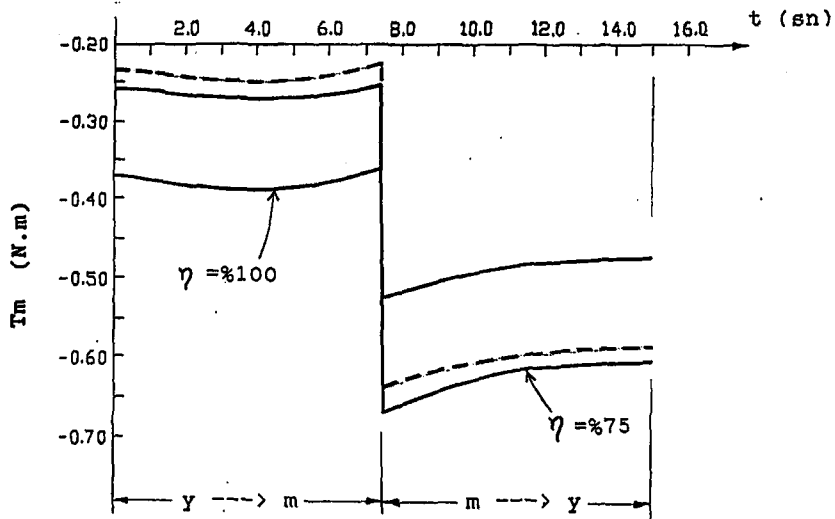
a. Dirsek motoru hızı değişimi



b. Motor momenti (T_m) ve Harmonic Drive mekanizmasında giriş tarafı (Şekil 3.1) momenti (T_g) değişimleri

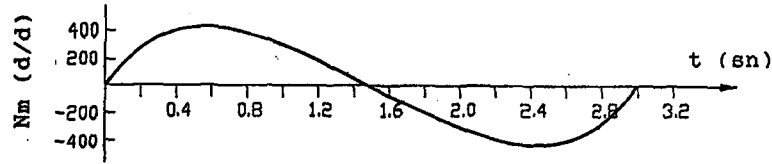


c. Harmonic Drive mekanizması verimi (η) değişimi

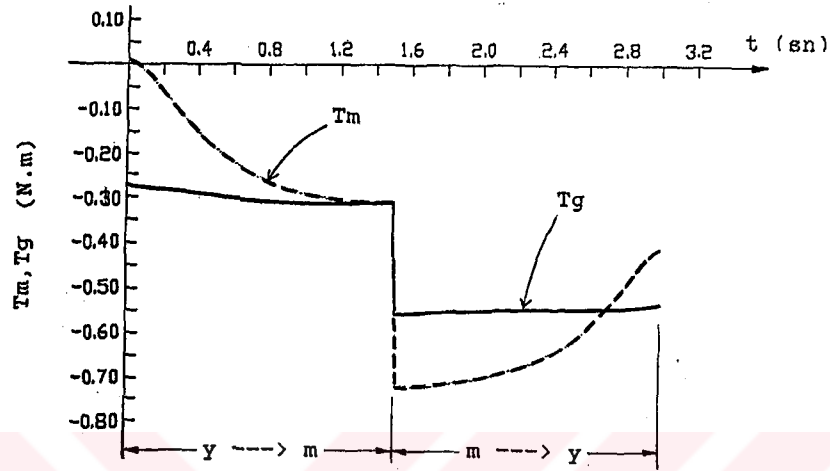


d. η = sabit kabul edilmesi durumunda motor momentinde meydana gelen değişim miktarları

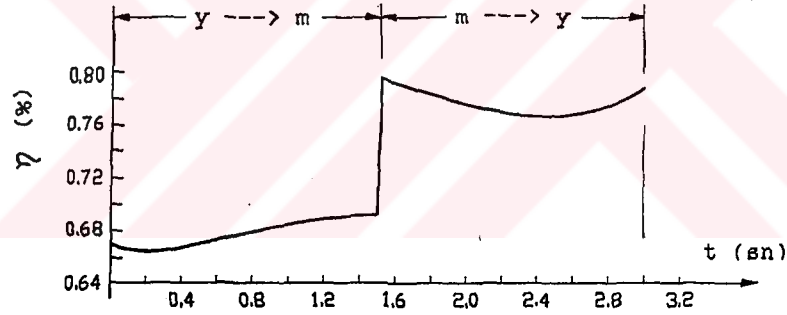
Şekil 6.20. $V_{max} = 0.1$ m/s için 8n kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri



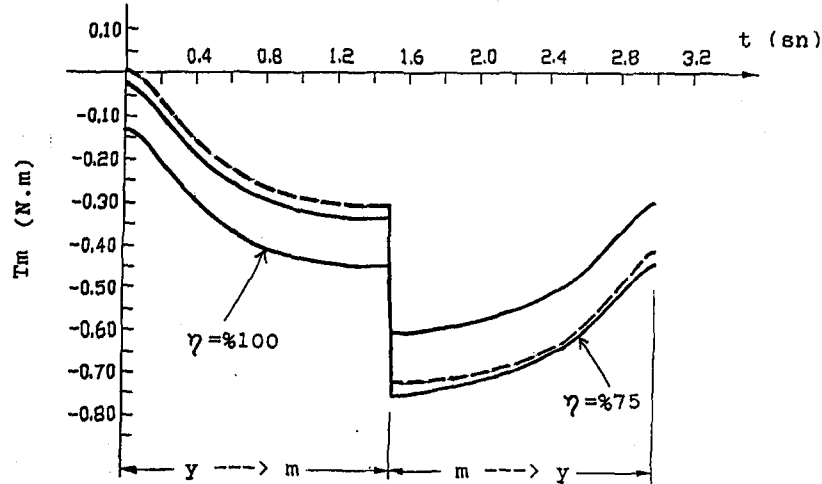
a. Dirsek motoru hızı değişimi



b. Motor momenti (T_m) ve Harmonic Drive mekanizmasında giriş tarafı (Şekil 3.1) momenti (T_g) değişimleri

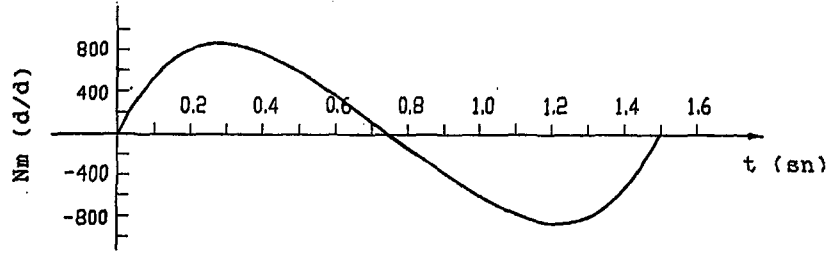


c. Harmonic Drive mekanizması verimi (η) değişimi

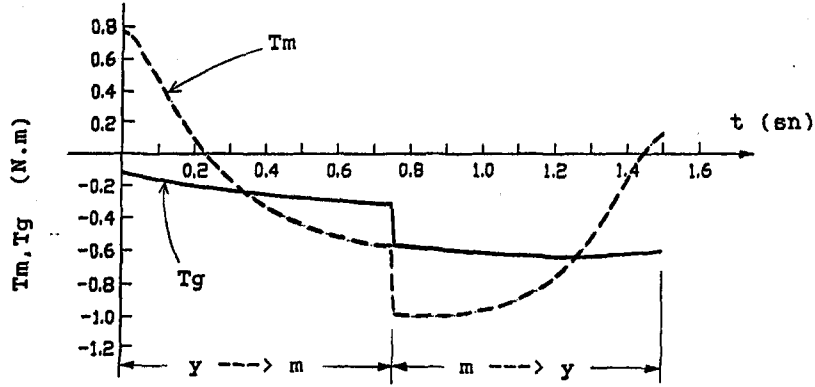


d. η = sabit kabul edilmesi durumunda motor momentinde meydana gelen değişim miktarları

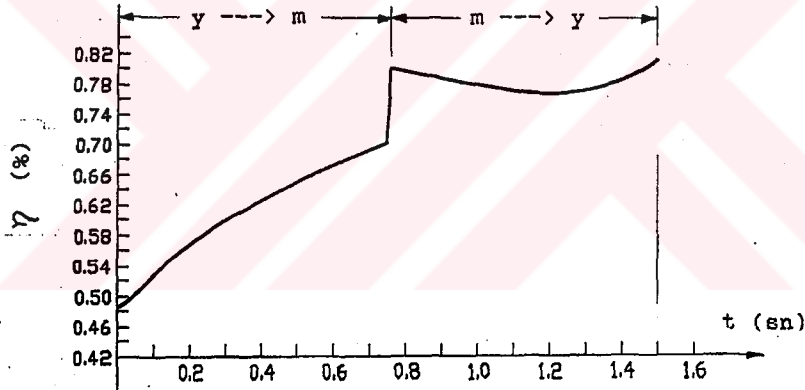
Şekil 6.21. $V_{max} = 0.5$ m/s için ön kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri



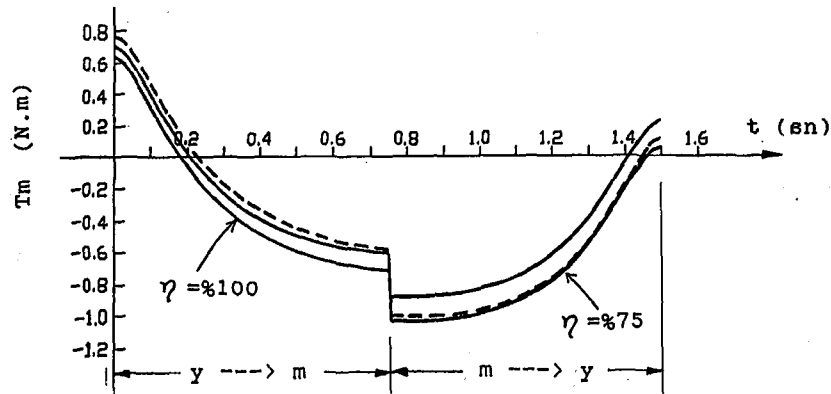
a. Dirsek motoru hızı değişimi



b. Motor momenti (T_m) ve Harmonic Drive mekanizmasında giriş tarafı (Şekil 3.1) momenti (T_g) değişimleri



c. Harmonic Drive mekanizması verimi (η) değişimi



d. η = sabit kabul edilmesi durumunda motor momentinde meydana gelen değişim miktarları

Şekil 6.22. $V_{max} = 1.0$ m/s için ön kol tahrik sisteminde hız moment ve verim değişimleri

İncelenen robotun ön ve arka kol ağırlıklarından oluşan gravitasyonel etkinin Şekil 6.15 ve 6.19'da verilen konfigürasyon için daha fazla olduğu düşünülebilir. Bu konfigürasyonun gereği olarak, istenen düşey doğrusal hareketin sağlanabilmesi için, uzuv bir süre omuz motoru tarafından tahrik edilmekte ($m \rightarrow y$ hali) ve ters yönde dönmektedir. Bu safhada tahrik sisteminde yer alan Harmonic Drive mekanizması giriş tarafındaki T_g momenti değeri ve dolayısıyla mekanizma verimi yüksek değerlere sahiptir. Süreksizliğin başladığı anda ise, T_g momenti ve T_m dirsek motoru momentlerinin mutlak değerleri ile verimde ani bir düşüş söz konusudur. Bunun sebebi, hareketin ilk safhasında aktif (enerji veren) durumda bulunan motor kademesinin süreksizlik anından sonra frenleyici bir rol oynamasıdır. Bu duruma geçildiği anda uzuv kademesi, tahrik sistemindeki tüm dirençler ve kayıpları yemenin yanında gerekli hızlanmayı da sağlamaktadır. Sadece $V_{max} = 1.0 \text{ m/s}$ olan hareket için, dirsek motoru bir süre pozitif bir T_m momenti ile kendi kademesinin hızlanmasına yardımcı olmaktadır.

Harmonic Drive mekanizması verimi her üç farklı V_{max} hızı için de %65..82 arasında değişmektedir. Bu sebeple omuz motoru momenti hareket boyunca verimin $\eta = 75$ gibi sabit bir değere sahip olduğu kabulü ile bulunan motor momenti değişimine yakındır. Ancak nispi olarak bu fark, özellikle $m \rightarrow y$ hali için ve düşük hızlarda yine de belirgindir.

Şekil 6.19...6.22 'de, aynı konfigürasyon için ön kola ait değişimler verilmiştir. Bu değişimler, ön kola ait bir önceki konfigürasyonda (Şekil 6.11) elde edilenler ile oldukça benzerdir ve aynı sonuçlar geçerlidir. Burada da, uzvun simetrik olarak her iki yönde dönme hareketini ve geçiş bölgesinde güç iletim yönünün değişmesinin sebep olduğu süreksizlikleri görmek mümkündür.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Robot uzuvlarının hareketleri sırasında, tahrik sistemlerinde meydana gelen enerji kayıpları motor momentleri üzerinde dikkate değer etkiler meydana getirmektedir. Örneğin, uç noktasının istenen yörüngede hareket edebilmesi için, daha basit modellerde belirli bir yönde uygulanacağı sanılan motor momenti gerçekte, bu çalışmada kurulan modele göre, sanılanın tam tersi bir yönde dahi olabilmektedir.

Inceleme sonunda, tahrik sistemi üzerine tanımlanan " güç (enerji) iletimi yönü " kavramının da önemi ortaya çıkmıştır. Hareket sırasında güç iletimi yön değiştirebilmekte ve bu anda moment değerlerinde sıçramalar (sürüksizlikler) oluşmaktadır. Bazı durumlarda, özellikle robot gövdesinin belirli bir hızlanma sürecinden sonraki yavaşlaması sırasında, tahrik sisteminde belirli bir güç iletim yönünden dahi bahsedilemeyen farklı bir durum da oluşabilmektedir. Bu halde, hem robot uzvunun kinetik enerjisindeki azalma hem de motor tarafından verilen enerjinin bir kısmı sistemdeki Harmonic Drive mekanizması tarafından yutulmaktadır.

Yüksek hızla dönen motor kademesinden düşük hızla hareket eden robot uzvuna doğru güç iletimi söz konusu olduğunda, tahrik sisteminde (özellikle Harmonic Drive mekanizmasında) oluşan kayıplar motor momenti (mutlak) değerini artıran bir etken olarak kendini göstermektedir. Diğer taraftan, güç iletimi yönünün uzuvdan motor kademesine doğru ters yönde olması durumunda, uzvun yavaşlaması için gerekli frenleme momenti sadece motor tarafından değil, Harmonic Drive mekanizmasında oluşan kayıpların yol açtığı direnc ile de sağlanmaktadır. Bu durumda mekanizmada oluşan kayıplar motorun moment yükünü azaltmaktadır.

Ön ve arka kolun hareketleri sırasında, tahrik sistemlerindeki her iki Harmonic Drive mekanizması için verim değerlerinin sabit kalmadığı belirlenmiştir. Motor kademesinden uzva doğru güç iletiminde verim daha yüksek değerlere sahiptir. Aksi yönde güç iletimi için ise verimin daha düşük olması, bu halde mekanizmada daha büyük enerji kayıplarının meydana gelmesine yol açmaktadır. Bu da ön ve arka kolun frenlenmesi açısından avantajdır.

Tahrik sisteminde dikkate değer bir husus ta, motor kademesinin ivmelenmesi ile ilgili $(J_m + J_1)\ddot{\theta}$ terimidir. Bu terimin küçük olması, motordan uzva doğru (m ---> y) güç iletiminin hızlanma safhalarında ve uzuvdan motora doğru (y ---> m) güç iletiminin yavaşlama anlarında daha düşük motor momentlerine yol açması bakımından iyidir. y ---> m halinin hızlanma safhalarında dahi, özellikle ön kolun yüksek hızlardaki hareketleri için, gravitasyonel etki Harmonic Drive mekanizmasındaki kayıpları yenmesine rağmen, bazı durumlarda motor kademesine istenen hızlanmayı sağlayamamıştır. O halde, bu ivmelenme teriminin küçük bir değere sahip olması daha uygun olacaktır. Diğer taraftan, bu terimin küçük olması motor momenti (T_m) değerinin Harmonic Drive mekanizması giriş tarafı momenti (T_g) değerine yaklaşması anlamına gelecektir. Bu durumda T_m motor momenti de, hem daha küçük bir skalada değişim gösterecek hem de süreksizlik bir ölçüde de olsa azalacaktır. $(J_m + J_1)\ddot{\theta}$ terimi değerinin azaltılması için motora ait dönen elemanların J_m eylemsizlik değeri düşürülebilir. Ayrıca, Harmonic Drive mekanizmalarının avantajlarına sahip olan daha düşük J_1 değerlerindeki redüksiyon elemanlarını da (Cyclo mekanizmaları veya diğer planet mekanizması tipleri) kullanmak mümkündür. Böylece, motor kademesinin yüksek ivmelenme değerinin motor üzerindeki etkisi kısmen de olsa azalacaktır.

Çalışmada uzuvların kütleli özellikleri yaklaşık olarak alınmıştır. Ancak, bu uzuvların daha farklı kütle ve eylemsizlik değerlerine sahip olmaları halinde, tahrik

sistemlerinde ortaya çıkan sonuçlar yine de benzer karakterde olacaktır. Ayrıca, robot ön kolunun dış çevreden herhangi bir kuvvet ya da momente maruz kalmadığı kabul edilmiştir. Aksi durumda ise, örneğin robotun bir kütleyi taşıdığı düşünülürse, bu durumda gövdenin hareketinde sadece toplam eylemsizlik değeri artacak ve sonuçlarda önemli bir değişiklik olmayacaktır. Düşey doğrusal hareket sırasında ise, taşınan bu kütle sadece uzuvların gravitasyonel etkisini artırarak moment değişim eğrilerinde süreksizlik bölgelerini daha belirgin hale getirecektir.

Robota ait bu incelemede oluşturulan tahrik sistemi modelinde, motordan Harmonic Drive mekanizmasına enerji ileten mil ve mekanizma çıkışındaki esnek eleman (flexspline) için elastik eleman modelleri düşünülebilir. Ancak bu şekilde oluşturulan bir esnek model, bu çalışmada kurulan modele göre elde edilen motor momentleri üzerinde önemli bir değişiklik yaratmayacaktır. Buna rağmen, bu çalışmada kurulan model şüphesiz gerçeğe en yakın olanı değildir. Örneğin, Harmonic Drive mekanizmalarında verim değişimi için yapılan daha detaylı araştırmalar veya tahrik sistemindeki diğer kayıpların daha farklı modellenmesi sonuçları daha doğru ve sağlıklı hale getirebilir.

KAYNAKLAR

- [1] ASADA, H., SLOTINE, J.J.E., Robot Analysis and Control, Massachusetts Institute of Technology, 1986.
- [2] CRITCHLOW, A.J., Introduction to Robotics, California State University, Sacramento, 1985.
- [3] Harmonic Drive Gear Component Sets, HDUC Series.



EK A

Aşağıda, robot uç noktasının sabit bir r yarıçapında ve z yüksekliğinde iken, gövdenin parabolik formda bir açısız hız değişimi ile belirli bir açıda dönmesi durumunda taban motorundaki hız ve moment değişimlerini belirleyen bir program görülmektedir :

```

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
CHARACTER * 70 CH,CH1,CHR(7)
DIMENSION aNg(6),Eff(6)
WRITE(*,*) 'UZUV BOYLARI [m]'
  READC1,*) aH1,aL2,aL3
WRITE(*,*) 'KUTLE MERKEZLERİNİN YERLERİ [m]'
  READC1,*) c12,c13
WRITE(*,*) 'KUTLELER [kg]'
  READC1,*) cm1,cm2,cm3
WRITE(*,*) 'UZUVLARIN EYLEMSİZLİKLERİ [kg.m2]'
  READC1,*) y11,x12,y12,x13,y13
WRITE(*,*) 'MOTORUN VE REDUKSIYONDA YÜKSEK HIZLA '
WRITE(*,*) 'DÖNEN ELEMANIN EYLEMSİZLİKLERİ [kg.m2]'
  READC1,*) aJm,aJ1
WRITE(*,*) 'CEVRİM ORANI'
  READC1,*) aN
WRITE(*,*) 'MOTOR VE YÜK TARAFLARI '
WRITE(*,*) 'VİSKOZ SÜRTÜNME KATSAYILARI [Nm.s]'
  READC1,*) Bm,By
WRITE(*,*) 'MOTOR VE YÜK TARAFLARI '
WRITE(*,*) 'COULOMB SÜRTÜNMELERİ [Nm]'
  READC1,*) Tcm,Tcy
WRITE(*,*) 'HARMONIC DRIVE MEKANİZMASI VERİMİ '
WRITE(*,*) 'İÇİN ÇEŞİTLİ TEST HIZLARI [d/d]'
  READC1,*) aNg
WRITE(*,*) 'BU GİRİŞ DEVİR SAYILARI İÇİN'
WRITE(*,*) 'HIZA BAĞLI VERİMLER'
  READC1,*) Eff
WRITE(*,*) 'YÜKSÜZ ÇALIŞMA MOMENTLERİ (Nm)'
  READC1,*) T12,T21
31 WRITE(*,*) 'TOPLAM DÖNME AÇISI [%]',
WRITE(*,*) 'YARICAĞI [m] ve YÜKSEKLİK [m]'
  READC1,*) TETA,r,z
TETA=TETA*3.14159/180
aLtop=aL2+aL3
R1=r**2+(z-aH1)**2
IF(DSQRT(R1).LE.aLtop) GO TO 39
WRITE(*,*) 'UZAK NOKTA ! YENİ DEĞERLER VERİNİZ'
GO TO 31
39 WRITE(*,*) 'MAKSİMUM AÇISAL HIZ [rd/s]'
  READC1,*) Wmax
WRITE(*,43)
43 FORMAT(5X,'t',6X,' ACI',5X,' Nm ',4X,
* ' GÜÇ İLETİM',5X,' Tm')
WRITE(*,45)
45 FORMAT(3X,'[sn]',5X,' [o]',4X,'

```

```

* [d/d] ',5X,'YONU',7X,['Nm'],'
WRITEC*,47)
47  FORMAT(3X,'-----',
*  '-----')
A1=(R1-aL2**2-aL3**2)/(2*aL2*aL3)
TETA3=DACOSC A1)
A2=(z-aH1)/DSQRT(R1)
A3=aL2**2-aL3**2
A5=(R1+A3)/(2*DSQRT(R1)*aL2)
TETA2=DACOSC A2)-DACOSC A5)
C2=DCOSC TETA2)
S2=DSINC TETA2)
C23=DCOSC TETA2+TETA3)
S23=DSINC TETA2+TETA3)
  cI2=C2**2*xI2+S2**2*yI2
  cI3=C23**2*xI3+S23**2*yI3
zI2=cI2+cm2*(cI2*S2)**2
zI3=cI3+cm3*(aL2*S2+cI3*S23)**2
Itop=yI1+zI2+zI3
t=0.0
KONTROL=0
Ttop=3.0*TETA/(2*Wmax)
h=Ttop/160
SGN=1.0
69  A1=(Ttop-2*t)**3/(6*Ttop**2)
DTETA1=(Wmax*(t+A1)-TETA/4)*180/3.14159
w=Wmax*(1-((Ttop-2*t)/Ttop)**2)
Alfa=4.0*Wmax*(Ttop-2*t)/Ttop**2
Ty=Itop*Alfa
IF(t.EQ.Ttop) GO TO 80
IF(w.EQ.0.0) THEN
aISARET=DSIGN(SGN,Alfa)
ELSE
  aISARET=DSIGN(SGN,w)
ENDIF
80  Tc=Ty+By*w+Tcy*aISARET
aNm=w*aN*30/3.14159
aNm1=ABS(aNm)
ETA=VERIM(aNg,Eff,aNm1)
A1=(aJm+aJ1)*aN*Alfa
A2=Bm*aN*w
A3=Tc*aISARET
A=0.001
IF(A3.GT.-A) THEN
  Tg=Tc/(ETA*aN)+T12*aISARET
  IF(A3.LT.A) THEN
    CH=' 0 ---- 0 '
  ELSE
    CH='m ---> y '
  ENDIF
ELSE
  A4=ABS(Tc)-T21
  IF(ABS(A4).GE.A) THEN
    IF(A4.GT.0) THEN
      Tg=(Tc+T21*aISARET)*ETA/aN
      CH=' y ---> m '
    ELSE

```

```

      Tg=(Tc+T21*a1SARET)/(ETA*aN)
      CH=' m -><- y '
      ENDIF
      ELSE
      CH=' 0 ---- 0 '
      Tg=0.0
      ENDIF
    ENDIF
    IF(CH.EQ.' 0 ---- 0 ') GO TO 126
    f=Tc/(aN*Tg)
    AS=f*aN*(A1+A2)+By*w
    AB=(f*aN*Tcm+Tcy)*a1SARET
    Tm=(AS+AB+Ty)/(f*aN)
    GO TO 127
126  Tm=Tg+A1+A2+Tcm*a1SARET
127  WRITE(*,126)t,DTETA1,aNm,CH,Tm
128  FORMAT(3X,F5.2,3X,F5.2,3X,F5.0,3X,A10,3X,F5.2)
      t=t+h
      IF(t.LT.Ttop) GO TO 133
      KONTROL=KONTROL+1
      t=Ttop
133  IF(KONTROL.GT.1)GO TO 135
      GO TO 89
135  STOP
      END
C    HIZA BAGLI VERIMIN BELIRLENMESI
      FUNCTION VERIM(CaNg,Eff,aNm)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      DIMENSION aNg(5),Eff(5)
      DO 146 K=1,50
      IF(aNm.GE.aNg(K)) GO TO 148
      EGIM=(Eff(K)-Eff(K-1))/(CaNg(K)-aNg(K-1))
      VERIM=Eff(K-1)+EGIM*(aNm-aNg(K-1))
      GO TO 149
146  CONTINUE
149  RETURN
      END

```

Aşağıda bu program için gerekli data değerleri ve bu değerler için elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bu sonuçlar arasında taban motoru hızı ve momenti yanında, robot uç noktası dönme açısının ve tahrik sistemindeki güç iletimi yönünün değişimi de görülmektedir.

```

0.7,0.8,0.8
0.3,0.20
20.0,20.0,24.0
0.24,0.1,0.90,0.10,4.60
14.5D-4,11.4D-4
100.0
2.0D-4,2.0D-4
0.08,0.08
0.0,500.0,1000.0,2000.0,3500.0,5000.0
0.98,0.936,0.902,0.88,0.857,0.831
0.32,43.0
120.0,1.4,0.7
1.5

```

t [sn]	ACI [o]	Nm [d/d]	GUC İLETİM YONU	Tm [Nm]
.00	.00	0.	m ---> y	1.79
.01	.01	36.	m ---> y	1.77
.03	.06	71.	m ---> y	1.76
.04	.12	105.	m ---> y	1.74
.05	.22	140.	m ---> y	1.73
.07	.34	173.	m ---> y	1.71
.08	.49	207.	m ---> y	1.70
.09	.67	240.	m ---> y	1.68
.10	.87	272.	m ---> y	1.67
.12	1.10	304.	m ---> y	1.65
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.98	54.38	1427.	m ---> y	.52
.99	55.50	1429.	m ---> y	.50
1.01	56.63	1430.	m ---> y	.49
1.02	57.75	1432.	m ---> y	.47
1.03	58.88	1432.	m ---> y	.45
1.05	60.00	1432.	m ---> y	.43
1.06	61.12	1432.	m -><- y	.57
1.07	62.25	1432.	m -><- y	.56
1.09	63.37	1430.	m -><- y	.54
1.10	64.50	1429.	m -><- y	.52
1.11	65.62	1427.	m -><- y	.50
1.13	66.74	1424.	m -><- y	.48
1.14	67.85	1421.	m -><- y	.47
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
1.69	108.23	895.	m -><- y	-.31
1.70	108.93	873.	m -><- y	-.32
1.71	109.60	850.	m -><- y	-.34
1.73	110.26	827.	m -><- y	-.36
1.74	110.90	804.	m -><- y	-.38
1.75	111.52	780.	m -><- y	-.40
1.77	112.13	755.	y ---> m	-.42
1.78	112.71	731.	y ---> m	-.43
1.79	113.27	705.	y ---> m	-.45
1.81	113.82	679.	y ---> m	-.47
1.82	114.34	653.	y ---> m	-.49
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
2.06	119.86	105.	y ---> m	-.80
2.07	119.94	71.	y ---> m	-.82
2.08	119.99	36.	y ---> m	-.84
2.09	120.00	0.	y ---> m	-.86
2.09	120.00	0.	y ---> m	-.86

EK B

Aşağıda robot uç noktasının bir $P_1(x_1, y_1, z_1)$ noktasından $P_2(x_2, y_2, z_2)$ noktasına hareketi için motor momentlerini hesaplayan bir program görülmektedir :

```

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
CHARACTER *70 CHR(3),CH(13)
DIMENSION AHC(3),AIC(3),BC(3),R12(3),AC(3)
DIMENSION ALFA2(3),GC(3),aNm(3),aN(3),cm(3)
DIMENSION V1(3),V2(3),V3(3),V4(3)
DIMENSION V5(3),V6(3),V7(3),V8(3)
DIMENSION aJm(3),aJ1(3),Bm(3),By(3)
DIMENSION Tem(3),Tey(3),T12(3),T21(3)
DIMENSION Ty(3),Te(3),Tg(3),Tm(3),Eff(3,6),aNg(6)
DIMENSION TETA(3,3),RC2(3,3),RC1(3,3)
DIMENSION w(3,3),Alfa(3,3),aISARET(3)
DIMENSION aI1(3,3),aI2(3,3),aI3(3,3)
DIMENSION Fe(3,4),aNc(3,4),aNi(3,3),VJ(3,3),ACC(3,3)

WRITE(*,*) 'UZUV BOYLARI [m]'
  READC(1,*) aH1,aL2,aL3
WRITE(*,*) 'KUTLE MERKEZLERININ YERLERI [m]'
  READC(1,*) ch1,cl2,cl3
WRITE(*,*) 'UZUV KUTLELERI [kg]'
  READC(1,*) cm
WRITE(*,*) 'TABAN UZVU EYLEMSIZLIKLERI [kg.m2]'
  READC(1,*) xI1,yI1,zI1
WRITE(*,*) '2. UZUV (OMUZ) EYLEMSIZLIKLERI [kg.m2]'
  READC(1,*) xI2,yI2,zI2
WRITE(*,*) '3. UZUV (KOL) EYLEMSIZLIKLERI [kg.m2]'
  READC(1,*) xI3,yI3,zI3
WRITE(*,*) 'MOTOR EYLEMSIZLIKLERI [kg.m2]'
  READC(1,*) aJm
WRITE(*,*) 'CEVRIM ORANLARI'
  READC(1,*) aN
WRITE(*,*) 'WAVE GENERATOR EYLEMSIZLIKLERI [kg.m2]'
  READC(1,*) aJ1
WRITE(*,*) 'MOTOR SEVIYELERI'
WRITE(*,*) 'VISKOZ SURTUNME KATSAYILARI [Nm.s]'
  READC(1,*) Bm
WRITE(*,*) 'YUK SEVIYELERI'
WRITE(*,*) 'VISKOZ SURTUNME KATSAYILARI [Nm.s]'
  READC(1,*) By
WRITE(*,*) 'MOTOR SEVIYESI COULOMB SURTUNMELERI [Nm]'
  READC(1,*) Tem
WRITE(*,*) 'YUK SEVIYESI COULOMB SURTUNMELERI [Nm]'
  READC(1,*) Tey
WRITE(*,*) 'HARMONIC DRIVE MEKANIZMASI'
WRITE(*,*) 'ICIN CESITLI TEST HIZLARI [d/d]'
  READC(1,*) aNg
WRITE(*,*) 'BU GIRIS DEVIR SAYILARI ICIN HARMONIC'

```

```

WRITEC(*,*)'DRIVE MEKANİZMALARDAKI VERİM DEĞERLERİ'
  READC1,*)(Eff(1,K1),K1=1,8)
  READC1,*)(Eff(2,K1),K1=1,8)
  READC1,*)(Eff(3,K1),K1=1,8)
WRITEC(*,*)'YUKSUZ ÇALIŞMA MOMENTLERİ'
  READC1,*) T12
  READC1,*) T21
  aLTop=(aL2+aL3)**2
5  WRITEC(*,*)'1. NOKTA (X1,Y1,Z1) [m]'
  READC1,*) X1,Y1,Z1
  A1=X1**2+Y1**2+(Z1-aH1)**2
  IF(A1.LT.aLTop) GO TO 7
  WRITEC(*,*)'UZAK NOKTA! YENİ DEĞERLER VERİNİZ'
  GO TO 5
7  WRITEC(*,*)'2. NOKTA (X2,Y2,Z2) [m]'
  READC1,*) X2,Y2,Z2
  A2=X2**2+Y2**2+(Z2-aH1)**2
  IF(A2.LT.aLTop) GO TO 8
  WRITEC(*,*)'UZAK NOKTA! YENİ DEĞERLER VERİNİZ'
  GO TO 7
8  WRITEC(*,*)'MAXİMUM HIZ [m/s]'
  READC1,*) Vmax
  WRITEC(*,13)
13  FORMAT(4X,'t',5X,'s',2X,'| Nm2',4X,'Tm2',3X,
  * 'İLETİM | Nm3',4X,'Tm3',3X,'İLETİM')
  WRITEC(*,15)
15  FORMAT(2X,'[sn]',3X,'[m] |[d/d]',3X,'[Nm]',3X,
  * 'YONU',3X,'|[d/d]',3X,'[Nm]',3X,'YONU')
  WRITEC(*,17)
17  FORMAT(2X,'----- |-----',2X,
  * '----- |-----')
  DATA G/0.0,0.0,-9.807/
  DATA FI/3.14159/
  A1=(X2-X1)**2+(Y2-Y1)**2+(Z2-Z1)**2
  D=DSQRT(A1)
  Ttop=3.0*D/(2*Vmax)
  dh=Ttop/200
  K=0
  KONTROL=0
  KKK=0
  t0=0.0
  t=0.0
  AC(1)=1-aH1/ch1
  AC(2)=1-aL2/cl2
  AC(3)=1-aL3/cl3
38  K=K+1
C  "S" YOLU VE KARTEZYEN KOORDİNATLARIN HESABI

45  A1=4*Vmax*t0*t0*t0/(3*Ttop*Ttop)
  S=2*Vmax*t0*t0/Ttop-A1
  X=X1+S*(X2-X1)/D
  Y=Y1+S*(Y2-Y1)/D
  Z=Z1+S*(Z2-Z1)/D

C  KONFIGURASYON AÇILARININ İLK 3 DEĞERLERİ
  R1=X**2+Y**2
  R=R1+(Z-aH1)**2

```

```

      A2=(R-aL2**2-aL3**2)/(2*aL2*aL3)
      TETAC(3,K)=DACOSC(A2)
      A3=(Z-aH1)/DSQRT(R)
      A5=2*DSQRT(R)*aL2
      A6=(R+aL2**2-aL3**2)/A5
      TETAC(2,K)=DACOSC(A3)-DACOSC(A6)
      A8=DSQRT(R1)
      A7=DACOSC(X/A8)
      IF(Y.GE.0.0) GO TO 76
      TETAC(1,K)=-A7
      GO TO 77
76    TETAC(1,K)=A7
77    t0=t0+dh
      IF(K.LT.3) GO TO 38
C     ACISAL IVME "AIC(3)" VE ACISAL HIZ "AHC(3)" 'IN
C     "SONLU FARKLAR METODU" ILE HESABI

80    DO 98 K2=1,3
      IF(KONTROL.EQ.2) GO TO 90
      AHCK2)=0.0
      IF(K2.EQ.1) KONTROL=KONTROL+1
      GO TO 92
90    AHCK2)=(TETACK2,3)-TETACK2,1)/(2*dh)
92    A1=TETACK2,3)-2*TETACK2,2)
      AIC(K2)=(A1+TETACK2,1)/dh**2
98    CONTINUE
      LL=2
      IF(t.EQ.0.0) LL=1
      IF(KONTROL.GT.3) LL=3
      T1=TETAC(1,LL)
      T2=TETAC(2,LL)
      T3=TETAC(3,LL)
      C1=DCOSC(T1)
      C2=DCOSC(T2)
      S1=DSINC(T1)
      S2=DSINC(T2)
      C23=DCOSC(T2+T3)
      S23=DSINC(T2+T3)
C     "BC(3)" DONME EKSENLERI VEKTORU VE "RC2(3,3) ve
C     RC1(3,3)" YER VEKTORLERI MATRISLERI
      BC(1)=-S1
      BC(2)=C1
      BC(3)=0.0
      RC2(1,1)=0.0
      RC2(2,1)=0.0
      RC2(3,1)=ch1
      RC2(1,2)=c12*C1*S2
      RC2(2,2)=c12*S1*S2
      RC2(3,2)=c12*C2
      RC2(1,3)=c13*C1*S23
      RC2(2,3)=c13*S1*S23
      RC2(3,3)=c13*C23
      DO 119 K3=1,3
      DO 118 K4=1,3
      RC1(K4,K3)=ACK3)*RC2(K4,K3)
      ANICK4,K3)=0.0

```

```

          VJCK4,K3)=0.0
118      CONTINUE
          R12(K3)=RC2(K3,2)*aL2/c12
          V2(K3)=0.0
119      CONTINUE

```

```

C      "wC3,3) ve AlfaC3,3)" ACISAL HIZ VE IVME
C      VEKTORLERINE AIT MATRISLERIN HESABI

```

```

          wC1,1)=0.0
          wC2,1)=0.0
          wC3,1)=AH(1)
          AlfaC1,1)=0.0
          AlfaC2,1)=0.0
          AlfaC3,1)=AI(1)
          DO 139 K1=1,2
              V1(1)=wC1,K1)
              V1(2)=wC2,K1)
              V1(3)=wC3,K1)
              CALL VEK(V1,B,V2)
          DO 139 K2=1,3
              A1=AH(K1)*V2(K2)+AI(K1+1)*BCK2)
              AlfaC(K2,K1+1)=AlfaC(K2,K1)+A1
              wC(K2,K1+1)=wC(K2,K1)+AH(K1+1)*BCK2)
              V3(K2)=wC(K2,2)
              V4(K2)=AlfaC(K2,2)
139      CONTINUE

```

```

C      X2,Y2,Z2 EKSEN TAKIMI IVME VEKTORU HESABI

```

```

          CALL VEK(V3,R12,V1)
          CALL VEK(V3,V1,V2)
          CALL VEK(V4,R12,V1)
          ALFA2(1)=V1(1)+V2(1)
          ALFA2(2)=V1(2)+V2(2)
          ALFA2(3)=V1(3)+V2(3)

```

```

C      KONFIGURASYON BAGIMLI EYLEMSIZLIK MATRISLERI

```

```

          aI1(1,1)=C1**2*xI1+S1**2*zI1
          aI1(2,1)=C1*S1*(xI1+zI1)
          aI1(2,2)=xI1*S1**2+zI1*C1**2
          aI1(3,1)=0.0
          aI1(3,2)=0.0
          aI1(3,3)=yI1
          A1=xI2*S2**2+yI2*C2**2
          A2=(xI2-yI2)*C2*S2
          aI2(1,1)=A1*C1**2+zI2*S1**2
          aI2(2,1)=(A1-zI2)*C1*S1
          aI2(2,2)=A1*S1**2+zI2*C1**2
          aI2(3,1)=A2*C1
          aI2(3,2)=A2*S1
          aI2(3,3)=xI2*C2**2+yI2*S2**2
          A3=xI3*S23**2+yI3*C23**2
          A4=(xI3-yI3)*C23*S23
          aI3(1,1)=A3*C1**2+zI3*S1**2
          aI3(2,1)=(A3-zI3)*C1*S1
          aI3(2,2)=A3*S1**2+zI3*C1**2
          aI3(3,1)=A4*C1

```

```

aI3(3,2)=A4*S1
aI3(3,3)=xI3*C23**2+yI3*S23**2
DO 176 K1=2,3
  DO 176 K2=1,2
    IF(K2.EQ.K1)GO TO 176
    aI1(K2,K1)=aI1(K1,K2)
    aI2(K2,K1)=aI2(K1,K2)
    aI3(K2,K1)=aI3(K1,K2)
  176 CONTINUE
C  "aNI" KUTLE ATALET MOMENTI VEKTORLERI MATRISI
  CALL MATCaI1,Alfa,1,aNI)
  CALL MATCaI2,Alfa,2,aNI)
  CALL MATCaI3,Alfa,3,aNI)
C  "VJ" JIROSKOPIK MOMENTLER MATRISI
  CALL MATCaI1,w,1,VJ)
  CALL MATCaI2,w,2,VJ)
  CALL MATCaI3,w,3,VJ)
C  "Fc(3,4)" LINK KUVVETLERI VEKTORLER MATRISI
  DO 200 K1=3,1,-1
    DO 188 K2=1,3
      V1(K2)=Alfa(K2,K1)
      V2(K2)=w(K2,K1)
      V3(K2)=RC2(K2,K1)
      Fc(K2,4)=0.0
      aNc(K2,4)=0.0
    188 CONTINUE
    CALL VEK(V1,V3,V4)
    CALL VEK(V2,V3,V1)
    CALL VEK(V2,V1,V3)
    DO 200 K3=1,3
      IF(K1.EQ.3) GO TO 198
      ALFA2(K3)=0.0
    198 AC(K3,K1)=ALFA2(K3)+V3(K3)+V4(K3)
      A2=cm(K1)*(AC(K3,K1)-G(K3))
      Fc(K3,K1)=Fc(K3,K1+1)+A2
    200 CONTINUE
C  "Ty". YUK MOMENTLERI VE "Tm" MOTOR MOMENTLERI HESABI
  DO 235 K1=3,1,-1
    Ty(K1)=0.0
    DO 211 K2=1,3
      V1(K2)=RC1(K2,K1)
      V2(K2)=RC2(K2,K1)
      V3(K2)=Fc(K2,K1+1)
      V4(K2)=Fc(K2,K1)
      V5(K2)=w(K2,K1)
      V6(K2)=VJ(K2,K1)
      V7(K2)=0.0
    211 CONTINUE
    CALL VEK(V5,V6,V7)
    CALL VEK(V2,V4,V5)
    CALL VEK(V1,V3,V4)
    DO 226 K3=1,3

```

```

      A3=aNICK3,K1)+V7(K3)
      aNcCK3,K1)=aNcCK3,K1+1)+V5(K3)-V4(K3)+A3
      IFCK1.GT.1) GO TO 224
      IFCK3.LT.3) GO TO 226
      TyCK1)=aNcCK3,K1)
      GO TO 226
224   TyCK1)=TyCK1)+aNcCK3,K1)*BCK3)
226   CONTINUE

```

C GUC ILETIM YONU VE MOTOR MOMENTININ BELIRLENMESI

```

      SGN=1.0
      IFCKONTROL.GT.3) GO TO 228
      IF(AHCK1).EQ.0.0.AND.AI(K1).EQ.0.0) THEN
        aISARETCK1)=0.0
      ELSE
        IF(AHCK1).EQ.0.0) THEN
          aISARETCK1)=DSIGN(SGN,AI(K1))
        ELSE
          aISARETCK1)=DSIGN(SGN,AHCK1))
        ENDIF
      ENDIF
228   TeCK1)=TyCK1)+ByCK1)*AHCK1)+TeyCK1)*aISARETCK1)
      aNmCK1)=AHCK1)*30.0*aNCK1)/PI
      aNm1=ABS(aNmCK1))
      ETA=VERIMCK1,aNg,Eff,aNm1)
      A1=(CaJmCK1)+aJ1(K1))*aNCK1)*AI(K1)
      A2=BmCK1)*aNCK1)*AHCK1)
      A3=TeCK1)*aISARETCK1)
      AAA=0.001
      IF(A5.GT.-AAA) THEN
        TgCK1)=TeCK1)/(ETA*aNCK1))+T12CK1)*aISARETCK1)
      IF(A5.LT.AAA) THEN
        CHRCK1)=' 0---0 '
      ELSE
        CHRCK1)=' m--->y '
      ENDIF
    ELSE
      A6=ABS(TeCK1))-T21(K1)
      IF(ABS(A6).GE.AAA) THEN
        A2=TeCK1)+T21(K1)*aISARETCK1)
        IF(A6.GT.0.0) THEN
          TgCK1)=A2*ETA/aNCK1)
          CHRCK1)=' y--->m '
        ELSE
          TgCK1)=A2/(ETA*aNCK1))
          CHRCK1)=' m-><-y '
        ENDIF
      ELSE
        CHRCK1)=' 0---0 '
        TgCK1)=0.0
      ENDIF
    ENDIF
  ENDIF
  IF(CHRCK1).EQ.' 0---0 ') GO TO 230
  f=TeCK1)/(aNCK1)*TgCK1)
  A7=f*aNCK1)*(A1+A2)+ByCK1)*AHCK1)
  A8=(f*aNCK1)*TcmCK1)+TeyCK1))*aISARETCK1)

```

```

      Tm(K1)=(A7+A8+Ty(K1))/(f*aN(K1))
      GO TO 235
230    Tm(K1)=Tg(K1)+A1+A2+Tem(K1)*aISARET(K1)
235    CONTINUE
255    Sg=2*Vmax*t**2/Ttop-4*Vmax*t**3/(3*Ttop**2)
      WRITE(*,245)t,Sg,aNm(2),Tm(2),CHRC(2),
                                aNm(3),Tm(3),CHRC(3)
245    FORMAT(2X,F4.1,2X,F4.2,' ',F5.0,2X
*          ,F5.2,2X,A7,' ',F5.0,2X,F5.2,2X,A7)
      t=t+dh
      IF(KONTROL.GT.3)GO TO 300
      IF(KKK.EQ.0.AND.KONTROL.EQ.2) THEN
        TETAC(1,1)=TETAC(1,2)
        TETAC(2,1)=TETAC(2,2)
        TETAC(3,1)=TETAC(3,2)
        IF(t0.GE.Ttop)THEN
          dh=(Ttop-t+dh)/2
          t0=Ttop-dh
          t=t0
          K=2
          KKK=1
        ELSE
          TETAC(1,2)=TETAC(1,3)
          TETAC(2,2)=TETAC(2,3)
          TETAC(3,2)=TETAC(3,3)
        ENDIF
        GO TO 45
      ELSE
        KONTROL=KONTROL+1
        GO TO 80
      ENDIF
300    STOP
      END

```

```

C   BIR "A" MATRISI ILE DIGER BIR "B" MATRISIN
C   (L1)'INCI SUTUNU CARPIMI SONUCUNUN "C" NIN
C   (L1)'INCI SUTUNUNA ESITLENMESI

```

```

      SUBROUTINE MAT(A,B,K1,C)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      DIMENSION AC(3,3),BC(3,3),CC(3,3)
      DO 275 K=1,3
        CCK(K1)=0.0
        DO 275 K2=1,3
          A1=ACK(K2)*BCK2(K1)
          CCK(K1)=CCK(K1)+A1
275    CONTINUE
      RETURN
      END

```

```

C   "A" VEKTORU ILE "B"NIN CARPIMININ "C"YE ESITLENMESI
      SUBROUTINE VEK(A,B,C)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      DIMENSION AC(3),BC(3),CC(3)
      J=2

```

```

      L=3
      DO 287 I=1,3
        C(I)=A(CJ)*B(CL)-A(CL)*B(CJ)
        J=L
        L=I
287    CONTINUE
      RETURN
      END

```

C HERHANGI BIR GIRIS DEVIR SAYISI ICIN REDUKSIYON
 C ELEMENINI HIZA BAGLI VERIM DEGERININ HESAPLANMASI

```

      FUNCTION VERIM(K,aNg,Eff,aNm1)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      DIMENSION aNg(6),Eff(3,6)
      DO 500 K1=1,50
        IF(aNm1.GE.aNg(K1))GO TO 500
        EGIM=(Eff(K,K1)-Eff(K,K1-1))/(aNg(K1)-aNg(K1-1))
        VERIM=Eff(K,K1-1)+EGIM*(aNm1-aNg(K1-1))
        GO TO 501
500    CONTINUE
501    RETURN
      END

```

Aşağıda bu programa ait giriş data değerleri ve bu değerlere ait omuz ve dirsek motoru hız ve moment değişimleri verilmiştir.

Giriş Data Değerleri :

```

0.7,0.6,0.8
0.5,0.3,0.20
20.0,20.0,24.0
0.08,0.24,0.08
0.1,0.90,0.90
0.10,4.60,4.60
14.5D-4,14.5D-4,11.0D-4
100.0,160.0,100.0
11.4D-4,11.4D-4,1.46D-4
2.0D-4,2.0D-4,2.0D-4
2.0D-4,2.0D-4,2.0D-4
0.08,0.08,0.08
0.08,0.08,0.08
0.0,500.0,1000.0,2000.0,3500.0,5000.0
0.98,0.936,0.902,0.88,0.857,0.831
0.95,0.902,0.868,0.818,0.774,0.718
0.98,0.944,0.909,0.886,0.864,0.837
0.32,0.225,0.105
43.0,50.0,13.0
0.9,0.9,1.2
0.9,0.9,0.2
0.1

```

Çıkış Değerleri :

t	s	Nm2	Tm2	ILETIM	Nm3	Tm3	ILETIM
[sn]	[m]	[d/d]	[Nm]	YONU	[d/d]	[Nm]	YONU
0	.00	0.	-1.89	m--->y	0.	-.23	y--->m
.1	.00	-2.	-1.89	m--->y	5.	-.23	y--->m
.2	.00	-4.	-1.89	m--->y	9.	-.23	y--->m
.2	.00	-7.	-1.89	m--->y	14.	-.23	y--->m
.3	.00	-9.	-1.89	m--->y	18.	-.23	y--->m
.4	.00	-11.	-1.89	m--->y	23.	-.23	y--->m
.5	.00	-13.	-1.88	m--->y	27.	-.24	y--->m
.5	.00	-14.	-1.88	m--->y	31.	-.24	y--->m
.6	.00	-16.	-1.88	m--->y	35.	-.24	y--->m
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
3.2	.11	-6.	-1.85	m--->y	85.	-.25	y--->m
3.2	.12	-4.	-1.84	m--->y	85.	-.25	y--->m
3.3	.12	-2.	-1.84	m--->y	84.	-.25	y--->m
3.4	.13	-1.	-1.84	m--->y	84.	-.25	y--->m
3.5	.13	1.	-.83	y--->m	83.	-.25	y--->m
3.5	.14	3.	-.83	y--->m	83.	-.25	y--->m
3.6	.15	5.	-.83	y--->m	82.	-.25	y--->m
3.7	.15	7.	-.83	y--->m	81.	-.25	y--->m
3.8	.16	9.	-.83	y--->m	80.	-.25	y--->m
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
7.1	.46	110.	-.89	y--->m	10.	-.23	y--->m
7.2	.47	112.	-.89	y--->m	8.	-.23	y--->m
7.3	.48	114.	-.90	y--->m	6.	-.23	y--->m
7.4	.49	116.	-.90	y--->m	4.	-.23	y--->m
7.4	.49	118.	-.90	y--->m	2.	-.23	y--->m
7.5	.50	120.	-.90	y--->m	0.	-.64	m--->y
7.6	.51	122.	-.91	y--->m	-2.	-.64	m--->y
7.7	.51	124.	-.91	y--->m	-4.	-.64	m--->y
7.7	.52	125.	-.91	y--->m	-6.	-.63	m--->y
7.8	.53	127.	-.91	y--->m	-8.	-.63	m--->y
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
14.6	1.00	31.	-1.06	y--->m	-23.	-.59	m--->y
14.7	1.00	25.	-1.06	y--->m	-18.	-.59	m--->y
14.8	1.00	19.	-1.06	y--->m	-14.	-.59	m--->y
14.8	1.00	13.	-1.06	y--->m	-9.	-.59	m--->y
14.9	1.00	6.	-1.06	y--->m	-5.	-.59	m--->y
15.0	1.00	3.	-1.06	y--->m	-2.	-.59	m--->y
15.0	1.00	0.	-1.07	y--->m	0.	-.59	m--->y

ÖZGEÇMİŞ

Tamer Çelebi, 14.11.1970 tarihinde İstanbul 'da doğdu. İlk ve orta eğitimini İstanbul 'da tamamladı. 1987 yılında yine İstanbul 'da, İnönü Endüstri Meslek Lisesi Makina Ressamlığı Bölümü 'nü bitirdi. Kısa bir süre teknik ressam olarak çalıştıktan sonra, aynı yıl girdiği Öğrenci Seçme ve Yerleştirme Sınavları'nda İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi 'nde Makina Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. Lisans eğitimini dört yılda tamamlayarak 1991 yılında mezun oldu.

